



برآورد تابش کل لحظه‌ای طول موج کوتاه خورشید با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده

مودیس (مطالعه موردی: مناطق مرکزی ایران)

اسماعیل تازیکی^۱، عبدالعلی رضایی^{۲*}، علی آبکار^۳، سید کاظم علوی پناه^۴، زهرا جهانتاب^۵، علیرضا رحمتی^۶

۱. کارشناس ارشد سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه کارتوگرافی، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی دکتری سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه کارتوگرافی، دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه سنجنش از دور، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۴. استاد گروه کارتوگرافی، دانشگاه تهران

۵. کارشناس ارشد سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه محیط زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۶. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه کارتوگرافی، دانشگاه تهران

مشخصات مقاله

چکیده

پیشینه مقاله:

دریافت: ۵ خرداد ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۹ مهر ۱۳۹۳

دسترسی اینترنتی: ۲۰ خرداد ۱۳۹۴

واژه‌های کلیدی:

انرژی‌های نو

تابش خورشیدی

سنجنش از دور

سنجنده مودیس

استفاده از انرژی‌های نو به ویژه تابش امروزه به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی محسوب می‌شود. لذا مطالعه انرژی خورشیدی از اهمیت زیادی برخوردار است. با این حال که خورشید یک منبع عظیم انرژی است، اما برون داد انرژی آن در سطح زمین به طور یکسان عمل نمی‌کند، به این صورت که میزان تابش انرژی خورشیدی در نقاط مختلف جهان متغیر بوده و در عرض‌های جغرافیایی پایین بیشتر است. بنابراین شناخت مکان‌های مناسب جهت بکارگیری انرژی خورشیدی الزامی می‌باشد. بهترین و دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری این پارامتر استفاده از دستگاه‌های تابش سنجی می‌باشد، اما امکان استفاده از این ایستگاه‌ها به دلیل شرایط مختلف طبیعی و اقتصادی وجود ندارد. از طرف دیگر این دستگاه‌ها مقدار تابش را به صوت نقطه‌ای تا شعاع محدودی برآورد می‌کنند. در سال‌های اخیر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تا حدودی این مشکلات برطرف گردیده است. لذا در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و با استفاده از روش تبدیل آلبدوی باریک باند به پهن باند، میزان تابش کل لحظه‌ای موج کوتاه خورشیدی در مناطق مرکزی ایران متشکل از استان‌های قم، اصفهان، تهران و سمنان برآورد شده است. به منظور تحلیل نتایج به دست آمده از سه شاخص آماری ضریب تبیین، جذر میانگین مربع خطا و مقدار متوسط خطا استفاده شد. در نهایت میزان جذر میانگین مربع خطا حدود ۴۲ وات بر متر مربع و میزان متوسط خطا در حدود ۴۰/۷۵ وات بر متر مربع به دست آمد که بیانگر دقت بالای روش مورد استفاده در برآورد تابش می‌باشد.

* rezai.al.65@gmail.com: پست الکترونیکی مسئول مکاتبات

مقدمه

تابش خورشید یکی از متغیرهای مهم اقلیمی است و انرژی لازم را برای همه پدیده‌های سطح زمین فراهم می‌کند، به طوری که انرژی حاصل از تابش خورشید به زمین منتقل شده و گرمای آن باعث ایجاد فرآیندهای بسیاری بر سطح زمین می‌شود (۳). امروزه استفاده از انرژی‌های نو به ویژه تابش خورشیدی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی در هر کشوری به حساب می‌آید (۵). گرچه خورشید یک منبع عظیم انرژی است اما برون‌داد انرژی آن در سطح زمین به طور یکسان عمل نمی‌کند، به طوری که میزان تابش انرژی خورشیدی در نقاط مختلف جهان متغیر بوده و در مناطق با عرض‌های جغرافیایی پایین بیشترین مقدار را داراست. کشور ایران نیز در نواحی پرتابش واقع است و مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از تجهیزات خورشیدی در ایران مناسب بوده و می‌تواند بخشی از انرژی مورد نیاز کشور را تأمین نماید.

میزان تابش خورشیدی در ایران (حدود $kWh/m^2/yr$ ۲۰۰۰) یکی از بزرگ‌ترین مقادیر در جهان است. به عنوان مثال در آلمان، میزان تابش خورشیدی ($kWh/m^2/yr$ ۱۰۰۰ - ۸۰۰) کمتر از نصف متوسط آن در کشور ایران است. با توجه به مساحت ایران (حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع)، کل مقدار تابش در ایران حدود $۳/۳$ میلیون تراوات ساعت در سال می‌باشد که سیزده برابر کل انرژی مصرفی در ایران است (۴).

بنابراین شناخت مکان‌های مناسب جهت بکارگیری انرژی‌های نو همچون انرژی خورشیدی الزامی می‌باشد. بیابان‌های ایران از جمله نقاطی هستند که دارای پتانسیل انرژی خورشیدی بالایی می‌باشند (۱۰).

ایران در صورت تجهیز مساحت بیابانی خود به سامانه‌های دریافت انرژی تابشی می‌تواند انرژی مورد نیاز بخش‌های گسترده‌ای از منطقه را نیز تأمین و در زمینه صدور انرژی برق فعال شود. با توجه به محدودیت منابع فسیلی و افزایش روزافزون تقاضای انرژی، بکارگیری تمهیداتی جهت بهره‌برداری بهینه از منابع سرشار انرژی خورشیدی در کشور امری ضروری به نظر می‌رسد، برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری

بهینه از انرژی خورشیدی نیازمند برآورد پتانسیل آن در مناطق مختلف کشور می‌باشد (۴). بنابراین شناخت تابش خورشیدی رسیده به زمین، جهت کاربردهای انرژی خورشیدی لازم است. در گذشته به منظور انجام تحقیقات و مطالعات پدیده‌های سطحی زمین و جو، مجبور بودند که اطلاعات و مشاهدات محلی را جمع‌آوری کنند که به علت گستردگی و نیز تغییرات برخی از پارامترها به دلیل طبیعت دینامیکی آن‌ها، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر بود. علاوه بر آن دستگاه‌های مربوطه به علت حساس بودن، نیاز به مراقبت‌های زیاد دارند و باید مرتباً واسنجی شوند. از طرفی دیگر در آمار و اطلاعات موجود این گونه ایستگاه‌ها نیز خلأهای آماری بسیاری دیده می‌شود؛ بنابراین نیاز به برآورد تابش در مناطق فاقد داده، با توجه به کمبود تعداد ایستگاه‌های تابش‌سنجی وجود دارد (۲).

بدین جهت بشر همواره سعی در یافتن روش‌های آسان و سریع‌تر داشته است. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای استخراج اطلاعات مورد نیاز از جمله این اهداف بوده است. لذا در سال‌های اخیر مدل‌های سنجش از دوری که ورودی آن‌ها از تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید برای تخمین برخی از پدیده‌ها، از جمله تابش خورشید استفاده می‌شود. تصاویر ماهواره‌ای این مزیت را دارند که سطح وسیعی را پوشش می‌دهند و تغییرات مکانی پدیده‌ها در آن قابل بررسی است. همچنین به علت پوشش زمانی و مکانی بیشتر، دقت بالاتری در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی (به دلیل این که اندازه‌گیری‌های زمینی به صورت نقطه‌ای انجام می‌شود و تعمیم دادن این نقاط به سطح با استفاده از روش‌های درونیابی دارای خطای بیشتری در مقایسه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای که به صورت پیوسته است، می‌باشد) دارند (۱۲). جمع‌آوری داده‌های ماهواره‌ای نیاز کمتری به عملیات نقشه‌برداری و کنترل زمینی دارند؛ بنابراین هزینه جمع‌آوری داده‌ها در واحد سطح به شدت کاهش می‌یابد (۱). همچنین با توجه به کمبود ایستگاه‌های دارای ادوات تابش‌سنجی در کشور و همچنین وجود خلأهای آماری در ایستگاه‌های تشعشع‌سنجی نیاز به انجام و ادامه مطالعات با این موضوع کاملاً ضروری است.

