

طراحی، ساخت و درجه‌بندی شیدسنج خورشیدی تک‌کاناله برای مطالعه هواویزها

مسعود ایمانی، علی بیات و احمد درودی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۸/۰۷)

چکیده

هواویزها ذرات جامد یا مایع معلق در هوا هستند که نقش مهمی در زور تابشی جو، ویژگی ابرها، کیفیت هوا و سلامتی انسان‌ها دارند. شیدسنج خورشیدی، نوعی تابش‌سنج خورشیدی است که شدت نور طیفی مستقیم رسیده از خورشید را به منظور استخراج خواص اپتیکی و فیزیکی هواویزها از سطح زمین اندازه‌گیری می‌کند. در این مقاله طراحی، ساخت و درجه‌بندی یک شیدسنج خورشیدی تک‌کاناله ارائه می‌شود. نتایج عمق اپتیکی هواویزها، اندازه‌گیری شده توسط شیدسنج خورشیدی ساخته شده برای روز ۱۵ شهریور ۱۳۹۵ با اندازه‌گیری شیدسنج CE ۳۱۸-۲ ساخت شرکت CIMEL همخوانی خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: شیدسنج خورشیدی، هواویز، سنجش از دور، عمق اپتیکی

۱. مقدمه

هواویزها ذرات ریز جامد یا مایع معلق در هوا هستند که نقش مهمی در بودجه تابشی جو، تشکیل ابر، کیفیت هوا، سلامتی جامعه و فرایندهای شیمیایی در جو دارند [۱]. هواویزها چگالی اپتیکی جو زمین را در طول موج‌های مختلف تغییر می‌دهند. میزان مانایی آنها در جو زمین کم است و وسعت منابع تولید کننده آنها زیاد است. بنابراین تغییرات زمانی و مکانی زیادی در جو زمین دارند. به همین خاطر منبع بزرگ خطا در مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی هستند. برای درک بهتر تأثیر هواویزها در جو زمین باید آنها را به طور دقیق و پیوسته مورد مطالعه قرار

دهیم [۱ و ۲].

ایران در منطقه خاورمیانه و در کمربند غبار کره زمین قرار دارد و با بارش میانگین کمتر از ۴۰۰ میلی‌متر در سال، جزء کشورهای خشک و کم‌باران محسوب می‌شود. خشک سالی‌های اخیر، خشک شدن تالاب‌ها و دریاچه‌ها، از بین رفتن پوشش گیاهی مراتع و درختان جنگل‌ها، سدسازی‌های غیراصولی و گسترش زندگی شهری و افزایش مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی باعث رشد چشمگیر تولید آلاینده‌های هوا و گازهای موسوم به گازهای گلخانه‌ای در کشور شده است. از طرفی غبار ایجاد شده از برخی منابع داخلی و غبار منطقه‌ای که

از کشورهای دیگر از جمله عراق به سمت ایران می‌آیند باعث تقویت این اثر می‌شود. به طوری که سالانه شاهد افزایش تعداد روزهای ناسالم در اکثر شهرهای بزرگ می‌باشیم. برای نمونه روزهای سالم در تهران و شهرهایی مانند اهواز هرساله رو به کاهش است و همه ساله شاهد افزایش روزهای تعطیل مدارس و ادارات دولتی به دلیل آلودگی هوا و افزایش بیماری‌ها و مرگ و میر ناشی از تأثیرات افزایش هواویزها هستیم [۳].

به منظور درک بهتر تأثیرات هواویزها، دستگاه‌های مختلف زمین-پایه و فضایی گسترش یافتند تا اطلاعات قابل اعتماد و گسترده‌ای از خواص هواویزها و اثرات آنها در اختیار ما قرار دهند. از ابزارهای زمین پایه می‌توان به شیدسنج خورشیدی و لیدار به عنوان دو ابزار سنجش از دور غیرعامل (از نور خورشید برای اندازه‌گیری استفاده می‌کند) و عامل (از لیزر برای اندازه‌گیری استفاده می‌کند) اشاره کرد. مادیس^۱ و کالیپسو^۲ دو نمونه از سنجنده‌های غیرعامل و عامل فضاپرد هستند که از فضا ذرات معلق کل جو زمین را به صورت روزانه اندازه‌گیری می‌کنند. ابزارهای سنجش از دور زمین پایه دارای دقت بالای اندازه‌گیری به لحاظ زمانی و محلی نسبت به دستگاه‌های فضایی هستند، در حالی که اغلب ماهواره‌ها در یک روز می‌توانند کل زمین را اندازه‌گیری کنند [۴ و ۵].

