

## Evaluation of the Efficiency of Solar Radiation Estimation Models Using Satellite Imagery

BIJAN SEDAQAT MOSABI<sup>1</sup>, ZAHRA AGHASHARIATMADARI<sup>1\*</sup>, SOMAYYEH HEJABI<sup>2</sup>, KHALIL GHORBANI<sup>3</sup>

1. Irrigation & Reclamation Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Water department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

3. Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(Received: Feb. 8, 2019- Revised: May. 18, 2019- Accepted: May. 25, 2019)

### ABSTRACT

In addition to use in climate models, solar radiation plays a decisive role in development of solar systems programs in different areas. With significant advances in telecommunication and communication sector, the use of satellite imageries for land-based observations has found a wider role than traditional observations. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite products are available to the public free of charge and have a reasonable resolution of  $1\text{km} \times 1\text{km}$ . In this research, it was tried to calculate the amount of total solar radiation in 4 stations in Iran, using the Earth's surface and atmospheric MODIS data as an input of the parametric and the Angström-Prescott (AP) models and to compare the results with ground-level observations. The AP model output obtained from the MODIS data (AP<sub>RS</sub>) was compared with the AP model output obtained from ground level observation data (AP<sub>GS</sub>). By comparing the results, it was found that the AP<sub>RS</sub> model is more accuracy than the AP<sub>GS</sub> model on cloudy days. So that the amount of RMSE and MBE indices for the AP<sub>RS</sub> model on cloudy days were  $41.74\text{ W/m}^2$  and  $19.70\text{ W/m}^2$ , respectively, and for AP<sub>GS</sub> model were  $43.6\text{ W/m}^2$  and  $34.25\text{ W/m}^2$ , respectively. However, the accuracy of the AP<sub>GS</sub> model on sunny days was higher than that of the AP<sub>RS</sub> model. Although the limitations of ground data (point observations) could be an effective factor in choosing one of both models. Results also indicate a high accuracy of the parametric model (RMSE =  $16.56\text{ W/m}^2$  and  $R^2 = 0.93$ ), especially on cloudy days. On the other hand, despite of high accuracy of the parametric model, the application of AP<sub>RS</sub> model is easy. However, long period sunshine hour's data are needed for calibration of AP coefficients in different regions.

**Keywords:** Solar radiation estimation, MODIS, Parametric model, Angstrom-Prescott model

## ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد تابش خورشید در سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

بیژن صداقت مصعبی<sup>۱</sup>، زهرا آقاشریعتمداری<sup>۱\*</sup>، سمیه حجابی<sup>۲</sup>، خلیل قربانی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران

۲. گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳/۴)

### چکیده

تابش خورشیدی علاوه بر استفاده در مدل‌های اقلیمی، نقشی تعیین‌کننده در برنامه‌های توسعه تاسیسات خورشیدی در مکان‌های مختلف دارد. با پیشرفت‌های چشم‌گیر در حوزه مخابرات و ارتباطات، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای دیدبانی سطح زمین، نقش گسترده‌تری نسبت به دیدبانی‌های مرسوم پیدا کرده است. محصولات سنجنده MODIS بصورت رایگان در دسترس عموم قرار دارد و با پیکسل‌های  $1\text{km} \times 1\text{km}$  از تفکیک مکانی قابل قبولی برخوردار است. در این پژوهش سعی شده در چهار ایستگاه در گستره‌ی ایران با استفاده از داده‌های سطح زمین و اتمسفر این سنجنده بعنوان ورودی مدل پارامتریکی و مدل تجربی انگستروم-پرسکات، مقدار تابش کل روزانه (بر حسب وات بر مترمربع) محاسبه شود و نهایتاً با مشاهدات سطح زمین مقایسه گردد. خروجی مدل تجربی انگستروم-پرسکات با داده‌های اخذ شده از سنجنده‌ی مادیس (APRS) در برابر خروجی همین مدل با داده‌های پایش شده در سطح زمین (APGS) مقایسه شدند. با مقایسه نتایج می‌توان دریافت که مدل APRS دقت بهتری نسبت به مدل APGS در روزهای ابری دارد. به صورتی که مقدار شاخص‌های RMSE و MBE در روزهای ابری برای مدل APRS به ترتیب برابر  $41/74$  و  $19/70 \text{ W/m}^2$  است و برای مدل APGS به ترتیب برابر  $43/60$  و  $34/25 \text{ W/m}^2$  است. با این حال دقت مدل APGS در روزهای آفتابی بالاتر از مدل APRS بود. هر چند محدودیت داده‌های زمینی (که به صورت نقطه‌ای دیدبانی می‌شوند) می‌تواند عاملی تاثیرگذار در انتخاب یکی از این دو مدل باشد. همچنین نتایج نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل پارامتریکی ( $\text{RMSE} = 16/5 \text{ W/m}^2$  و  $\text{R}^2 = 0/93$ ) مخصوصاً در روزهای ابری می‌باشد. از نگاهی دیگر، با وجود دقت بالای مدل پارامتریک، مدل انگستروم-پرسکات با استفاده از داده‌های ماهواره از فرآیندی آسان برخوردار است. هرچند که برای واسنجی ضرایب آن در مناطق متفاوت به داده‌های ساعات آفتابی با طول دوره مناسب نیاز است.

**واژه‌های کلیدی:** برآورد تابش خورشید، سنجنده MODIS، مدل پارامتریک، مدل انگستروم-پرسکات

### مقدمه

استفاده از انرژی‌های پاک با کمترین اثرات زیست محیطی مخرب، دورنمایی ترسیم شده برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی است. دقت بالای ارزیابی این منابع با تأثیر مثبت بر تصمیم‌گیری و کاهش عدم قطعیت در برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای، پیشرفت تکنولوژی را سرعت می‌بخشد (Deo and Sahin, 2017).

نخستین و مهم‌ترین نیاز در طراحی‌های کاربردی انرژی خورشیدی، اطلاعات صحیح درباره مقدار تابش ورودی خورشیدی است. متأسفانه به علت محدودیت‌های مالی، فنی و یا سازمانی، ایستگاه‌های سنجش تابش خورشیدی در بیشتر مناطق جهان وجود ندارند. به‌عنوان مثال، در ایالات متحده آمریکا و انگلستان تابش خورشیدی در کمتر از یک درصد ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود، و این نسبت در سایر نقاط جهان به‌مراتب

انرژی حاصل از تابش خورشیدی یکی از قابل اعتمادترین منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان می‌باشد. آگاهی از توزیع تابش خورشیدی با در نظر گرفتن منطقه خاص جغرافیایی در بسیاری از زمینه‌های مختلف از جمله مهندسی، کشاورزی، محیط زیست، هیدرولوژی، اکولوژی و غیره حائز اهمیت و پیش‌نیازی برای استفاده از سیستم‌های تابش خورشیدی می‌باشد. در واقع توسعه تاسیسات انرژی خورشیدی در یک محل با ارزیابی‌های انجام شده از پتانسیل انرژی خورشیدی آن مکان امکان‌پذیر می‌گردد. مدل‌سازی و پیش‌بینی مقادیر انرژی منتشر شده از خورشید زمینه تحقیقاتی مهمی را برای مهندسان، متخصصان انرژی، سیاست‌گذاران و مدافعان محیط زیست فراهم آورده است.