بیشتر و همکاران (۱۱) تابش لحظه‌ای در مناطق بزرگ را برای روزهای صاف و بدون ابر با استفاده از داده‌های سنجنش از دور تخمین زدند. آن‌ها تلاش کردند الگوریتمی را توسعه دهند که بیشتر از داده‌های سنجنش از دوری همانند استفاده از تولیدات مختلف زمینی و اتمسفری سنجنده مودیس (MODIS) ماهواره ترا استفاده کند و نیاز کمتری به داده‌های زمینی باشد.

ریو و همکاران (۲۰) با استفاده از تولیدات مختلف سنجنده مودیس (اتمسفری و زمینی) مؤلفه‌های مختلف تابش را در شرایط آسمان صاف در مناطق زراعی و جنگل‌های برگ‌ریز در کشور کره تخمین زدند. قابلیت اطمینان این تخمین‌ها و خطاهای آن‌ها با استفاده از داده‌های زمینی در مدت ۴۱ روز صاف برای مناطق زراعی و ۲۶ روز صاف برای مناطق جنگلی ارزیابی شد. میزان RMSE در مناطق زراعی در حدود ۲۰ وات بر متر مربع برای ماهواره ترا و آکوا برآورد شد، در حالی که در مناطق جنگلی میزان RMSE در حدود ۶۵ وات بر متر مربع بود.

وانگ و پینکر (۲۴) مدل جدیدی را برای اندازه‌گیری تابش موج کوتاه خورشیدی با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس در مقیاس جهانی ارائه دادند. این مدل تمام اجزای اصلی تشکیل‌دهنده اتمسفر، خصوصیات ابرها و همچنین تغییرات شعاع مؤثر ذرات ابر را در بر می‌گیرد. ساختارهای چند لایه برای اثرات ارتفاع سطح و برای توزیع عمودی شار تابشی را حساب می‌کند. شار طیفی همانند شار فعال فتوستیزی و تابش مادون قرمز نزدیک می‌تواند تخمین زده شوند. این مدل با تولیدات سنجنده مودیس (هم آکوا و هم ترا) در دوره سه ساله از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ و در مقیاس جهانی اجرا شد. شارهای سطحی استخراج شده با استفاده از ایستگاه اندازه‌گیری تابش مقایسه گردیدند.

نتایج نشان داد که شار تابشی روزانه تخمین زده شده دارای ضریب همبستگی بزرگ‌تر از ۰/۹۶ و RMSE کمتر از ۰/۱۸ و انحراف نسبی (bias) بین صفر تا ۶٪ سازگاری دارد. همچنین وانگ و لیانگ (۲۵) مدل‌های خطی و غیرخطی جدیدی را با استفاده از یک روش هیبرید برای استخراج طول

تاکنون مطالعات زیادی در سطح جهان و ایران درباره برآورد تابش‌های مختلف خورشید با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است که در ادامه تعدادی از این مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

لاین و همکاران (۱۵) مدل فیزیکی برای تخمین تابش خورشیدی لحظه‌ای و روزانه بر پایه داده‌های سنجنده‌ی AVHRR ماهواره NOAA و داده‌های ۶ ایستگاه اندازه‌گیری زمینی تابش خورشیدی در فنلاند ارائه دادند. از روی مقایسه لحظه‌ای تخمین‌های ماهواره‌ای با داده‌های اندازه‌گیری میانگین ۱۵ دقیقه‌ای تابش خورشید در شرایط آسمان صاف، ضریب همبستگی ۰/۹۷ و خطای استاندارد ۰/۸٪ و تحت شرایط آسمان ابری، ضریب همبستگی بین ۰/۷۹ تا ۰/۸۳ و خطای استاندارد بین ۲۷ تا ۳۹٪ به دست آمد. برای تخمین‌های روزانه، ضریب همبستگی به طور میانگین ۰/۹۵ و خطای استاندارد ۰/۷٪ در شرایط آسمان صاف و خطای استاندارد ۱۱ تا ۱۷٪ در شرایط ابری به دست آمد.

تووار و بالدسانو (۲۳) از مدل آماری برای تعیین تابش خورشیدی با استفاده از سنجنده AVHRR ماهواره NOAA برای ۱۱ ماه متوالی از فوریه ۱۹۹۸ در کاتالونیای اسپانیا استفاده نمودند، ضریب همبستگی بین داده‌های تخمین زده شده به وسیله این مدل و داده‌های ایستگاه اندازه‌گیری، مقداری بالاتر از ۰/۹۸ را نشان داد و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۹/۶ تا ۱۵/۸٪ و اشتباه (bias) ۱/۳ تا ۹/۵٪ به دست آمد.

مفتی و همکاران (۱۷)، مدل جدیدی را برای تخمین تابش خورشیدی بر اساس طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای ارائه دادند. این مدل بر اساس تصاویر ماهواره‌ای هواشناسی و اندازه‌گیری زمینی تابش خورشیدی در موقعیت‌های مختلف در فرانسه در سال‌های بین ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۵ ساخته شد. برای هر موقعیت شاخص پوشش ابر و شاخص روشنایی محاسبه شده و ۳ معادله رگرسیون برای ارتباط شاخص پوشش ابر و شاخص روشنایی برای آسمان‌های صاف، نسبتاً ابری و کاملاً ابری تهیه گردید. این مدل بازده خوبی از تخمین تابش خورشیدی برای موقعیت‌های مختلف به دست آورد. بطوری که دارای خطای استاندارد ۱۲٪ تا ۳۲٪ بود.

روزانه - ماهانه GSR را با دقت تفکیک مکانی ۵ کیلومتر با دقت بالا تخمین بزنند.

لی و همکاران (۱۶) طرح ترکیب داده‌ها را برای تخمین شار تابش خالص خورشید بر اساس مدل زمین مشترک (COLM) با استفاده از الگوریتم‌های فیلتر کالمن (EnKF) و فیلتر ذرات (PF) برای بهبود پیش‌بینی شار تابش خالص سطحی در فلات تبت توسعه دادند.

نتایج نشان داد که این مدل به آسانی قابل انجام است و منجر به بهبود پیش‌بینی‌ها برای تخمین دمای سطح و شار تابش خالص می‌شود. آن‌ها همچنین ذکر کردند که سطوح مختلف و دقت تولیدات LST مودیس نیز تأثیر مهمی بر نتایج ادغام دارد.

علی‌حسینی (۷) مدل هارگریوز و سامانی را که با استفاده از اختلاف دمای بیشینه و کمینه روزانه هوا میزان تابش خورشید را برآورد می‌کند، طوری واسنجی کردند که بتوان به جای داده‌های دمای بیشینه و کمینه روزانه ایستگاه‌های هواشناسی، از داده‌های دمای سطح زمین در روز و شب سنجنده مودیس استفاده کردند.

نتایج نشان داد که داده‌های دمای سطح زمین در روز و شب سنجنده مودیس به ترتیب همبستگی خوبی با دمای بیشینه و کمینه هواشناسی دارند و می‌توان در مدل هارگریوز به جای استفاده از داده‌های دمای بیشینه و کمینه ایستگاه‌های هواشناسی از داده‌های ماهواره‌ای استفاده کرد.