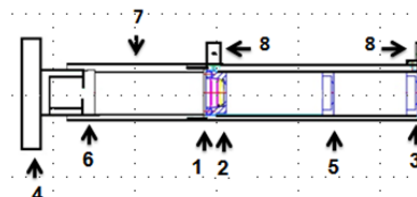
شیدسنج خورشیدی نوعی تابش‌سنج زمین-پایه است که شدت نور خورشید را در طول موج‌های معین اندازه‌گیری می‌کند. اولین شیدسنج توسط ولتر در سال ۱۹۵۹ ساخته شد. با پیشرفت فناوری شیدسنج‌های نوین که دارای فناوری پیشرفته در اپتیک و الکترونیک هستند و دارای حساسیت و مانایی بیشتری هستند ساخته شد. در سال‌های اخیر شیدسنج‌ها علاوه بر اندازه‌گیری شدت نور مستقیم خورشید (زاویه پراکندگی صفر درجه) که از جو زمین عبور کرده است، شدت نور پراکنده شده از هواویزها در زوایای مختلف و شدت نور ماه را در شب اندازه‌گیری می‌کنند. از اندازه‌گیری این شیدسنج‌های پیشرفته می‌توان عمق اپتیکی

هواویزها، میزان ستونی بخار آب، نمای آنگستروم، سپیدایی تک‌باره، تابع فازی، ضریب شکست هواویزها و توزیع ابعادی ذرات معلق داخل جو زمین را استخراج کرد. عمق اپتیکی هواویزها معیاری از میزان ذرات معلق داخل جو زمین را نشان می‌دهد که به صورت مستقیم از اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی به دست می‌آید [۲، ۴ و ۵]. تنها شیدسنج خورشیدی موجود در ایران، مدل ۲-CE۳۱۸ ساخت شرکت CIMEL است که در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان قرار دارد و از سال ۲۰۰۶ داده برداری خود را آغاز کرده است [۴]. از اندازه‌گیری‌های این شیدسنج خورشیدی خواص اپتیکی و فیزیکی هواویزهای زنجان [۴ و ۶]، شناسایی روزها و چشمه‌های غباری [۷]، اثر هواویزهای زنجان بر روی بودجه تابشی خورشید [۸]، نقش هواویزها در تغییر قطبش نور برای شرایط مختلف جوی زنجان [۵، ۹] و مقایسه بخار آب اندازه‌گیری شده با شیدسنج و داده‌های ماهواره‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۱۰]. اما از محدودیت‌های شیدسنج خورشیدی این است که باید هر سال برای درجه‌بندی به شرکت CIMEL فرستاده شود. این کار علاوه بر هزینه‌بر بودن آن، موجب قطع داده‌برداری به مدت طولانی (معمولاً شش ماه) می‌شود. از طرفی، هزینه خریداری شیدسنج خورشیدی بسیار زیاد است. از آنجایی که اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی محلی است و برای مطالعه پیوسته هواویزهای شهرهای دیگر، نیاز به تعداد زیادی شیدسنج خورشیدی داریم؛ بنابراین شروع به طراحی و ساخت این ابزار در داخل کشور کردیم.

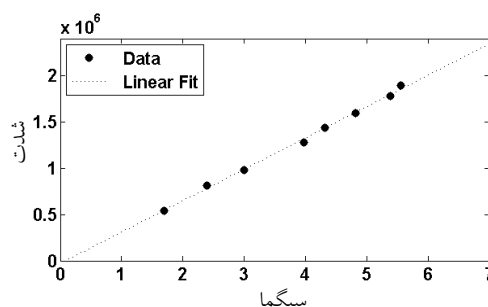
در این مقاله، طراحی، ساخت و نمونه‌ای از اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی تک‌کاناله به منظور اندازه‌گیری عمق اپتیکی هواویزها ارائه می‌شود. در بخش ۲، مشخصات فیزیکی و اپتیکی شیدسنج خورشیدی ساخته شده توضیح داده می‌شود. نظریه کار در بخش ۳ بحث خواهد شد. در بخش ۴ نحوه درجه‌بندی، دو نمونه از اندازه‌گیری و مقایسه داده‌ها با شیدسنج خورشیدی دانشگاه تحصیلات تکمیلی ارائه می‌شود. در نهایت در بخش ۵ نتیجه‌گیری خواهیم کرد.