دلیل محدودیت های مدل های با پایگاه داده ی زمینی، تلاش هایی برای بدست آوردن تابش طول موج کوتاه به سمت زمین از مشاهدات ماهواره ای با استفاده از مدل های فیزیکی که از ترکیب اثرات بخار آب، مشاهدات ابرناکی، ازن، پخش ریلی و آتروسول ها تشکیل شده اند، صورت گرفته است و تعدادی مدل برای برآورد تابش بر روی سطوح افقی کره ی زمین با استفاده از ماهواره های خورشید آهنگ یا زمین آهنگ با رزولوشن های مختلف بسط داده شده اند (Journey and Bertrand, 2010). بسیاری از مدل های برآورد تابش بر مبنای تصاویر ماهواره ای می توانند تابش روزانه را در مقایسه با داده های پیرانومتري با دقت نسبتا بالایی تولید کنند به طوری که برای تهیه نقشه هایی با همان دقت باید شبکه سنجش زمینی با فاصله ی ۱۵ کیلومتری بین ایستگاه ها وجود داشته باشد (Houborg et al., 2007).

بطور کلی سه روش مختلف برای برآورد تابش خورشید از داده های ماهواره ای وجود دارد:

الف) مدل سازی آماری، مانند مدل HELIOSAT برای ماهواره های METEOSAT (Rigollier et al., 2004) و مدل با مبنای شاخص پوشش ابری (Perez et al., 2002)

ب) مدل سازی فیزیکی با استفاده از یک مدل انتقال تابش پیچیده (Kim and Liang, 2010).

ج) مدل انتقال تابش پارامتریزه شده (Yang, et al., 2006) مدل هایی که تاکنون بکار گرفته شده اند و قابلیت برآورد تابش از مشاهدات ماهواره ها را دارند متنوع هستند و از مدل های فیزیکی محض تا مدل های تجربی مطلق را در بر می گیرند که از آن جمله می توان به مدل عملی ارائه شده توسط Perez et al (2002) و یا مدل Janjai et al (2005) اشاره نمود (Moradi, et al., 2009). مدل های فیزیکی محض در تلاش اند تا تابش رسیده به سطح زمین را به وسیله معادله انتقال تابشی توصیف کنند که این امر نیازمند الزاماتی همچون دانش کامل تنظیم و کالیبراسیون تصاویر ماهواره ای و اطلاعات دقیق از ترکیبات سازنده جو می باشد (Raschke and Preuss, 1979, Gautier et al., 1980, Schillings et al., 2004a,b). از طرف دیگر مدل های تجربی/آماری می توانند شامل برقراری رابطه ساده ی رگرسیون بین مقادیر مشاهداتی ماهواره و اندازه گیری های سطح زمین باشد (Cano et al., 1986; Tarpley, 1979). مدل های هیبریدی نیز از رویکرد مدل های فیزیکی ساده با مقداری برازش به مشاهدات استفاده می کنند. برای مثال با استفاده از معادلات انتقال تابشی اثرات اتمسفر و ترکیبات آن بر تابش رسیده به سطح در محدوده اطلاعات در دسترس بدست می آید و با برازشی ساده به وسیله داده های مشاهداتی دیگر اثرات اتمسفری تا حدی از نتایج حذف

کوچک تر است (Thornton and Running, 1999). علاوه بر این، برخی از تابش سنج های موجود نیز از دقت کافی برخوردار نیستند و داده های آن ها دارای خطا می باشد. تابش خورشیدی که به سطح زمین می رسد تا حد زیادی به شرایط اقلیمی منطقه بستگی دارد. با توجه به برآورد میزان انرژی خورشیدی دریافتی در هر منطقه، استفاده از داده های همدیدی و بکارگیری مدلی که بهترین نتیجه را داشته باشد امری بسیار ضروری است. از دهه ۱۹۷۰ که کاربرد انرژی خورشیدی به صورت جدی تر از پیش مطرح شد، مطالعات گسترده در خصوص سنجش انرژی خورشیدی در نقاط مختلف جهان صورت گرفت و مدل های مناسبی با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی مناطق مختلف معرفی گردید (Safayi et al., 2006).

در کنار روش های مبتنی بر مقادیر اندازه گیری شده تابش، روش های تجربی متعدد دیگری نیز بر مبنای مقادیر اندازه گیری شده عوامل هواشناسی ارائه شده اند که از آن جمله می توان به استفاده از روش های هوش مصنوعی، مدل سازی فیزیکی و آماری اشاره نمود. این روش ها از اهمیت بالایی برخوردارند چراکه عدم دسترسی به داده های قابل اعتماد تابش خورشیدی به صورت جدی مانع از پیشرفت تحقیقاتی می شود که به تابش خورشید به عنوان ورودی نیاز دارند (Muneer et al., 2007; Yorukoglu and Celik, 2006).

علاوه بر این در طول سال های گذشته ماهواره ها و داده های حاصل از آن ها تحولات چشمگیری را در حوزه مطالعات هواشناسی و اقلیم شناسی بوجود آورده اند. در حقیقت سنجش از دور روشی جایگزین را برای برآورد تابش خورشید فراهم ساخته است. یکی از مزایای سنجش از دور توانایی جمع آوری سیگنال های پیوسته زمانی و مکانی در بالای اتمسفر است. این ویژگی امکان برآورد تابش در مناطق دورافتاده را که در آن ها ایستگاه های تابش پراکنده است را فراهم می سازد. این تکنولوژی همچنین می تواند محصولات سطح بالایی همچون آلبیدوی سطح، دمای سطح، شاخص گیاهی توسعه یافته، بارندگی و مانند آن ها را فراهم آورد. ماهواره های هواشناسی با برآورد و پیش بینی متغیرهای هواشناسی، پیش و کنترل ابرها، برآورد دما و رطوبت اتمسفر در شرایط طبیعی و ابری آسمان، تعیین سرعت و جهت باد در سطح اقیانوس ها، برآورد و پیش بینی بارندگی و سایر عوامل اقلیمی انقلاب عظیمی را در این گونه مطالعات بوجود آورده اند (Farajzadeh and Karimi, 2014).