با بررسی این مطالعات مشخص شد که بیشتر مطالعات برآورد تابش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از یک نوع مدل برای برآورد تابش‌های مختلف خورشید استفاده می‌کنند که در اکثر این مدل‌ها علاوه بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ها از داده‌های کمکی دیگر نظیر داده‌های هواشناسی یا حتی تصاویر ماهواره‌های دیگر نیز استفاده گردیده است.

بنابراین هدف از این تحقیق برآورد تابش طول موج کوتاه خورشید با استفاده از سنجنده مودیس ماهواره ترا در مناطق مرکزی و بیابانی کشور ایران بدون استفاده از هر گونه داده کمکی هواشناسی یا ماهواره‌های دیگر می‌باشد که ادامه این مدل به طور کامل تشریح می‌شود.

موج‌های بلند ورودی (LWDN) در شرایط آسمان صاف با استفاده از تصاویر مودیس توسعه دادند. این روش هیبرید بر اساس شبیه‌سازی انتقال تابش و آنالیزهای آماری می‌باشد.

کیم و لیانگ (۱۳) یک الگوریتم هیبرید برای تخمین میزان تابش خالص با استفاده از تصاویر مودیس هم در شرایط ابری و هم در شرایط آسمان صاف بدون نیاز به داده‌های کمکی ارائه دادند.

این الگوریتم با استفاده از داده‌های زمینی در هفت ایستگاه هواشناسی SURFRAD ایالات متحده اعتبارسنجی شد. تابش خالص لحظه‌ای که به وسیله این روش تخمین زده شده بود با داده‌های ISCCP (پروژه بین‌المللی هواشناسی ابری GEWEX/SRB، آزمایش چرخه آب و انرژی جهانی/ ذخیره‌ی تابش سطحی) و دیگر روش‌ها نیز مقایسه شد. نتایج نشان داد که این الگوریتم می‌تواند تابش خالصی در قدرت تفکیک یک کیلومتری با دقت بهتر تولید کند؛ و تابش خالص روزانه نیز در قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر با استفاده از تابش خالص لحظه‌ای تخمین زده شد. در نتیجه داده‌های با قدرت تفکیک بهتر با توالی خاصی از توزیع مجدد انرژی موجود در سطح زمین به دست آمدند.

کین و همکاران (۱۹) با استفاده از تصاویر مودیس و تولیدات TRMM اقدام به تخمین ماهانه میانگین تابش کل (GSR) روزانه خورشید در بزرگ‌ترین و مرتفع‌ترین فلات دنیا یعنی فلات تبت پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی یک رابطه ریاضی میان تابش جهانی خورشید اندازه‌گیری شده در چین و تعدادی از محصولات سنجش از دوری موجود برقرار کردند.

این محصولات شامل میانگین دمای ماهانه سطح زمین ماهواره مودیس، تعداد روزهای ماه که در دمای سطح زمین بازیابی شده است، شاخص افزایش نمو گیاهی مودیس و بارندگی ماهیانه ماهواره TRMM بودند و برای اعتبارسنجی تابش خورشیدی تخمین زده شده از اندازه‌گیری‌های ۱۲ ایستگاه زمینی استفاده شد.

نتایج اعتبارسنجی نشان داد که روش شبکه عصبی مصنوعی که در این مطالعه استفاده شده است، می‌تواند میانگین

مواد و روش‌ها

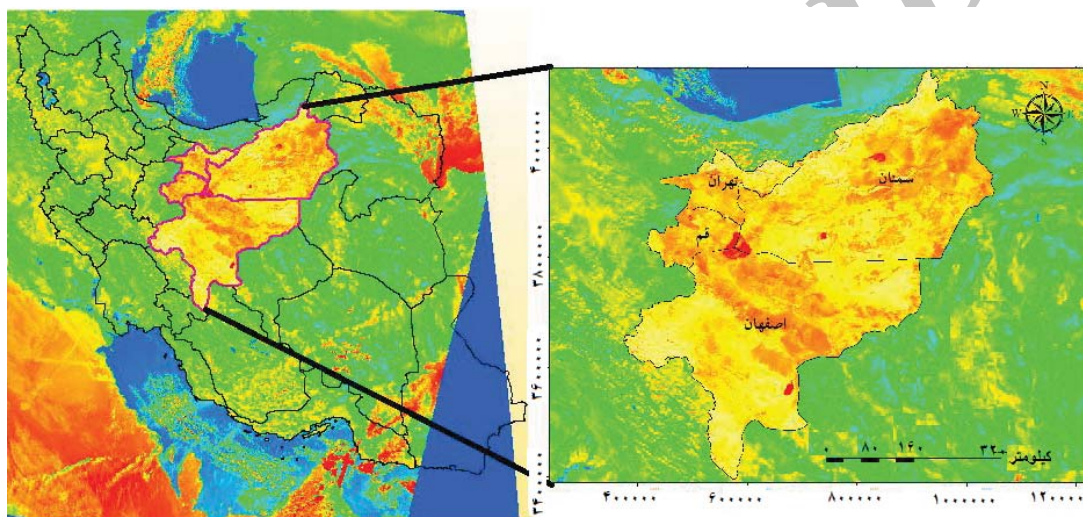
منطقه مورد مطالعه

استان‌های سمنان، تهران، قم و اصفهان می‌باشد که بین طول جغرافیایی $29^{\circ} 39' 55''$ تا $29^{\circ} 53' 52''$ درجه شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 19' 36''$ تا $30^{\circ} 40' 44''$ شمالی قرار دارد. مساحت این منطقه حدود ۲۳۰ هزار کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۱۳۴۵ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۱).

قسمت اعظم منطقه مورد مطالعه جزء مناطق کویری است که از طرف شمال رشته‌کوه‌های البرز و از طرف غرب رشته‌کوه زاگرس منطقه مورد مطالعه را احاطه کرده‌اند و در طبقه‌بندی اقلیمی کوپن جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار می‌گیرد.

ایران از نظر مقدار دریافت انرژی تابشی خورشید در شمار بهترین کشورها محسوب می‌شود. به طوری که متوسط تابش جهانی برای ایران حدود $19/23 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ است ($5/3 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$) که در مناطق مرکزی ایران این مقدار به بیش از $7/7$ ساعت در روز می‌رسد (بیش از ۲۸۰۰ ساعت در سال) (۴).

منطقه مورد مطالعه قسمت‌های مرکزی کشور ایران شامل



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

روش تحقیق

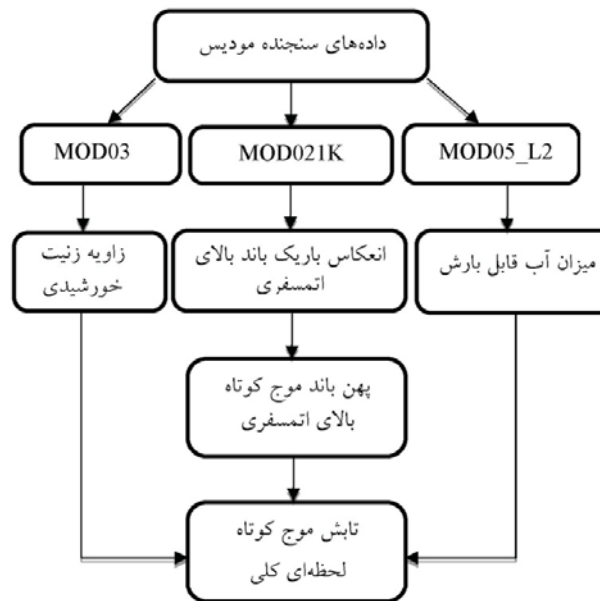
به منظور برآورد تابش طول موج کوتاه خورشید مراحل تحقیق مطابق (شکل ۲) انجام گرفت. دامنه مؤثر تابش‌های خورشیدی از نظر طول موج بین $0/25$ تا 3 میکرون است که این تابش‌ها را به صورت کلی تابش‌های با طول موج کوتاه می‌گویند. لذا هنگامی که عنوان می‌شود تابش‌های مستقیم خورشیدی طول موج کوتاه دارند، سخنی به گزاف گفته نشده است (۸). بنابراین برای مقایسه طول موج‌های تابش شده از خورشید و زمین غالباً از عبارات موج کوتاه برای تابش خورشیدی و موج بلند برای تابش زمین استفاده می‌شود. که در شکل ۳ محدوده این امواج مشخص شده است.