۱. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

۲. Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO)



شکل ۱. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) شمایی از بخش اپتیکی شیدسنج خورشیدی ساخته شده.



شکل ۲. شدت نور بر حسب واریانس برای تعیین خطی بودن CCD. واحد شدت نور شمارش و واحد واریانس (سیگما) مربع شمارش است.

۲. مشخصات فیزیکی و اپتیکی شیدسنج خورشیدی

تک‌کاناله

برای ساخت شیدسنج تک‌کاناله ابتدا بدنهٔ آن با نرم‌افزار سالدورک^۳ طراحی شد و سپس با نرم‌افزار زیمکس^۴ اپتیک آن مورد بررسی قرار گرفت. طول بخش اپتیکی حدود ۴۰ سانتی‌متر است و زاویهٔ دید یک درجه برای کل شیدسنج تعیین شد که دو برابر زاویهٔ دید خورشید از سطح زمین است. برای سبکی، بدنهٔ شیدسنج با آلومینیوم ساخته شد که کل وزن آن تقریباً نیم کیلوگرم شد. برای کم کردن نورهای سرگردان در اندازه‌گیری علاوه بر قرار دادن چند روزنه‌بند در داخل موازی‌ساز کل بدنهٔ آلومینیومی آنوده‌شدهٔ سیاه رنگ شد. در شکل ۱، شمایی از چیدمان قطعات مختلف آورده شده است. اجزای مختلف شیدسنج خورشیدی تک‌کاناله به ترتیب زیر است:

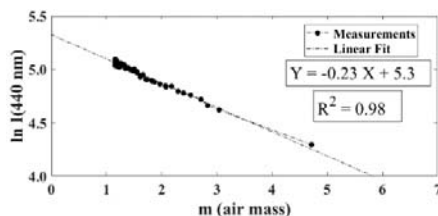
۱. عدسی با قطر ۱ اینچ و فاصلهٔ کانونی ۱۷۵ میلی‌متر
۲. صافی تداخلی ۴۴۰ نانومتری با پهنای نواری ۱۰ نانومتر
۳. صافی شدتی مایلاز برای کم کردن شدت نور خورشید
۴. CCD تورلب، ۱۰۸۰×۱۲۴۰ پیکسل ۸ بیتی، اندازهٔ هر

پیکسل ۶/۳ میکرومتر در ۶/۳ میکرومتر است. ابعاد CCD، ۳/۷ میلی‌متر در ۴/۶ میلی‌متر و دارای گسترهٔ دمایی ۳۰- تا ۷۰+ درجهٔ سانتی‌گراد است.

۵. دو روزنهٔ بند برای حذف نورهای سرگردان
 ۶. بخش تنظیم‌کنندهٔ فاصلهٔ آشکار ساز تا عدسی
 ۷. بدنهٔ آلومینیومی
- دو نشانگر هم راستا و موازی با محور اپتیکی و مکانیکی شیدسنج برای موازی کردن موازی‌ساز با خورشید. برای اطمینان از پاسخ‌دهی خطی CCD تورلب، پاسخ آن در شدت‌های مختلف نور در پنج مرحلهٔ زیر اندازه‌گیری می‌شود. در مرحلهٔ اول، از یک سطح صاف و روشن دو تصویر با فاصلهٔ زمانی کم تهیه و در مرحلهٔ دوم، از هر دو تصویر، سطحی به اندازهٔ ۱۰۰×۱۰۰ پیکسل انتخاب و میانگین شدت هر کدام تعیین می‌شود. مرحلهٔ سوم، نسبت دو میانگین شدت در میانگین شدت تصویر اول ضرب و در مرحلهٔ چهارم، شدت تصویر دوم از مقدار به دست آمده در مرحلهٔ سوم کم می‌شود. در مرحلهٔ پنجم، انحراف معیار و واریانس تصویر به دست آمده از مرحلهٔ چهارم محاسبه می‌شود [۱۱]. این پنج مرحله برای شدت‌های مختلف تکرار می‌شود. در شکل ۲، نمودار شدت بر حسب واریانس برای

۱. Solidwork

۲. Zemax



شکل ۴. نمودار لگاریتم شدت بر حسب توده هوا برای تعیین ثابت درجه بندی برای یک روز صاف در بالای کوه گاوازنگ زنجان.