علیرغم اهمیت تابش خورشیدی در فرآیندهای سطح زمین، تلاش اندکی در جهت توسعه و تهیه نقشه هایی با رزولوشن مکانی بالای خورشیدی در سطح جهان صورت گرفته است. به

می‌شود. در ادامه به تعدادی از مطالعات صورت گرفته در این زمینه اشاره می‌شود.

(1997) Perez *et al.* و (1999) Zelenka *et al.* نشان دادند که داده‌های تابش خورشیدی برآورد شده بوسیله تصاویر ماهواره‌ای دقت بیشتری نسبت به داده‌های درون‌یابی شده از طریق اندازه‌گیری‌های شبکه تابش‌سنجی مدرن دارند. در پژوهش (2002) Perez *et al.* نیز نشان داده شده که در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی، برآوردهای ماهواره‌ای تابش ساعتی دقیق‌تر از روش‌های تجربی برمبنای اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های زمینی با فاصله ۲۵km از یکدیگر است. نقطه قوت دیگر روش‌های ماهواره‌ای، قابلیت آن در ترسیم دقیق اختلافات نسبی بین مناطق مجاور است، اگرچه ممکن نیست دقت مطلق برای هر نقطه مورد نظر کامل باشد؛ با این حال ثابت شده که این روش مرجع قابل اطمینانی برای توصیف ویژگی‌های خرداقلیمی انرژی تابشی است. (2012) Rahimikhoob *et al.* با استفاده از تصاویر ماهواره نوآ سنجده AVHRR و از دو روش مدل همبستگی چندمتغیره و همچنین روش آماری مبتنی بر ایجاد همبستگی خطی بین شاخص ابر حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص صافی آسمان به برآورد تابش خورشید پرداختند و نشان دادند که مدل همبستگی چندمتغیره در مقایسه با روش آماری، تابش رسیده به سطح زمین را با دقت بالاتری برآورد می‌کند. همچنین (2012) Lotfi با استفاده از تصاویر سنجده MODIS مقادیر تابش خالص استان فارس را در سال ۱۳۸۹ برآورد نمودند. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد مقادیر برآوردشده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح زمین ۱۳٪ $\pm$  خطا دارد و نتیجه گرفتند که با توجه به مساحت سلول‌های ماهواره‌ای (۶/۵ هکتار) و این‌که اندازه‌گیری‌های زمینی مربوط به یک نقطه است این میزان خطا قابل قبول است.

(2015) Bazyar *et al.* از داده‌های ماهواره متئوست برای برآورد تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین استفاده کردند. برای این منظور ضرایب بازتاب اندازه‌گیری شده در باند مرئی را توسط الگوریتم Heliosat-2 به تابش در سطح زمین تبدیل نمودند. ایشان مقادیر برآورد شده تابش را با داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاه کرمان برای سال ۲۰۰۵ اعتبار سنجی کردند. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که مقادیر برآورد شده نسبت به تابش اندازه‌گیری شده در ایستگاه ۱۲٪ خطا دارند. همچنین (2016) e-Ardakani and Rezayimoghaddam امکان استفاده از انرژی خورشیدی برای تامین انرژی سامانه‌های روشنایی بزرگراه

زنجان-تبریز را با استفاده از داده‌های طیفی سنجنده OLI و داده‌های حرارتی سنجنده TIRS ماهواره لندست ۸ در سال ۱۳۹۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل امکان به‌کارگیری سیستم فتوولتائیک خورشیدی جهت تامین روشنایی بزرگراه را تایید نمودند.

(2014) Zhang *et al.* با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS و مدل پارامتری هیبریدی<sup>۱</sup> مقدار تابش کل خورشید را برای فلات تبت محاسبه کردند. تابش طول موج کوتاه پایین سوی سطحی متغیری است که در این پژوهش برای سنجش تابش در نظر گرفته شده است. ایستگاه‌ها به‌صورت شبکه‌ای انتخاب شدند و برای ارزیابی مدل از کل داده‌های زمینی سال ۲۰۰۷ استفاده شده است. از آنجایی که توپوگرافی یکی از عوامل تعیین‌کننده‌ی میزان تابش در مقیاس محلی است، در این مقاله به متغیرهایی مانند ارتفاع، زاویه تابش خورشید و موانع افقی بیشتر تاکید شده‌است. این مدل نتایج با تفکیک مکانی بیشتری برای تابش موج کوتاه پایین سو به نسبت مدل‌های پیشین خود ارائه می‌دهد. از دیگر ویژگی‌های این مدل می‌توان به مستقل بودن آن از اقلیم‌های متفاوت نام برد که ناشی از تئوری‌های بکار رفته در مدل می‌باشد که در نتیجه می‌توان آن را برای محاسبه مقادیر روزانه در اقلیم‌های گوناگون در صورت دسترسی به داده‌های AOD بکار برد. از سایر مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات (2014) López and Batlles, (2018) Ryu *et al.*، (2011) Qin *et al.*، (2013) Emamifar and Alizadeh اشاره کرد.