داده‌های مورد استفاده

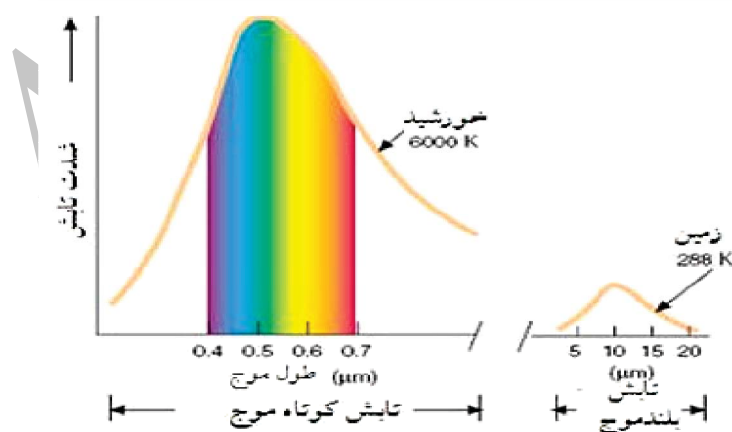
یکی از نکاتی که در انتخاب سنجنده به منظور برآورد پدیده‌های اقلیمی باید در نظر گرفت این است که تصاویر مذکور باید دارای قدرت تفکیک زمانی مطلوبی باشند که از این سنجنده‌ها می‌توان به AVHRR ماهواره نوا، CERES و MODIS ماهواره ترا را نام برد. ولی به دلیل مزیت‌هایی که سنجنده مودیس نسبت به دو سنجنده دیگر دارد شامل به روز بودن این تصاویر، دارای چندین قدرت تفکیک مکانی، دارای توان قدرت تفکیک طیفی (۳۶ باند) و رادیومتری (۱۲ بیتی) در کنار رایگان بودن این تصاویر (۶)، از این سنجنده در این تحقیق استفاده گردید (جدول ۱).

جدول ۱. خصوصیات مودیس و داده‌های زمینی مورد استفاده

حای مختصات زمینی، ارتفاع زمینی، زاویه زینت و آزیموت خورشید و ماهواره برای هر پیکسل یک کیلومتری تصاویر مودیس	MOD03	
حای اطلاعات مربوط به رادیانس و انعکاس بالای جو ۷ باند اول سنجنده مودیس که به صورت پیکسل‌های یک کیلومتری تولید شده‌اند.	MOD21KM	سنجنده مودیس
داده‌های آب قابل بارش از مقدار بخار آب در محدوده مادون قرمز نزدیک	MOD05_L2	
داده‌های تابش کلی لحظه‌ای با فواصل ۱۰ دقیقه		داده‌های زمینی



شکل ۲. مراحل انجام تحقیق



شکل ۳. محدوده طول موج کوتاه و طول موج بلند

طول موج بلند زمینی است. بنابراین با شناسایی این مقدار انرژی می‌توان برای کاربردهای آن برنامه‌ریزی نمود. در این

شکل ۳ نشان می‌دهد که تابش خورشید از نوع امواج با طول موج کوتاه می‌باشد که شدت آن نیز چندین برابر تابش

مربوط به معادله خط (شیب خط و عرض از مبدأ) که از رابطه‌های ۴ و ۵ به دست آمد.

$$a_s(\mu, w, r) = a' - \beta'r \quad [3]$$

$$[4]$$

$$a = 1 - a_1\mu^{-1} - a_2\mu^{-x} - (1' - \exp(-\mu))(a_3 + a_4w^y)\mu^{-1}$$

$$\beta = (1 + a'_s + a_6 \ln \mu + a_7w^z) \quad [5]$$

که در این رابطه‌ها؛ μ کسینوس زاویه زنیت خورشید، w میزان آب قابل بارش در محدوده مادون قرمز نزدیک، $a_1 - a_7$ مقادیر ثابت برای سطوح مختلف، X, Y, Z ضرایب ثابتی هستند که در مورد سطوح مختلف این ضرایب فرق می‌کنند و می‌توان با استفاده از جدول ۲ این ضرایب را برای مناطق خشکی، آبی و برفی به دست آورد.

جدول ۲. مقادیر ثابت برای سطوح مختلف زمینی (۲۱)

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	x	y	Z	نوع سطح
-۰/۰۱۱	۰/۱۷۹	-۰/۹۸	۰/۶۲۹	-۰/۷۰۱	۰/۰۹	۰/۸۴۶	۰/۴۷۸	۰/۰۵۲	-۰/۰۲	زمین
-۰/۰۰۳	۰/۱۶۶	-۰/۷۷۴	۰/۷۳۳	-۰/۵۱۱	۰/۰۵۹	۰/۶۳۷	۰/۳۴۲	۰/۰۶۷	-۰/۰۳۴	آب
-۰/۰۱۱	۰/۱۶۳	-۰/۶۴۸	۰/۶۳۱	-۰/۸۶۷	-۰/۰۱۳	۰/۹۲۷	۰/۵۱	۰/۰۶	۰/۰۱۸	برف-یخ

زاویه آزیموت نسبی، i شماره باند سنجنده مودیس و $E_{sun,band_i}$ میانگین رادیانس خورشید در اتمسفر خارجی.

جدول ۳. مقادیر ESUN و Cb مربوط به هر کدام از باندهای

سنجنده مودیس (۲۲)

باند	C _b	ESUN
۱	۰/۲۶۲	۱۵۹۶
۲	۰/۳۹۷	۹۷۴/۷
۳	۰/۶۷۹	۲۰۱۷
۴	۰/۳۴۳	۱۸۵۰
۵	۰/۶۸	۴۶۳/۱
۶	۰/۶۳۹	۲۳۲/۹
۷	-۰/۴۶۲	۹۲/۶۷

تحقیق با استفاده از رابطه ۱ تابش خورشید برآورد گردید (۲).

$$R_s^\downarrow = \frac{a_s E_0 \cos(\theta_s)}{(1-a)d} \quad [1]$$

در این رابطه R_s^\downarrow تابش کل طول موج کوتاه خورشید، E_0 ثابت خورشیدی برابر با ۱۳۶۷ وات بر متر مربع، θ_s زاویه زنیت خورشیدی، d فاصله زمین تا خورشید بر اساس واحد نجومی که بستگی به روز سال دارد (Julian day) و با استفاده از رابطه ۲ تعیین گردید.

$$d = 1 + 0.033 \cos\left(DOY \frac{2\pi}{365}\right) \quad [2]$$

در این رابطه؛ DOY شماره روز سال است. مقدار زاویه داخل پراتز بر حسب رادیان می‌باشد. مقدار α_s به زاویه زنیت خورشید، میزان آب قابل بارش و آلودگی بالای جو باندهای سنجنده بستگی دارد و از رابطه خطی ۳ محاسبه شد. ضرایب

میزان انعکاس در هر یک از ۷ باند اول سنجنده مودیس (r) با استفاده از رابطه ۶ در این رابطه ρ_i انعکاس بالای جو مربوط به هر باند از سنجنده مودیس با استفاده از رابطه ۷ محاسبه گردید.