عمق اپتیکی کل را در هر لحظه به دست آورد [۱۲].

برای به دست آوردن ثابت درجه بندی (I_{λ}) از روش لانگلی استفاده می کنیم. در این روش از رابطه (۱) لگاریتم گیری می کنیم.

$$\ln(I_{\lambda}) = \ln(I_{\lambda}) - m\tau_{\lambda} \quad (2)$$

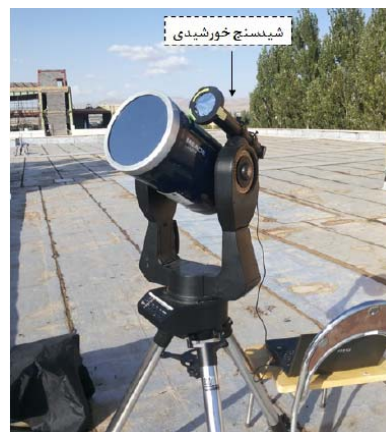
با رسم $\ln(I_{\lambda})$ بر حسب m در شرایطی که τ_{λ} ثابت باشد، می توان با برون یابی در $m = 0$ ثابت درجه بندی به دست آورد. برای ایجاد شرط τ_{λ} ثابت، اندازه گیری باید در منطقه ای انجام شود که بالای لایه مرزی باشد؛ به همین منظور درجه بندی شیدسنج تک کاناله در بالای کوه گاوازنگ زنجان در ارتفاع ۲۲۷۰ متر بالاتر از سطح دریای آزاد، عرض جغرافیایی ۳۶٫۷۴ درجه و طول جغرافیایی ۴۸٫۵۳ درجه در یک روز صاف از طلوع تا غروب خورشید انجام شد. در شکل ۴، لگاریتم شدت تصاویر بر حسب پارامتر میزان هوا برای داده ها ترسیم شده است [۱۲].

پس از درجه بندی شیدسنج خورشیدی تک کاناله در طول موج ۴۴۰ نانومتر، حال می توان برای هر اندازه گیری در هر جایی عمق اپتیکی کل (τ_{λ}) جو زمین را استخراج کرد.

تضعیف نور خورشید در عبور از جو توسط مولکول ها (پراکندگی ریلی)، هواویزها (پراکندگی می) و گازهای جاذب (آب، اوزون و...) موجود در جو اتفاق می افتد. بنابراین τ_{λ} به صورت زیر بیان می شود

$$\tau_{\lambda} = \tau_{\lambda,a} + \tau_{\lambda,R} + \tau_{\lambda,abs} \quad (3)$$

که در آن عمق اپتیکی کل τ_{λ} ، برابر با حاصل جمع عمق اپتیکی ناشی از پراکندگی ریلی $\tau_{\lambda,R}$ ، عمق اپتیکی هواویزها $\tau_{\lambda,a}$ و عمق اپتیکی ناشی از جذب گازهای جاذب $\tau_{\lambda,abs}$ موجود در جو زمین است. برای به دست آوردن عمق اپتیکی



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) دستگاه شیدسنج خورشیدی نصب شده روی پایه تلسکوپ.

CCD تورلر رسم شده است. این نمودار با دقت ۹۸ درصد رفتار خطی CCD در شدت های مختلف را نشان می دهد.

در عمل چون شدت نور مستقیم خورشید زیاد است با وجود صافی تداخلی برای کاهش شدت نور خورشید از یک صافی شدتی مایلر استفاده شد.

پس از طراحی و ساخت، بخش اپتیکی روی پایه تلسکوپ Meade LX100 نصب شد. در شکل ۳ بخش اپتیکی ساخته شده نشان داده شده است.