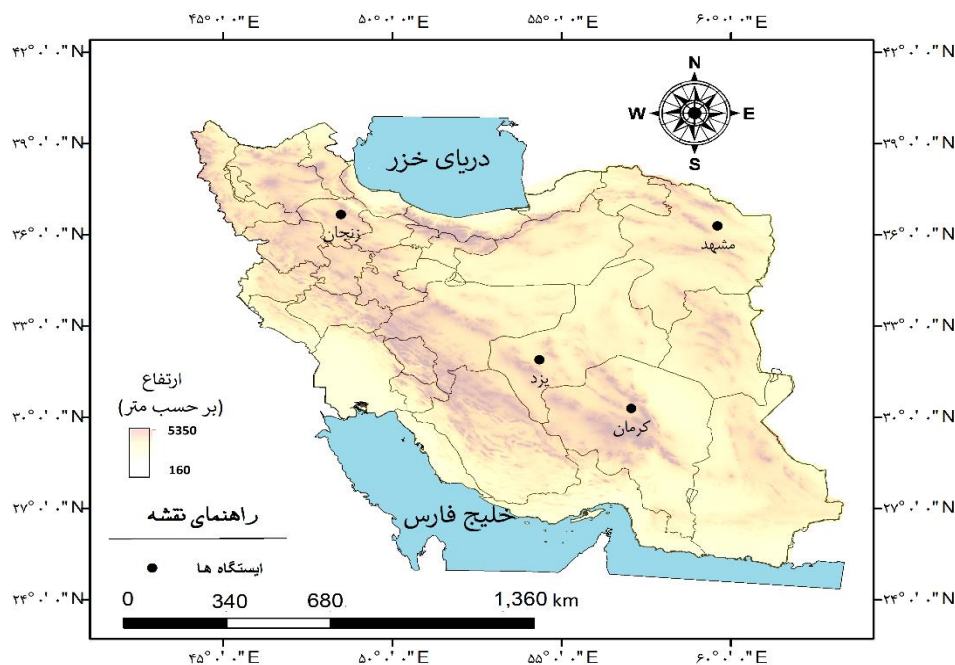
ایران یکی از کشورهای است که با دارا بودن مقادیر بالای تابش خورشیدی، قابلیت تامین بخش قابل توجهی از انرژی مورد نیاز خود از طریق انرژی خورشیدی را دارد. استفاده از این انرژی در حوزه‌های مختلف نظیر کشاورزی، معماری، صنعت، محیط زیست، هیدرولوژی، هواشناسی، خاکشناسی، اقیانوس‌شناسی و اکولوژی حائز اهمیت است. محدوده وسیع عرض جغرافیایی در کشور ما عامل مهمی است که تغییرات میزان دریافت انرژی خورشیدی در بخش‌های مختلف کشور را باعث می‌شود. بنابراین، از آنجاکه بیشتر مناطق ایران در سیطره پرفشارهای جنب حاره قرار گرفته است و ساعات آفتابی و در نتیجه میزان تابش دریافتی از خورشید بالا است، در صورت برنامه‌ریزی صحیح، این منبع عظیم انرژی می‌تواند بخشی از مشکلات مربوط به تامین انرژی در ایران را حل نماید. این امر اهمیت مطالعه دقیق و اصولی تابش خورشیدی به‌عنوان سرمایه‌ای ارزشمند در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و اقتصاد را روشن می‌سازد (Aghashariatmadari, 2012).

مرحله کنترل کیفیت آمار تا استخراج روابط با استفاده از داده‌های روزانه این ایستگاه‌ها در بازه زمانی هشت ساله ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۵ انجام شده است. موقعیت جغرافیایی این ایستگاه‌ها و ارتفاع آن‌ها از سطح دریا در جدول (۱) و شکل (۱) ارائه شده است. اساس انتخاب این ایستگاه‌ها طول دوره آماری بلندمدت داده‌های تابش می‌باشد. در این مرحله ابتدا آمار بلند مدت ایستگاه‌های هواشناسی مذکور در مقیاس روزانه از سازمان هواشناسی دریافت شده و بانک اطلاعاتی به تفکیک سال تشکیل شد. این بانک شامل داده‌های تابش کل خورشیدی ( $R_s$ )، تابش دریافتی بر رویه افقی در بالای جو ( $R_0$ )، کسر ساعات آفتابی ( $\frac{n}{N}$ )، دید افقی و ابرناکی است. در نخستین گام کنترل کیفیت داده‌ها بر مبنای الگوریتم کنترل کیفیت (Moradi 2008) انجام شد. از بین تمام داده‌های هواشناسی دریافتی تنها متغیرهای مربوط به تابش (تابش کل و تعداد ساعات آفتابی) دارای موارد نقص آماری بودند. بنابراین، با توجه به هدف مطالعه که برآورد تابش کل دریافتی از خورشید بر رویه افقی در سطح زمین است، کنترل کیفیت آمار تابش با دقت بالا انجام گرفت.

با گسترش بهره‌برداری‌های انسان از ماهواره‌ها میزان دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای بیشتر شده است و این خود فرصتی است که باید نهایت استفاده را از آن داشت، مخصوصاً برای متغیر مهمی همچون تابش خورشیدی که ورودی تعداد زیادی از مدل‌های اقلیمی و جهانی است. بر این اساس، هدف اصلی از انجام این مطالعه ارزیابی مدل‌های برآورد تابش خورشید در سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. در این راستا داده‌های اندازه‌گیری شده در چند ایستگاه منتخب تابش سنجی با مقادیر تابش حاصل از اجرای الگوریتم‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین میزان کارایی این مدل‌ها با مدل تجربی انگستروم- پرسکات مقایسه خواهد شد و براساس تحلیل نتیجه‌های آماری در نهایت الگوریتم مناسب جهت برآورد تابش در ایستگاه‌های مورد مطالعه معرفی می‌شود.

## مواد روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده در این مطالعه ایستگاه‌های سینوپتیک زنجان، کرمان، مشهد و یزد به‌عنوان ایستگاه‌های مطالعاتی انتخاب شده و بررسی‌ها از



شکل ۱- تصویر منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
یزد	۱۲۳۷/۲	۵۴/۲۸	۳۱/۹۰
کرمان	۱۷۵۳/۸	۵۶/۹۷	۳۰/۲۵
مشهد	۹۹۹/۲	۵۹/۶۳	۳۶/۲۷
زنجان	۱۶۶۳/۰	۴۸/۴۸	۳۶/۶۸

پایگاه داده بر اساس کد پخشیدگی مای نوشته شده است و دامنه-ی آن از شعاع موثر اندازه ذرات ۲ تا ۱۲۸ میکرومتر را شامل می‌شود. این کد که در واقع معادله اتمسفری انتقالی تابش است و به زبان فرترن نوشته شده است و دارای مدل‌های فیزیکی برای محاسبه تابش تحت تاثیر اتمسفر استاندارد، ابر، ریزگردها و سطح است (Liu *et al.*, 2010). در این پژوهش مقادیر شعاع موثر طبق پیشنهاد (Liu, *et al.* (2010) (۱۰ میکرومتر برای قطرات آب موجود در ابر و ۶۵ میکرومتر برای قطرات یخ متعلق به ابر) در نظر گرفته شده و مدل مذکور نیز با ۴ جریان در تفکیک ۰/۰۵ میکرومتر اجرا شده است. ازن و ریزگردها ۰/۳۴۹ atm cm برای نوع روستایی در نظر گرفته شده است. دامنه طول موج کوتاه نیز بین ۰/۳ تا ۳ میکرومتر متناسب با پیرانومتر مورد استفاده در ایستگاه‌ها معین شده است. برای آسمان ابری نیز مجموع بخار آب جو ۱/۴۱۸ گرم بر سی‌سی فرض شده و پوشش ابری به صورت همگن تشکیل شده از صفحات موازی و از لحاظ زمانی در حین صبح و عصر به صورت ایستا در نظر گرفته شده است.