$$r = \sum_{b=1}^7 [C_{band} \cdot \rho_i] \quad [6]$$

$$\rho_i(\mu, \mu_v, \theta) = \frac{\pi L_i(\mu, \mu_v, \theta) d^2}{\mu E_{sun,band_i}} \quad [7]$$

در این رابطه‌ها؛ ρ_i بازتاب طیفی، d فاصله زمین تا خورشید در واحد نجومی، L_i تابش طیفی در سنجنده، μ کسینوس زاویه زنیت خورشید، μ_v کسینوس زاویه زنیت دید،

می‌شود. اول، بازتاب شدید در بخش مرئی و باند (۴) با طول موج ۵۴۵-۵۶۵ نانومتر و دوم، بازتاب کم در مادون قرمز یا باند ۶ با طول موج ۱۶۵۲-۱۶۲۸ نانومتر (۱۴) که با استفاده از این دو ویژگی شاخصی به نام شاخص NDSI به وجود آمده است که در این تحقیق به کمک این شاخص ابتدا مناطق خشکی از مناطق برفی جدا گردیدند.

$$NDSI = \frac{band\ 4 - band\ 6}{band\ 4 + band\ 6} \quad [10]$$

شاخص NDSI بین ۰ و ۱ متغیر می‌باشد. در این رابطه هنگامی که NDSI بزرگ‌تر و یا مساوی ۰/۴ باشد به عنوان پیکسل برفی شناخته می‌شود و در صورتی که کمتر از ۰/۴ باشد به عنوان پیکسل عاری از برف شناخته می‌شود. نکته قابل توجه اینکه این شاخص به میزان رطوبت حساس است، به گونه‌ای که با افزایش رطوبت عدد فوق به یک نزدیک‌تر می‌شود، یعنی به همراه مناطق برفی مناطق رطوبتی نیز جدا می‌شوند. بنابراین باید مناطق رطوبتی از مناطق برفی جدا گردند. برای همین منظور با استفاده از نرم‌افزار متلب ۲۰۱۳ اقدام به پیاده‌سازی رابطه ۱۱ گردید.

$$\begin{cases} Snow : NDSI > 0.4 \quad and \quad band\ 2 > 0.11 \\ Water : NDSI > 0.4 \quad and \quad band\ 2 < 0.11 \\ Land : NDSI < 0.4 \end{cases} \quad [11]$$

نتایج

در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و با استفاده از روش تبدیل آلبدوی باریک باند به پهن باند، تابش کل طول موج کوتاه لحظه‌ای در مناطق مرکزی کشور ایران شامل استان‌های تهران، سمنان، قم و اصفهان به صورت مستقیم برآورد گردید. نتایج جداسازی مناطق رطوبتی و خشکی در شکل ۴ و نتایج میزان آلبدوی بالای جو در شکل ۵ آورده شده است.

به منظور برآورد آلبدوی سطح از رابطه زیر استفاده گردید (۱۸).

$$a = \frac{r - a_a}{\tau_{bb}^2} \quad [8]$$

در این رابطه؛ r میزان آلبدوی باریک باند TOA می‌باشد که از رابطه ۶ محاسبه شد. a_a آلبدوی معدل تابش مسیر بین ۰/۲۵ تا ۰/۰۴ قرار دارد، ولی معمولاً مقدار ۰/۰۳ در نظر گرفته می‌شود. τ_{bb}^2 ضریب شفافیت اتمسفری می‌باشد که به ارتفاع بستگی دارد.

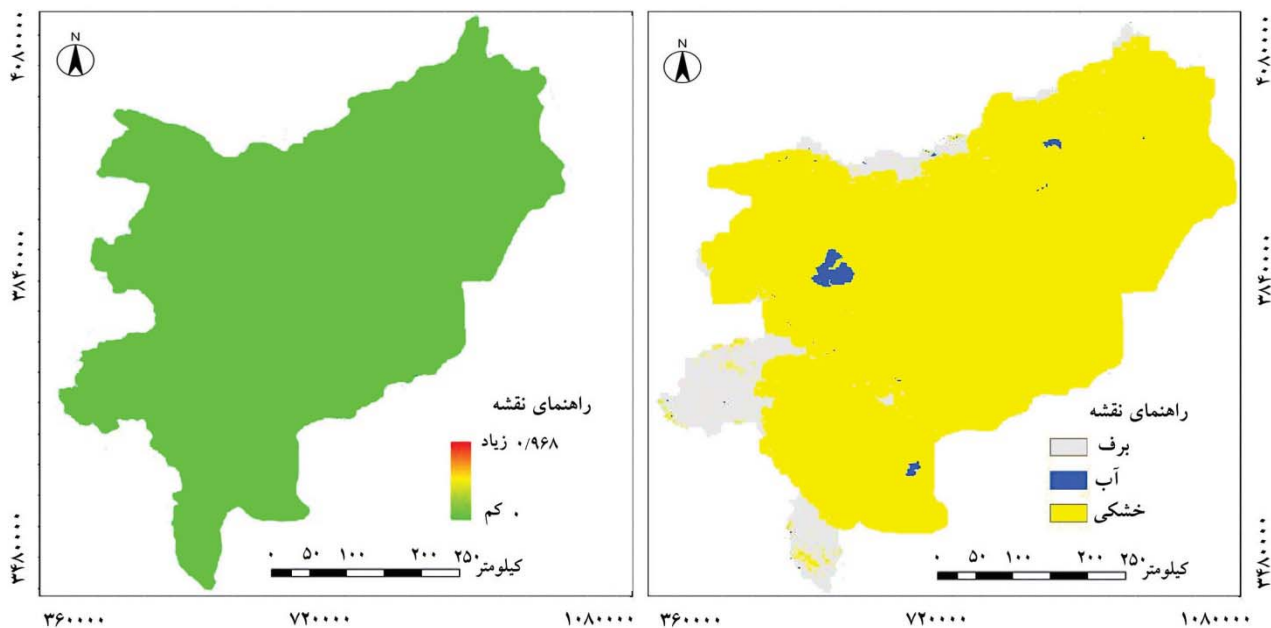
$$\tau_{bb} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad [9]$$

داده‌های تصاویر مودیس در بعضی موارد دارای نوار نوار شدگی می‌باشند که این خطا معمولاً در اثر عدم عملکرد یکسان آشکارسازهای یک سنجنده به وجود می‌آید.