۳. نظریه کار

طبق قانون بیر-لامبرت شدت نور خورشید که در طول موج λ به سطح زمین می رسد، به خاطر پراکندگی و جذب مولکول های هوا و هواویزها به صورت نمایی کاهش می یابد. رابطه بیر-لامبرت برای طول موج هایی که جذب شدید مولکولی ندارند به صورت زیر است

$$I_{\lambda} = I_{\lambda} \exp(-m\tau_{\lambda}) \quad (1)$$

که $m = (\cos \theta)^{-1}$ توده هوا است و θ زاویه موازی ساز شیدسنج با سرسو است. I_{λ} شدت اندازه گیری شده نور خورشید در طول موج λ ، I_{λ} ثابت درجه بندی یا شدت نور خورشید در پشت جو زمین و τ_{λ} عمق اپتیکی کل در طول موج λ است. بنابراین با اندازه گیری شدت نور خورشید در سطح زمین در یک طول موج و با درجه بندی شیدسنج می توان



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) محل درجه‌بندی واقع در کوه گاوازندگ با ارتفاع ۲۲۷۰ متر، محل شیدسنج خورشیدی CIMEL واقع در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان با ارتفاع ۱۸۰۵ متر و محل اندازه‌گیری داده‌ها در دانشگاه زنجان با ارتفاع ۱۵۹۰ متر.

توصیفی از ناهمسانگردی مولکول‌ها است. n_s ضریب شکست هواست [۱۴]. بنابراین با اندازه‌گیری فشار در محل می‌توانیم عمق اپتیکی ریلی را محاسبه کنیم. با کم کردن عمق اپتیکی ریلی از عمق اپتیکی کل، عمق اپتیکی هواویزها را در هر لحظه خواهیم داشت.

۴. نتایج

پس از طراحی، ساخت و درجه‌بندی شیدسنج خورشیدی چند روز به صورت نمونه داده برداری انجام و نتایج به دست آمده با شیدسنج خورشیدی دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان مقایسه شد. این شیدسنج ساخت شرکت CIMEL مدل ۳۱۸-۲ CE است که در ۵ طول موج ۴۴۰، ۶۷۰، ۸۷۰، ۹۳۶ و ۱۰۲۰ نانومتر از طلوع تا غروب خورشید به صورت خودکار اندازه‌گیری انجام می‌دهد. عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۴۴۰ نانومتر یکی از پارامترهای اندازه‌گیری این شیدسنج است. در شکل ۵، محل درجه‌بندی که در کوه گاوازندگ زنجان با ارتفاع ۲۲۷۰ متر، محل دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان که شیدسنج خورشیدی CIMEL در آن قرار دارد با ارتفاع ۱۸۰۵ و محل اندازه‌گیری شیدسنج تک‌کاناله ساخته شده در دانشگاه زنجان با ارتفاع ۱۵۹۰ متر بر روی نقشه نشان داده شده است. دانشگاه

هواویزها ابتدا باید عمق اپتیکی ریلی و عمق اپتیکی جذب را به دست آوریم. طول موج ۴۴۰ نانومتر در خارج از ناحیه جذب گازهای داخل جو است. پس می‌توان از جمله عمق اپتیکی جذب گازهای جوی صرف نظر کرد. بنابراین تنها با به دست آوردن عمق اپتیکی ریلی که ناشی از پراکندگی ریلی توسط مولکول‌های موجود در جو زمین چون اکسیژن، نیتروژن، دی اکسید کربن و آرگون است؛ عمق اپتیکی هواویزها را به دست آورد [۴ و ۱۳].

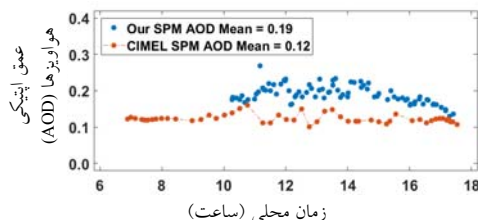
عمق اپتیکی ریلی با تعداد کل مولکول‌ها بر واحد سطح مقطع در ستون جوی بالای محل اندازه‌گیری را متناسب است، که تنها به فشار در محل اندازه‌گیری بستگی دارد، و به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]

$$\tau_{\lambda,R} = \sigma \frac{PA}{m_a g}, \quad (4)$$

σ سطح مقطع پراکندگی بر مولکول، P فشار در محل اندازه‌گیری، A عدد آووگادرو، m_a وزن مولکولی میانگین از هوا که به ترکیب هوا بستگی دارد، g شتاب گرانشی زمین در محل اندازه‌گیری است. سطح مقطع پراکندگی بر مولکول به طول موج و خواص فیزیکی مولکول بستگی دارد. که با رابطه زیر بیان می‌شود

$$\sigma = \frac{24\pi^3 (n_s^2 - 1)^2}{\lambda^4 N_s^2 (n_s^2 + 2)^2} \frac{6 + 3\rho}{6 - 7\rho}, \quad (5)$$