با توجه به این مقادیر و متغیرهای دیدبانی شده در ایستگاه‌های زمینی مقادیر تابش لحظه‌ای در فواصل زمانی نیم ساعته محاسبه می‌شود. با توجه به ارتفاع سطح، وضعیت اتمسفری، زاویه‌ی سوسوی خورشید و آلبیدوی سطح زمین برای موقعیت جغرافیایی معین، مدل SBDART برای محاسبه‌ی تابش مستقیم و پراکنده اجرا شده و مقادیر تابش در قالب شار موج کوتاه پایین سو برای حالت آسمان صاف و ابری بدست آمد. وضعیت اتمسفری شامل قدرت دید، مجموع بخار آب و ضخامت بصری ابر می‌باشد. مدل با تعداد قابل توجهی متغیر به صورتی طراحی شده است که در صورت عدم تعریف هر متغیر، مقداری منطقی به صورت پیش‌فرض برای آن وجود داشته باشد. متغیرهایی که در این تحقیق استفاده شده به تفکیک در جدول (۲) ارائه شده است. این مقادیر همه از طریق محصولات مادیس بدست آمده‌اند به جز متغیر دید افقی که برای آن از داده‌های سازمان هواشناسی استفاده شده است. این مقادیر نشان دهنده مشخصات اتمسفری در دو مقطع زمانی در روز (۱۰:۳۰ و ۱۳:۳۰) می‌باشد. مقادیر زاویه سوسوی خورشید نیز برای تمام بازه‌ها محاسبه می‌شوند. آلبیدو روزانه نیز با استفاده از عملیات درون‌یابی بین دو مقدار آلبیدو آسمان سیاه (Black-sky Albedo) و آلبیدو آسمان سفید (White-sky Albedo) و با توجه به تغییر زاویه سوسو محاسبه شده‌اند. دو مقدار جزئی آلبیدو به ترتیب بیانگر آلبیدو در شرایطی است که تمامی تابش بصورت مستقیم و غیر

علاوه بر داده‌های اندازه‌گیری شده تابش در سطح زمین از داده‌های سنجنده MODIS استفاده شده است. سنجنده MODIS بر روی ماهواره‌های آکوا و ترا نصب شده و به صورت روزانه یک سری تصاویر از پدیده‌های سطح زمین و خشکی برداشت می‌کنند. با توجه به قابلیت تفکیک مکانی نسبتاً خوب این سنجنده (۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر) و همچنین قابلیت تفکیک باندی مناسب آن که شامل ۳۶ باند در دامنه طیفی ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر است، امکان بررسی دقیق و جزئی‌نگر عوامل هواشناسی همچون دمای سطح زمین، تابش خورشیدی، دمای هوا، دی اکسیدکربن و حتی آلاینده‌ها را به صورت مستقیم یا غیر مستقیم فراهم می‌آورد (Lotfi, 2012, Emamifar and Alizadeh, 2013). در این تحقیق تصاویر مورد استفاده از سنجنده MODIS ماهواره Aqua و Terra و در قالب محصولات مادیس برای منطقه مطالعاتی در دوره ۸ ساله ۲۰۱۵-۲۰۰۷ از طریق پایگاه اینترنتی <http://modis.gsfc.nasa.gov> و <https://verb.echo.nasa.gov> دریافت شد. با توجه به خورشیدآهنگ بودن این دو ماهواره، تصاویر ماهواره‌ی Terra در ساعت ۱۰:۳۰ و تصاویر ماهواره‌ی Aqua در ساعت ۱۳:۳۰ به وقت محلی به صورت روزانه اخذ شده‌اند. روزهای مورد مطالعه از میان روزهایی که در آزمون‌های کنترل کیفیت تایید شده‌اند به صورتی انتخاب شدند که حتی-المقدور برای هر ماه بین فروردین تا مرداد در بازه‌ی زمانی هشت سال حداقل یک روز به‌عنوان نماینده‌ی آن ماه بررسی شده باشد. داده‌های ماهواره‌ی از محصولات سطح ۲ سنجنده‌ی مادیس که در قالب فایل‌های HDF ذخیره شدند استخراج شده است که می‌توان از آن مشخصات جوی و زمینی را به‌دست آورد. مقدار کل آب قابل بارش جو از داده‌های (MOD/MYD05) و ضخامت بصری ابر از محصولات (MOD/MYD06) استخراج شده‌اند. همچنین به دلیل عدم دیده‌بانی متغیرهایی همچون مقادیر مربوط به آئروسول‌ها از داده‌های MOD/MYD04 استفاده شد. در صورت عدم قطعیت بالا در هر یک از متغیرهای مورد نیاز، مقادیر از محصولات MOD/MYD08 اخذ شده‌اند.

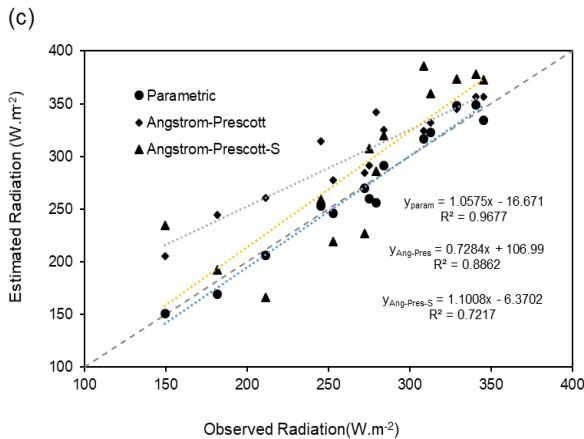
مقدار تابش کل روزانه با تعیین مقادیر لحظه‌ای تابش در فواصل زمانی نیم ساعته و با استفاده از مدل سانتا باربارا (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) برآورد شده‌اند. مقادیر لحظه‌ای این مدل دارای یک پایگاه داده‌ی درونی، شامل پارامترهایی همچون میزان انعکاس پخشیدگی و جذب برای ابرها با قطرک‌های مایع و جامد در شرایط متفاوت است. این



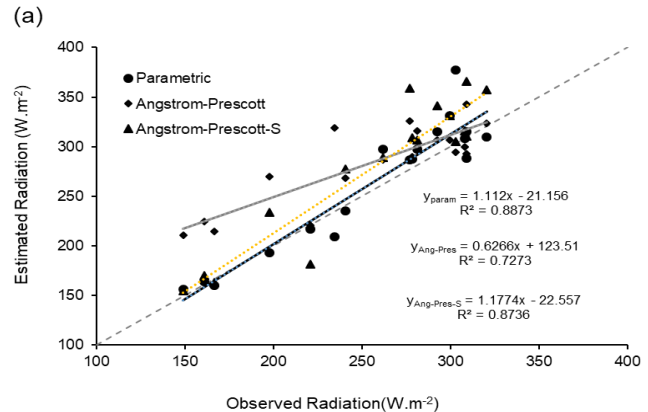
## نتایج و بحث

پس از جمع‌آوری داده‌ها و آماده‌سازی ورودی‌های هر مدل، این مدل‌ها اجرا شدند و در ادامه با توجه به مقادیر تابش اندازه‌گیری شده با پیرانومترها، شاخص‌های آماری مورد نظر محاسبه شدند. در نمودارهای شکل (۳) مقادیر بدست آمده از سه مدل پارامتریک