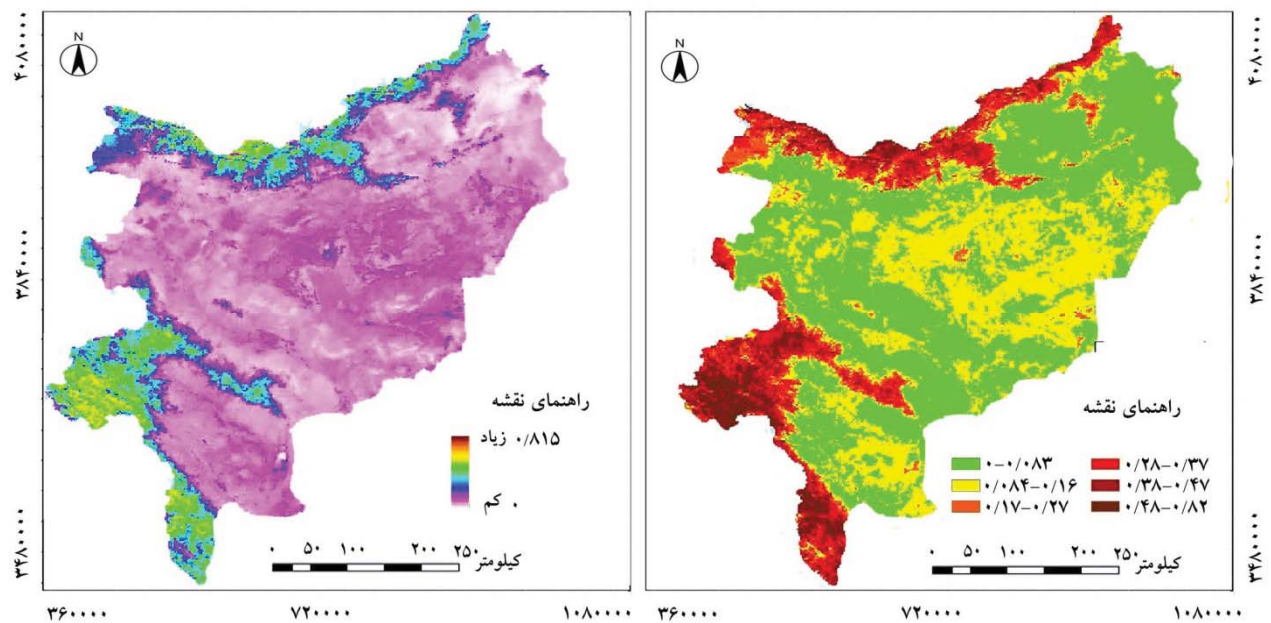
در این پژوهش داده‌های MOD05 و همچنین داده‌های باند ۵ مربوط به MOD021KM دارای چنین خطاهایی می‌باشند. به همین منظور با کمک نرم‌افزار ENVI® 4.8 این خطوط شناسایی و اصلاح گردیدند. بعد از اینکه تصحیح رادیومتریکی انجام گردید اقدام به تصحیح هندسی گردید که تصحیح هندسی تصاویر با قدرت تفکیکی مکانی پایین مثل MODIS کار بسیار مشکلی است. به علت اینکه یافتن نقاط برداشت شده زمینی بر روی تصویر امکان‌پذیر نیست (۹). به همین منظور این نوع تصاویر با استفاده از پارامترهای مداری که در محصولات سنجنده مودیس به صورت پیش‌فرض وجود دارد تصحیح هندسی شدند.

بعد از انجام تصحیحات لازم بر روی تصاویر خام اولیه در مرحله بعد اقدام به محاسبه تابش لحظه‌ای طول موج کوتاه خورشید گردید.

اولین قدم در این بخش با توجه به رابطه ۱۰ نیاز است که مناطق خشکی و آبی و برفی از یکدیگر جدا شوند. در مقایسه با دیگر پوشش‌های سطحی زمین، برف با دو ویژگی متمایز



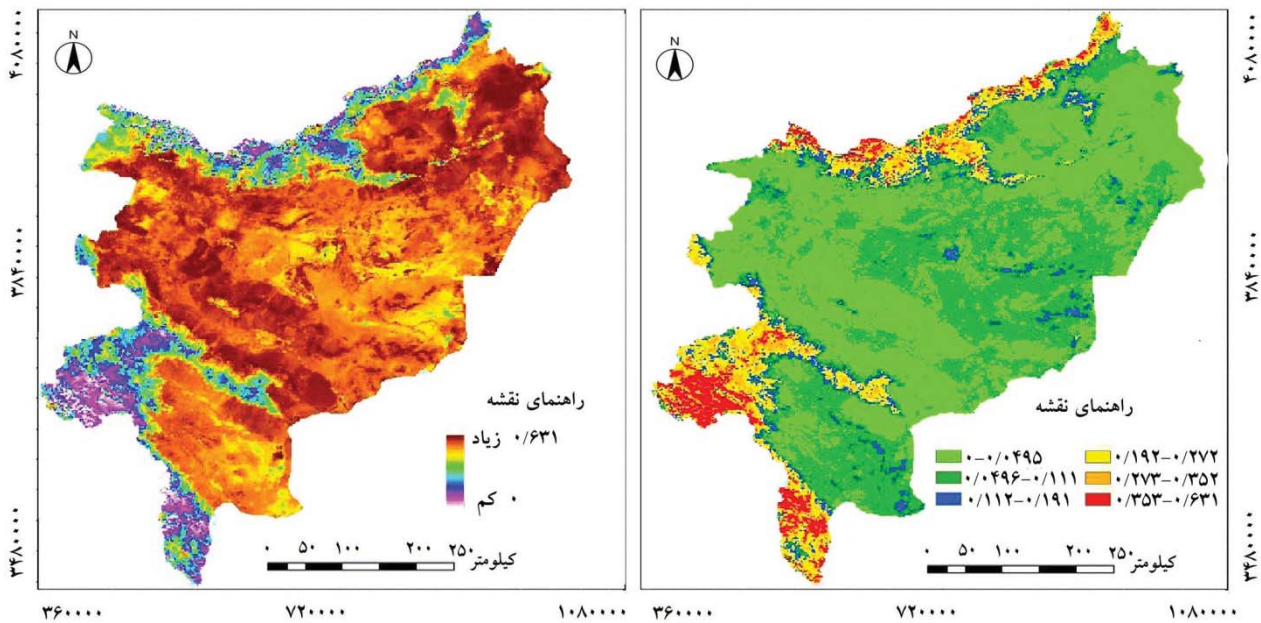
شکل ۴. جداسازی برف، آب و خشکی از یکدیگر



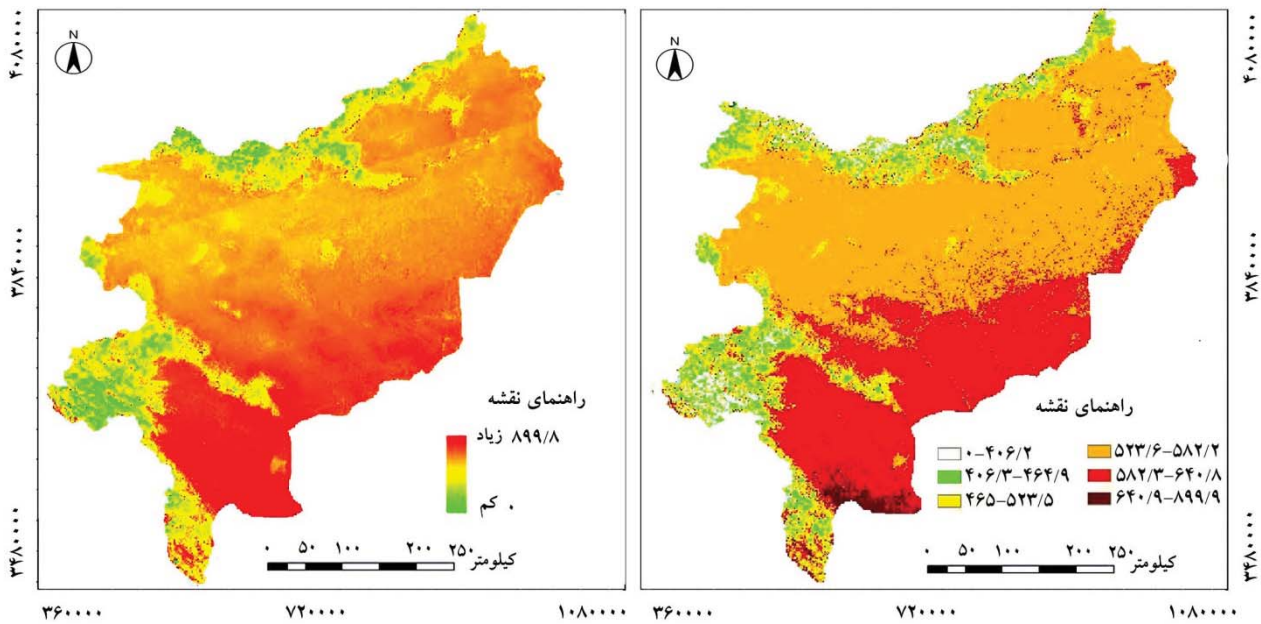
شکل ۵. میزان آلودگی بالای جو

میزان تابش لحظه‌ای کل بر حسب وات بر متر مربع در شکل ۷ ارائه گردید.