که در آن N_s چگالی مولکولی، ρ عامل واقطنبندی که



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار عمق اپتیکی هواویزها بر حسب زمان محلی برای روز ۱۵ شهریور ۱۳۹۵. نقاط آبی اندازه‌گیری شیدسنج تک‌کاناله ساخته شده در دانشگاه زنجان و نقاط نارنجی نتایج اندازه‌گیری شیدسنج CIMEL واقع در دانشگاه تحصیلات تکمیلی را نشان می‌دهد.

بخش مکانیکی با نرم‌افزار Solidwork و بخش اپتیکی با نرم‌افزار Zemax طراحی و بررسی شد. با شیدسنج ساخته شده یکی از مهم‌ترین پارامترهای اپتیکی هواویزها یعنی عمق اپتیکی ذرات معلق اندازه‌گیری می‌شود. عمق اپتیکی هواویزها نشان‌دهنده میزان ذرات جامد یا مایع معلق در جو است. شیدسنج ساخته شده در بالای کوه گاوازننگ در ارتفاع ۲۲۷۰ متری بالای لایه مرزی برای یک روز صاف استخراج شد. نتایج اندازه‌گیری برای روز ۱۵ شهریور ۱۳۹۵ با اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی اتوماتیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان که ساخت شرکت CIMEL است مقایسه شد. نتایج این دو شیدسنج برای روز اندازه‌گیری دارای ۰/۰۷ اختلاف است که آن هم به دلیل اختلاف ارتفاع ۲۰۰ متری بین دو محل اندازه‌گیری دور از انتظار نیست.

قدردانی

از ایستگاه شیدسنج خورشیدی دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان و شبکه AERONET برای در اختیار گذاشتن داده‌های شیدسنج خورشیدی تشکر می‌کنیم.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی، ساخت و درجه‌بندی شیدسنج خورشیدی تک‌کاناله در طول موج ۴۴۰ نانومتر توضیح داده شده است.

مراجع

3. A S Goudie and N J Middleton, "Desert dust in the Global System", Springer press (2006).
۴. ع بیات، «مطالعه پارامترهای اپتیکی جو زنجان با استفاده از شیدسنج خورشیدی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان (۱۳۸۷).
1. K Y Kondratyev, L S Ivlev, V F Krapivin, and C A Varotsos, "Atmospheric Aerosol Properties: Formation, Processes and Impacts", Springer-Praxis (2006).
2. O Dubovik, B Holben, T F Eck, A Smirnov, Y J Kaufman, M D King, D Tanre, and I Slutsker, *Journal of Atmospheric Sciences* **59** (2002) 590.

10. A Bayat and S Mashhadizadeh Maleki, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (2018).
11. http://www.mirametrics.com/tech_note_ccdgain.htm.
12. W Zdunkowski, T Trautmann, and A Bott, "Radiation in the Atmosphere, A Course in Theoretical Meteorology", Cambridge University (2007).
13. B N Holben, T F Eck, I Slutsker, D Tanré, J P Buis, A Setzer, E Vermote, J A Reagan, Y J Kaufman, T Nakajima, F Lavenue, I Jankowiak, and A Smirnov, *Remote Sensing of Environment*, **66** (1998) 1.
14. B A Bodhaine, N B Wood, E G Dutton, and J R Slusser, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **16** (1999) 1854.
۵. ع بیات، «استخراج تابع فاز قطبیده هواویزها/ازداده‌های شیدسنج خورشیدی»، پایان‌نامه دکتري، دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان (۱۳۹۲).
6. A Bayat, A Masoumi, and H R Khalesifard, *Atmos. Meas. Tech.* **4** (2011) 857.
7. A Masoumi, H R Khalesifard, A Bayat, and R Moradhaseli, *Atmos. Res.* **120–121** (2013) 343.
8. M Gharibzadeh, K Alam, Y Abedini, A A Bidokhti, and A Masoumi, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **164** (2017) 268.
9. A Bayat, A Masoumi, and H R Khalesifard, *Atmos. Meas. Tech.* **6** (2013) 2659.