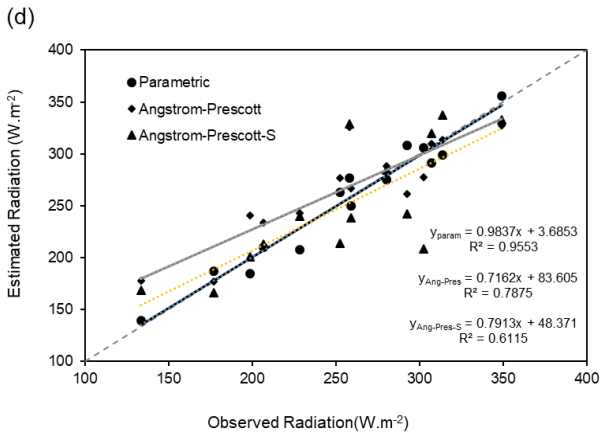
(SBDART)، مدل انگستروم-پرستکات تجربی (Angstrom-Prescott) و مدل انگستروم-پرستکات تجربی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (Angstrom-Prescott-S) برای چهار ایستگاه مورد مطالعه مقایسه شده‌اند. مقادیر بدست آمده برای  $R^2$  به ترتیب برای مدل‌ها بیان شده هستند.



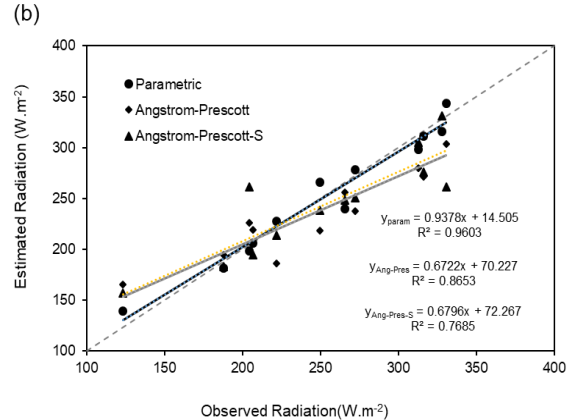
شکل ۳- (c) پراکنش خروجی مدل‌ها در برابر مقادیر مشاهداتی در ایستگاه یزد



شکل ۳- (a) پراکنش خروجی مدل‌ها در برابر مقادیر مشاهداتی در ایستگاه کرمان



شکل ۳- (d) پراکنش خروجی مدل‌ها در برابر مقادیر مشاهداتی در ایستگاه زنجان



شکل ۳- (b) پراکنش خروجی مدل‌ها در برابر مقادیر مشاهداتی در ایستگاه مشهد

همبستگی برای شبیه‌سازی‌ها برای این مدل مشاهده می‌شود. از نظر شاخص RMSE نیز بهترین کارایی مربوط به مدل پارامتریک می‌باشد و همانند شاخص همبستگی، مدل تجربی انگستروم-پرستکات با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بیشترین خطا را در بین سه مدل دارا می‌باشد که این موضوع همچنان در مورد ایستگاه کرمان صادق نمی‌باشد و به نظر می‌رسد دلیل آن این موضوع باشد که داده‌های ماهواره‌ای مربوط به متغیر میانگین روزانه‌ی کسر ابری آسمان (CF) برازش مناسبی با داده‌های ساعت آفتابی داشته‌اند که در شکل (۲) کاملاً مشهود است.

همچنین شاخص‌های آماری بدست آمده برای مدل‌های مختلف در سطح ایستگاه‌ها در جداول (۳ و ۴) بیان شده‌اند. شاخص  $t$ ، شاخص ترکیبی از مقادیر MBE و RMSE است. برای توضیحات بیشتر به Rees (1989) مراجعه شود.

همانطور که در نمودارهای شکل (۳) مشاهده می‌شود مقادیر مربوط به مدل پارامتریک دارای بیشترین همبستگی در تمامی ایستگاه‌ها می‌باشند، مدل تجربی انگستروم-پرستکات با استفاده از داده‌های مشاهداتی نیز در رتبه‌ی بعدی از نظر همبستگی قرار می‌گیرد. به استثناء ایستگاه کرمان که کمترین



جدول ۳- شاخص های آماری محاسبه شده مدل ها

مدل پارامتریک					
ایستگاه	RMSE(W/m2)	RMSE (%)	MBE(W/m2)	t	R <sup>2</sup>
کرمان	۲۳/۶۶	۹/۲۴	۸/۳۰	۱/۵۴	۰/۸۹
مشهد	۱۲/۵۰	۴/۹۷	-۱/۱۴	۰/۳۰	۰/۹۶
یزد	۱۱/۴۲	۴/۲۲	-۱/۱۰	۰/۳۵	۰/۹۷
زنجان	۱۲/۲۹	۴/۸۴	-۰/۴۵	۰/۱۳	۰/۹۶
کل مقادیر	۱۶/۵۶	۶/۴۱	۱/۹۶	۰/۹۱	۰/۹۳
مدل انگستروم-پرسکات					
ایستگاه	RMSE(W/m2)	(%) RMSE	MBE(W/m2)	t	R <sup>2</sup>
کرمان	۴۰/۳۲	۱۵/۷۴	۲۷/۸۵	۳/۹۴	۰/۷۳
مشهد	۲۸/۹۲	۱۱/۴۹	-۱۲/۲۵	۱/۵۵	۰/۸۷
یزد	۳۹/۶۶	۱۴/۶۶	۳۳/۴۹	۵/۶۹	۰/۸۹
زنجان	۲۹/۲۸	۱۱/۵۲	۱۱/۴۵	۱/۵۳	۰/۷۹
کل مقادیر	۳۵/۵۵	۱۳/۷۷	۱۶/۹۶	۴/۱۳	۰/۷۰
مدل انگستروم-پرسکات با داده های اخذ شده از سنجنده مادیس					
ایستگاه	RMSE(W/m2)	(%) RMSE	MBE(W/m2)	t	R <sup>2</sup>
کرمان	۳۵/۴۵	۱۳/۸۴	۲۳/۱۲	۳/۴۴	۰/۸۷
مشهد	۳۱/۶۷	۱۲/۵۹	-۸/۳۶	۰/۹۱	۰/۷۷
یزد	۴۴/۲۱	۱۶/۳۴	۲۰/۸۹	۱/۹۳	۰/۷۲
زنجان	۳۸/۵۵	۱۵/۱۷	-۴/۶۹	۰/۴۴	۰/۶۱
کل مقادیر	۴۳/۸۰	۱۶/۹۵	۱۳/۳۷	۲/۳۳	۰/۵۷