به منظور محاسبه تابش طول موج کوتاه لحظه‌ای، میزان آلودگی سطح محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۶ و نتایج



شکل ۶. آلبدوی زمینی محاسبه شده



شکل ۷. تابش لحظه‌ای کل طول موج کوتاه خورشیدی محاسبه شده

خطا (MAE) استفاده شد. ضریب تعیین میزان نزدیکی برآوردها با مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. این ضریب به صورت عدد اعشاری محاسبه می‌شود و حداکثر آن یک است. RMSE میزان خطای برآوردی بر حسب وات بر مترمربع را می‌دهد و MAE معرف دقت روش و مقدار متوسط خطا است که هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده بالا بودن

اعتبارسنجی

برای بررسی نتایج حاصله و ارزیابی کمی آن‌ها نیاز به انتخاب شاخص‌های مناسب می‌باشد تا بتوان عوامل مؤثر و نتایج حاصل بر روی پدیده‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در این بررسی برای تحلیل نتایج از سه شاخص آماری ضریب تعیین (R^2) جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و مقدار متوسط

دقت مدل است.

زده شده و n تعداد نمونه. از دلایل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به منظور برآورد میزان تابش خورشید، نبود داده زمینی می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه نیز تنها دو ایستگاه وجود داشت که در زمان مورد نظر دارای پارامترهای تابش خورشید می‌باشند. بنابراین اعتبارسنجی در این پژوهش با استفاده از داده‌های دو ایستگاه ابوریحان و توچال انجام گردید که نتایج نشان داد که میزان RMSE در حدود ۴۲ وات بر متر مربع و میزان MAE در حدود ۴۰/۷۵ وات بر متر مربع می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad [12]$$

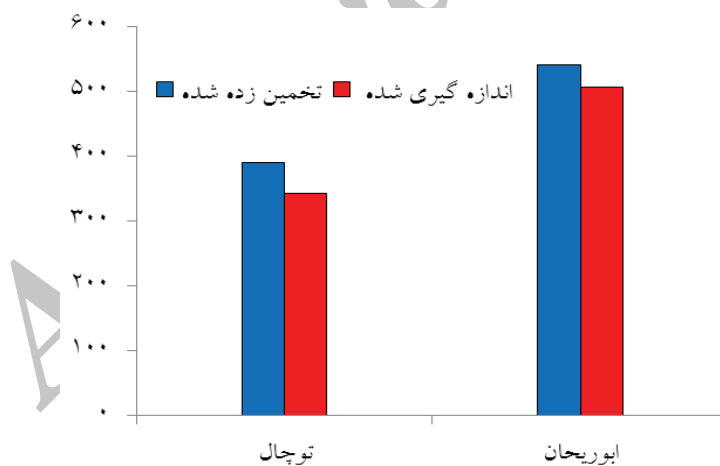
در این رابطه؛ O_i مقادیر مشاهده شده تابش رسیده به زمین (m^2w)، P_i مقادیر برآورد شده تابش (m^2w) و N تعداد مشاهدات.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |z^*(x_i) - z(x_i)|}{n} \quad [13]$$

در این رابطه؛ Z مقدار مشاهده شده، Z^* مقدار تخمین

جدول ۴. مقادیر تابش اندازه‌گیری و تخمین زده شده ایستگاه‌های موجود

ایستگاه	مقدار اندازه‌گیری شده	
	مقدار تخمین زده شده	(وات بر متر مربع)
توچال	۳۹۰/۵	۳۴۳
ابوریحان	۵۴۰	۵۰۶



شکل ۸. هیستوگرام تابش تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده به صورت لحظه‌ای

بیشتری دریافت می‌کنند و بعضی مناطق دیگر همانند مناطق قطبی انرژی کمتری دریافت می‌کنند. بنابراین اولین قدم برای استفاده بهینه از این انرژی پاک و رایگان دانستن مقدار انرژی تابیده شده در هر مکان می‌باشد. بهترین و دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری این پارامتر استفاده از دستگاه‌های تابش‌سنجی می‌باشد، اما امکان استفاده از این ایستگاه‌ها به دلیل شرایط

بحث و نتیجه‌گیری

خورشید منبع اصلی تأمین انرژی برای کلیه فعالیت‌هایی است که در کره زمین صورت می‌گیرد. اما برون‌داد آن در سطح زمین به طور یکسان عمل نمی‌کند، به طوری که بعضی قسمت‌ها همانند مناطق با عرض جغرافیایی پایین انرژی

بیشتر این ایستگاه‌ها هم تابش کل را اندازه‌گیری می‌کنند و پژوهشگران باید این مشکلات را در نظر داشته باشند.

منابع مورد استفاده

۱. بارو، پ. ا. ۱۳۸۵. اصول و کاربرد سنجش از دور. ترجمه: حسن طاهرکیا. انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران. ۳۸۰ صفحه.
۲. حیدری بنی، م. ۱۳۸۶. برآورد تابش روزانه خورشید با استفاده از متغیرهای هواشناسی (مقایسه یافته‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی با سایر مدل‌ها). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. ۱۱۴ صفحه.
۳. خلیلی، ع. و ح. رضایی صدر. ۱۳۷۶. برآورد تابش کلی خورشید در گستره ایران بر مبنای داده‌های اقلیمی. فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، ۴۶: ۱۵-۳۵.
۴. سازمان انرژی‌های نو. ۱۳۸۴. انرژی حرارتی خورشیدی در ایران (صرفه‌جویی انرژی، شناسایی مزایای اقتصادی و حفاظت محیط زیست از طریق سرمایه‌گذاری در کارآیی انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر). خلاصه غیرفنی از پروژه سیاست‌گذاری در زمینه آب و هوا و توسعه پایدار فرصت‌هایی برای همکاری ایران و آلمان. ۲۰ صفحه.
۵. صابری، پ. ۱۳۸۹. برآورد تابش خورشید رسیده به زمین با استفاده از تصاویر ماهواره نوا و روابط آماری در جنوب شرق تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب دانشگاه تهران. ۱۱۰ صفحه.
۶. علوی‌پناه، س. ک. ۱۳۸۵. سنجش از دور حرارتی و کاربرد آن در علوم زمین. انتشارات دانشگاه تهران. ۵۲۴ صفحه.
۷. علی‌حسینی، م. ۱۳۹۱. واسنجی مدل هارگریوز برای برآورد تابش خورشیدی رسیده به زمین با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران. ۱۱۵ صفحه.

مختلف طبیعی و اقتصادی وجود ندارد. از طرف دیگر این دستگاه‌ها مقدار تابش را به صوت نقطه‌ای تا شعاع محدودی برآورد می‌کنند. بنابراین در سال‌های اخیر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تا حدودی این مشکلات برطرف گردیده است. در گذشته با استفاده از ماهواره‌های پهن باند خصوصیات مختلف تابش خورشید را اندازه‌گیری می‌کردند. اما چون این ماهواره‌ها دارای قدرت تفکیک‌های پایینی می‌باشند، بنابراین نیاز به سنجنده‌های چندطیفی باریک باند با قدرت تفکیک بالاتر احساس می‌شد که یکی از این سنجنده‌های چندطیفی باریک باند سنجنده مودیس می‌باشد که در حال حاضر بسیار پرکاربرد می‌باشد.