جدول ۴- مقایسه مدل ها در شرایط متفاوت آسمان از لحاظ پوشش ابری

مدل	Ang-Pres_S		Ang-Pres		Parametric	
	Nn	MBE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	MBE (W/m <sup>2</sup> )	RMSE (W/m <sup>2</sup> )
۰/۵<	۱۹/۷۰	۴۱/۷۴	۳۴/۲۵	۴۳/۶۰	-۰/۷۲	۹/۰۷
۰/۵>	۱۸/۳۹	۴۴/۹۷	۶/۱۹	۲۹/۵۶	۳/۶۰	۱۹/۷۷

شاخص RMSE نیز مدل پارامتریک با خطای ۱۶/۵۶ وات بر متر مربع که با توجه به میانگین واقعی مقادیر، با ۰/۶۴ خطا و همچنین مقدار MBE ۱/۹۶ وات بر مترمربع و t برابر ۰/۹۱ بهترین مدل در برآورد تابش روزانه است. مقدار RMSE مدل با داده های حاصل از داده های مشاهداتی به میزان ۳۵/۵۵ وات بر متر مربع و برای مدل با داده های حاصل از ماهواره ۴۳/۸ وات بر متر مربع است. مقادیر MBE مدل ها بیان کننده بیش برآورد هر سه مدل است که این مقدار در مدل پارامتریک کمترین میزان را

با بررسی مقادیر خروجی مدل پارامتریک نیز بدون در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی واضح است که مدل پارامتریک بیشترین همبستگی را با مقادیر مشاهده شده دارد. در مورد دو مدل دیگر نیز مقادیر مربوط به مدل تجربی انگستروم-پرسکات با استفاده از داده های مشاهداتی همبستگی بهتری با تابش اندازه گیری شده در سطح زمین نسبت به مقادیر خروجی از این مدل با داده های حاصل از ماهواره دارد. همچنین این مدل در مقادیر پایین تابش، خطای بیشتری از خود نشان می دهد. در مورد

قابل قبول (با  $R^2=0.93$  و  $CVRMSE = 6/41 W/m^2$ ) آن بعنوان یک مزیت بسیار مهم و به پیچیدگی، تعداد متغیرهای زیاد آن و همچنین زمانبر بودن آن، مخصوصا با توجه به عدم دسترسی به سیستم‌های کامپیوتری پر سرعت به عنوان نقاط ضعف اشاره کرد. شاخص‌های محاسبه شده برای نتایج بدست آمده با مدل پارامتریک در پژوهش ژانگ و همکاران (۲۰۰۷) نشان دهنده دقت خوب مدل ایشان در تمامی حالات آسمان (صاف، نیمه ابری و ابری) است. با این حال برای مدل ایشان در تمامی ایستگاه‌ها مقداری کم‌برآورد مشاهده شده است. مدل اجرا شده در این پژوهش نیز از دقت خوبی برای شرایط مختلف آسمان برخوردار است، و برخلاف پژوهش ژانگ شاخص‌های بدست آمده در مطالعه‌ی ما کم‌برآورد یا بیش‌برآورد خاصی را نشان نداده است.

مدل انگستروم-پروسکات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نیز با وجود دقت مناسبی ( $R^2=0.57$  و  $CVRMSE=0.16/95 W/m^2$ ) که در این مطالعه به آن آگاه شدیم، به تعداد کمی متغیر نیاز دارد و در روند آن پیچیدگی خاصی وجود ندارد. در نتیجه می‌توان از آن برای مناطق مختلف به راحتی استفاده کرد. از موانعی که در این روش با آن مواجه خواهید شد می‌توان به تعیین رابطه‌ی بین متغیر ساعات آفتابی و میانگین کسر ابری آسمان در روز اشاره کرد که به معنی ضرورت وجود داده‌های دقیق ساعات آفتابی برای مناطق مختلف است. همچنین ضرایب انگستروم-پروسکات نیز باید برای محدوده‌ی مطالعاتی تعیین شده باشد. هرچند دقت کمتر آن نسبت به مدل پارامتریک در بعضی کاربری‌های دقیق ممکن است نتیجه مناسبی در بر نداشته باشد.

دارا می‌باشد. خروجی‌های مدل با داده‌های حاصل از داده‌های مشاهداتی علیرغم همبستگی بیشتر با اندازه‌گیری‌های سطح زمین، کارایی کمتری نسبت به این مدل با داده‌های حاصل از ماهواره با توجه به شاخص‌های t و MBE دارد. از نگاهی دیگر همانطوری که در جدول (۴) نشان داده شده است، با مقایسه مدل‌ها در روزهای متفاوت، از نظر ساعات آفتابی هر روز نسبت به مقدار تئوریک آن در می‌یابیم که مدل پارامتریک در روزهای ابری کارایی بیشتری نسبت به روزهای عموماً آفتابی دارد. بر خلاف آن، مدل انگستروم-پروسکات تجربی با داده‌های مشاهداتی در روزهای آفتابی نتایج بهتری داشته است. مدل انگستروم-پروسکات تجربی با داده‌های ماهواره‌ای حساسیت زیادی نسبت به تغییرات  $\frac{n}{N}$  نداشته است.