در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و با استفاده از روش تبدیل آلبدوی باریک باند به پهن باند، تابش کل طول موج کوتاه لحظه‌ای در مناطق مرکزی کشور ایران شامل استان‌های تهران، سمنان، قم و اصفهان به صورت مستقیم برآورد گردید.

لازم به ذکر است که مقدار خطا (RMSE) در این حالت ۴۲ و مقدار MAE در حدود ۴۰/۷۵ به دست آمد که در این تحقیق میزان خطاهای تخمین زده در مقایسه با یکدیگر و در مقایسه با خطاهای تخمین زده شده توسط سایر محققان (۱۱ و ۲۱) دارای تفاوت‌هایی می‌باشد که این اختلافات می‌تواند به علت داده‌های زمینی ایستگاه‌های زمینی تابش‌سنجی در کشور باشد که به صورت کالیبره نیستند و با گذشت زمان از دقت آن‌ها کاسته می‌شود و شرایط اتمسفری و زمانی داده‌های مورد استفاده در این تحقیق مربوط به زمستان می‌باشند، اما تنگ (۲۱) از داده‌های مربوط به اواخر تابستان استفاده کرده است. تنگ (۲۱) و بیشت (۱۱) تابش خالص طول موج کوتاه خورشید را برآورد کرده بودند، اما در این پژوهش تابش‌های کل طول موج کوتاه خورشید واسنجی شدند که این خود می‌تواند یکی از دلایل باشد. در نتیجه از مشکلاتی که در پژوهش‌های مربوط به برآورد تابش خورشید وجود دارد، نبود داده‌های ایستگاه‌های زمینی می‌باشد و یا اگر هم موجود باشد دارای پراکندگی مناسبی نیستند و از طرف دیگر آن‌هایی هم که وجود دارند، یا از کار افتاده‌اند و یا این که کالیبره نیستند و

- Earth Observation and Geoinformation, 19: 1-11.
17. Mefti A, Adane A, Bouroubi M. 2008. Satellite approach based on cloud cover classification: Estimation of hourly global solar radiation from meteosat images. *Energy Conversion and Management*, 49(4): 652-659.
 18. Mokhtari M. 2005. Agricultural Drought Impact Assessment Using Remote Sensing: A Case study Borkhar District-Iran. Unpublished MS Thesis, ITC Netherlands.
 19. Qin J, Chen Z, Yang K, Liang S, Tang W. 2011. Estimation of monthly-mean daily global solar radiation based on MODIS and TRMM products. *Applied Energy*, 88(7): 2480-2489.
 20. Ryu Y, Kang S, Moon S-K, Kim J. 2008. Evaluation of land surface radiation balance derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) over complex terrain and heterogeneous landscape on clear sky days. *agricultural and forest meteorology*, 148(10): 1538-1552.
 21. Tang B, Li Z-L, Zhang R. 2006. A direct method for estimating net surface shortwave radiation from MODIS data. *Remote sensing of Environment*, 103(1): 115-126.
 22. Tasumi M, Allen RG, Trezza R. 2008. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of hydrologic engineering*, 13(2): 51-63.
 23. Tovar HF, Baldasano JM. 2001. Solar radiation mapping from NOAA AVHRR data in Catalonia, Spain. *Journal of Applied Meteorology*, 40(11): 1821-1834.
 24. Wang H, Pinker R. 2009. Shortwave radiative fluxes from MODIS: Model development and implementation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 114(D20).
 25. Wang W, Liang S. 2009. Estimation of high-spatial resolution clear-sky longwave downward and net radiation over land surfaces from MODIS data. *Remote sensing of environment*, 113(4): 745-754.
 ۸. علیزاده، ا. ۱۳۸۶. اصول هیدرولوژی کاربردی. دانشگاه امام رضا. نشر قومس. ۸۰۰ صفحه.
 ۹. خاوریان، م.، ح.، پ. ضیاییان و غ. کمالی. ۱۳۸۶. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره Terra سنجنده MODIS در منطقه عمومی گرگان. *مدرس علوم انسانی*، ۱۱(۱): ۱۲۱-۱۴۲.
 ۱۰. نصیری، م. ۱۳۹۱. ارزیابی انرژی پتانسیل خورشیدی در مناطق بیابانی ایران. اولین همایش ملی بیابان، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان دانشگاه تهران، ۲۷ الی ۲۸ خرداد ماه. ۱۲-۱۵.
 11. Bisht G, Venturini V, Islam S, Jiang L. 2005. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 97(1): 52-67.
 12. Janjai S, Pankaew P, Laksanaboonsong J. 2009. A model for calculating hourly global solar radiation from satellite data in the tropics. *Applied Energy*, 86(9): 1450-1457.
 13. Kim H-Y, Liang S. 2010. Development of a hybrid method for estimating land surface shortwave net radiation from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2393-2402.
 14. Klein AG, Hall DK, Riggs GA. 1998. Global snow cover monitoring using MODIS. 27th International Conference of Information for sustainability: 363-366.
 15. Laine V, Venäläinen A, Heikinheimo M, Hyvärinen O. 1999. Estimation of surface solar global radiation from NOAA AVHRR data in high latitudes. *Journal of Applied Meteorology*, 38(12): 1706-1719.
 16. Li Z, Zhao L, Fu Z. 2012. Estimating net radiation flux in the Tibetan Plateau by assimilating MODIS LST products with an ensemble Kalman filter and particle filter. *International Journal of Applied*



Estimation of the instantaneous short wavelength solar radiation using satellite images of MODIS (Case study: Central regions of Iran)

E. Tazik¹, A. A. Rezaei^{2*}, A. A. Abkar³, S. K. Alavipanah⁴, Z. Jahantab⁵, A. Rahmati⁶

1. MSc. of Remote sensing and Geographic Information System, Department of Cartography, University of Tehran, Iran

2. PhD. Student of Remote sensing and Geographic Information System, Department of Cartography, University of Tehran, Iran

3. Assoc. Prof. Department of Remote Sensing, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Iran

4. Prof. Department of Cartography, University of Tehran, Iran

5. MSc. of Remote sensing and Geographic Information System, Department of Environment, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

6. MSc. Student of Remote sensing and Geographic Information System, Department of Cartography, University of Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 May 2014

Accepted 21 October 2014

Available online 10 June 2015

Keywords:

Renewable Energy

Solar radiation

Remote sensing

MODIS sensor

ABSTRACT

Using renewable energy, particularly solar radiation is considered today as one of the most important energy sources. Therefore the study of solar energy is very important. Although the sun is a great source of energy, but the energy output at ground level does not act alike, so that the amount of solar radiation in different parts of the world is changing and it is high in low latitudes. Thus, identifying appropriate locations for implementation of solar energy is necessary. The best and most accurate way to measure this parameter is using devices that measure radiation in stations, but because of natural, economic conditions and other conditions we cannot use them. On the other hand, these devices have a limited radius of point measurements. So, in recent years using satellite images these problems have been resolved partially. Therefore, in this study using satellite images of MODIS sensor and narrow band to broadband albedo conversion method, the instantaneous short-wave solar radiation in the central Iranian province of Qom, Isfahan, Tehran and Semnan was estimated. To analyze the results of the coefficient of determination (R^2) root mean square error (RMSE) and the mean average error (MAE) was used. Consequently the rate of RMSE was about 42 watts per square meter and MAE rate was about 40.75 watts per square meter indicating the high accuracy of the method used to estimate radiation.

* Corresponding author e-mail address: rezaei.al.65@gmail.com