## نتیجه گیری

اگرچه استفاده از شبکه‌ی تابش‌سنجی داده‌های مطمئنی به صورت نقطه‌ای حاصل می‌کند ولی با توجه به نتایج بدست آمده در این مطالعه می‌توان اظهار کرد که برای دستیابی به متغیر تابش می‌توان به جای سرمایه‌گذاری و توسعه ایستگاه‌های تابش‌سنجی تمرکز بیشتری روی کاربری از داده‌های ماهواره‌ای گذاشت که این موضوع علاوه بر دقت بالاتر در سطح کشور (و نه به صورت نقطه‌ای)، دارای هزینه‌های به مراتب کمتری است. این هزینه‌ها در رابطه با استفاده از محصولات سنجنده‌ی MODIS که به صورت رایگان برای عموم عرضه می‌شوند از سایر روش‌ها پایین‌تر است. دو روش استفاده شده در این پژوهش هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند که می‌توان در رابطه با مدل پارامتریک به دقت

## REFERENCES

- Aghashariatmadari, Z. (2011). Evaluation of model for estimating total solar radiation at horizontal surfaces based on meteorological data, with emphasis on the performance of the angstrom model over Iran. Ph. D. dissertation, University of Tehran. College of Agriculture and Natural Resources. (In Farsi).
- Bazyar, E., Gheybi, A., Araghizadeh, M., Malakooti, H. (2015). Estimation of Surface Solar Radiation using Satellite data from Meteosat in Kerman city, Geophysical Conference Iran, (pp. 106-109). (In Farsi).
- Cano, D., J. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas, L. Wald. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. Solar Energy. 37. 31-39.
- Deo, R., Sahin, M. (2017). Forecasting long-term global solar radiation with an ANN algorithm coupled with satellite-derived (MODIS) land surface temperature (LST) for regional locations in Queensland. Renew. Sust. Energ. Rev. 72. 828-848.
- Emamifar, S., Alizadeh, A. (2013). Estimation of Solar Radiation Using Land Surface Temperature MODIS Sensor Data and Neural Network Model, Journal of soil and water (Agricultural Sciences and Industries). 28(3). (pp: 617-62). (In Farsi).
- Farajzadeh, M., Karimi, N. (2014). Basic satellite meteorology, Samt publication. (pp: 1-10). (In Farsi).
- Gautier, C., G. Diak and S. Masse. (1980). A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from Goes satellite data, J. Appl. Meteorol. 19. 1005-1012.
- Hatefi-e-Ardakani, M., Rezayimoghaddam, M. (2016). Application of satellite images and GIS on feasibility study of exploitation solar energy in illumination system (case study on Zanjan-Tabriz Expressway).

- Houborg, R., Soegaard, H., Emmerich, W., Moran, S. (2007). Inferences of all-sky solar irradiance using Terra and Aqua MODIS satellite data. *Int. J. Remote Sens.* 28. 4509–4535.
- Janjai, S., Laksanaboonsong, J., Nunez, M., Thongsathitya, A. (2005). Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment. *Sol. Energy.* 78. 739–751. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.009>.
- Journee, M., Bertrand, C. (2010). Improving the spatio-temporal distribution of surface solar radiation data by merging ground and satellite measurements. *Remote Sens. Environ.* 114. 2692–2704.
- Kim, H.-Y. And S. Liang. (2010). Development of a hybrid method for estimating land surface shortwave net radiation from MODIS data. *Remote Sensing of Environment.* 114(11). 2393-2402.
- Liu, X., Mei, X., Li, Y., Porter, J., Wang, Q. and Zhang, Y. (2010). Choice of the Ångström–Prescott coefficients: Are time-dependent ones better than fixed ones in modeling global solar irradiance? *Energy Conversion and Management.* 51(12). 2565-2574.
- López, G. and F.J. Batlles. (2014). Estimating Solar Radiation from MODIS Data. *Energy Procedia.* 49. 2362-2369.
- Lotfi, H. (2012). Evaluation of net radiation with use of MODIS sensor data, Master of Science thesis, agricultural faculty of Shiraz University. (In Farsi).
- Moradi, I. (2008). Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. *Energy* (Submitted for publication).
- Moradi, I., Mueller, R., Alijani, B., & Kamali, G. A. (2009). Evaluation of the Heliosat-II method using daily irradiation data for four stations in Iran. *Solar Energy.* 83(2). 150-156.
- Muneer, T., S. Younes, and S. Munawwar. (2007). Discourses on solar radiation modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 11(4). 551-602.
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., & Vignola, F. (2002). A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy.* 73(5). 307-317.
- Perez, R., Seals, R., Zelenka, A. 1997. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy.* 60. 89–96.
- Qin, J., Chen, Z., Yang, K., Liang, S., Tang, W. (2011). Estimation of monthly-meandaily global solar radiation based on MODIS and TRMM products. *Appl. Energy.* 88(7). 2480–2489.
- Rahimkhoob, A., Saberi, P., Behbahani, M., Nazarifar, M. (2012). Assessment of solar radiance reached at earth surface with using of NOAA satellite images and statistical relationships in the South of Tehran. (In Farsi).
- Raschke, R., Preuss, H.J. (1979). The determination of the solar radiation budget at the earth surface from satellite measurements. *Meteorol. Rundsch.* 32. 18.
- Rees, D. G. 1989. *Essential statistics.* 2nd Edn., Chapman and Hall, London.
- Rigollier, C., Lefevre, M., Wald, L. (2004). The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Sol. Energy.* 77. 159–169.
- Ryu, Y., Jiang, C., Kobayashi, H. and Detto, M. (2018). MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000. *Remote Sensing of Environment.* 204. 812-825.
- Safayi, B., Khalaji Asadi, M., Taghizadeh, H., Jilavi, A., Taleghani, G., Danesh, M. (2006). Evaluation of potentially Solar radiance over Iran and preparing its Radiative Atlas. *Journal of Nuclear Science and Tehnology.* (In Farsi).
- SBDART User guide. 2007 [http://irina.eas.gatech.edu/EAS8803\\_Fall2007/User\\_guide\\_SBDART\\_input.pdf](http://irina.eas.gatech.edu/EAS8803_Fall2007/User_guide_SBDART_input.pdf), Accessed date: 1 August 2017.
- Schillings, C., Mannstein, H., Meyer, R. (2004a). Operational method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data. *Sol. Energy.* 76. 475–484.
- Schillings, C., Meyer, R., Mannstein, H. (2004b). Validation of a method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data and application for the Arabian Peninsula. *Sol. Energy.* 76. 487–497.
- Tarpley, J.D. (1979). Estimating Incident Solar-Radiation at the Surface from Geostationary Satellite Data. *Journal of Applied Meteorology.* 18(9). 1172-1181.
- Thornton, P.E. and S.W. Running. (1999). an improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology.* 93(4). 211-228.
- Yang, K., T. Koike, and B. Ye. (2006). Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. *Agricultural and Forest Meteorology.* 137(1-2). 43-55.
- Yorukoglu, M. and A.N. Celik. (2006). A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Conversion and Management.* 47(15-16). 2441-2450
- Zelenka, A., *et al.* (1999) Effective Accuracy of Satellite-Derived Hourly Irradiances. *Theoretical and Applied Climatology.* 62(3-4). 199-207
- Zhang, X., *et al.* (2014) Generating Global and Surface Satellite incident shortwave radiation and photosynthetically active radiation products from multiple satellite data. *Remote Sensing of Environment.* 152. 318