

بررسی و مقایسه توانایی GIS در پهنه‌بندی توزیع فصلی و سالانه تابش خورشیدی کل (بررسی موردی: استان‌های مرکزی ایران)

علی‌اکبر سبزی‌پرور^{۱*}، بهناز ختار^۱ و حمید محب‌زاده^۲

^۱دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۱۴، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱/۱)

چکیده

یکی از مهم‌ترین مراحل استفاده از هر منبع انرژی تجدید شونده‌ای برآورد صحیح آن است. تابش خورشیدی وارده به سطح زمین پارامتر مهمی در سامانه‌های مرتبط محیطی است. برای طراحی هر سامانه‌ای که از انرژی خورشیدی استفاده می‌کند، علاوه بر داده‌های نقطه‌ای، اطلاعات منطقه‌ای تابش نیز مورد نیاز است. افزون بر فراسنج‌های جو، تغییرات ارتفاع، جهت شیب و موانع موجود در مسیر تابش که در اثر تغییر ارتفاع به وجود می‌آیند، از جمله پارامترهای موثر در تابش کل رسیده به سطح زمین هستند. به علت نیاز روز افزون به اطلاعات پهنه تابش به صورت منطقه‌ای، اخیراً از امکانات موجود در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) با به کارگیری توپوگرافی ناحیه مورد بررسی استفاده می‌شود. از این راه می‌توان تابش رسیده به سطح را برآورد کرد. در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل تابش در محیط GIS، نقشه پهنه‌بندی تابش کل خورشیدی در سطح چهار استان مرکزی ایران تولید شد. پارامترهای مورد نیاز این ابزار شامل کسر پخشیده (k) و تراگسیلایی جو (T) است که در ایستگاه‌های تابش‌سنجی پایش نمی‌شوند. در این تحقیق دو پارامتر فوق با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده تابش کل و تابش فراجوی مربوط به ایستگاه‌های مورد بررسی برآورد و پس از آن پهنه سالانه تابش دریافتی در سال ۲۰۰۷ به روش تحلیل تابش و با استفاده از مدل رقمی (DTM) منطقه با توان تفکیک مکانی ۳۰۰ متر و برای ایستگاه‌های تابش‌سنجی به صورت نقطه‌ای برآورد شد. نتایج به دست آمده روشن ساخت که روش تحلیل تابش دقت مناسبی دارد. ارزیابی نتایج به دست آمده از پهنه تابش سالانه نشان داد که شیب‌های جنوبی و شمالی کوهستان‌های استان‌های مورد بررسی، به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تابش را در طول سال دریافت می‌کنند. همچنین، تابش دریافتی در هر منطقه وابستگی کمتری با ارتفاع دارد و بیشتر تحت تأثیر مقدار شیب، جهت شیب و موانع موجود بر سر راه تابش است.

واژه‌های کلیدی: تابش خورشیدی، GIS، پهنه‌بندی، مدل رقمی زمین

Assessment of GIS ability in zonation of the seasonal and annual distribution of total solar radiation (Case study: Central provinces of Iran)

Ali-Akbar Sabziparvar^{1*}, Behnaz Khatar¹ and Hamid Mohebzadeh²

¹Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

²Young Researchers & Elites Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 14 January 2014, accepted: 21 January 2015)

*Corresponding author:

swsabzi@basu.ac.ir

* نگارنده رابط:

Summary

One of the most important steps to make use of any renewable energy is to perform an accurate estimation of solar energy. Incoming shortwave (300-4000 nm) solar radiation is an important component in evaluating environmental factors. In addition to local solar radiation, a detailed spatial and temporal information of Global Solar Radiation (GSR) is required in urban design and regional plans. Further, beside the atmospheric parameters, the variability of the elevation, the surface orientation and the obstructions due to elevations are a source of great local differences affecting the incoming solar radiation. For this reason, several models based on GIS techniques have been recently proposed and developed, which consider the local topography for retrieving global solar radiation on the Earth's surface. Actual irradiation which is received at any time and location depends on many factors such as solar zenith angle, solar declination angle, atmospheric transmissivity (i.e. cloud amount, aerosol optical depth), diffused radiation, slope orientation and local topography. The commonly used radiation models (e.g. Angstrom-PreScott model) do not consider diffused radiation, atmospheric transmissivity (turbidity) and topography of the study sites; as they are not usually available for model estimation. Using the Arc GIS tool, Batless et al. (2008) estimated the global solar radiation on a monthly basis. They showed that summer month estimations are more accurate than winter times. For a region with a different topography, Martinez et al. (2009) employed satellite images (Meteosat) and Digital Terrain Model for estimation of GSR. Their results showed reasonable performance for the model estimates. Bosch et al. (2010) addressed the same problem. To evaluate the potential of solar energy for Oman, Gastli and Charabi (2010) used Arc GIS method in their work. They found that Oman had a high potential of solar energy which could be used as a sustainable source of renewable energy. Iran is located in an unique part of the world, which experiences significant variation in altitude and latitude. The altitude of the country, which has a complex topography, varies from -40 to 5670 m above sea level. These geographical factors cause a wide range of climate types and different amounts of solar irradiance at the surface. The majority of the radiation modeling in Iran has relied on straightforward and simple radiation models such as Angstrom and Angstrom-PreScott. The main constraint of these models was the regional estimates of GSR which were not easily possible from the local estimates. As the first attempt in Iran, this work aimed to consider the effect of complex topography and altitude on surface GSR.

In this study, global solar radiation was produced for four central provinces of Iran using the Solar Analyst model implemented on Arc GIS 9.3. The Solar Analyst uses input parameters such as the diffuse fraction (k) and the atmospheric transmissivity (τ). These parameters are not usually available in radiation networks. In this work, the aforesaid parameters were obtained with use of global solar radiation data (as measured in radiation sites) and extraterrestrial radiation (determined by astronomical models). Monthly local solar irradiation in the year 2007 was calculated from a digital terrain model (DTM) with spatial resolution of 300 m, diffuse fraction (k) and atmospheric transmissivity (τ) for the study sites. Results were accordingly compared against the measured GSR values. Evaluation of the annual regional global solar radiation showed that the southern and northern slopes received the maximum and minimum incoming solar radiation, respectively. It was found that the elevation differences have less effect on the incoming global solar radiation than other topographic variables such as slope, surface orientation and the obstructions.

Keywords: Solar radiation, GIS, digital terrain model, diffuse fraction, atmospheric transmissivity

۱ مقدمه

پایش مستمر تابش خورشیدی رسیده به زمین به علت تأثیر آن روی توازن گرمایی آب‌های سطحی زمین، تأثیر بر گرمای هوا و خاک، تبخیر و تعرق، فتوسنتز و ذوب برف، اهمیت خاصی دارد. بررسی تغییرات تابش در شاخه‌هایی همچون آب‌شناسی (هیدرولوژی)، هواشناسی، فرایندهای زیستی، سامانه‌های گرمایی و کشاورزی کاربرد دارد (آدیکوست و همکاران، ۱۹۸۷). به‌منظور طراحی سامانه‌های تولید انرژی ذکر شده، اطلاعات دقیق در مورد توزیع فضایی این منبع تجدیدپذیر به مدت‌زمان طولانی و با وضوح زیاد نیاز است. معمولاً برآورد تابش خورشیدی براساس اندازه‌گیری‌های حاصل از شبکه‌های رادیوسنجی پراکنده به‌دست می‌آید و روش‌های درون‌یابی و برون‌یابی روی این اندازه‌گیری‌ها صورت می‌گیرد تا مقدار تابش را بتوان در نقاط دورتر از ایستگاه‌های اندازه‌گیری برآورد کرد. به علت وابستگی این روش‌ها به فاصله بین ایستگاه‌ها ممکن است مقدار تابش برآوردی دارای خطای قابل‌ملاحظه‌ای باشد. حتی اگر ایستگاه‌ها دارای فاصله‌ای نزدیک باشند، این روش‌ها در مناطقی با توپوگرافی پیچیده مانند کوهستان‌ها که تنوع تابش زیادی دارند، مناسب نخواهند بود (باتلس و همکاران، ۲۰۰۸).

در شدت تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین سه عامل اصلی تأثیر می‌گذارد:

۱- زاویه میل خورشیدی (Declination angle)،

۲- میزان ابر و ناهمگونی‌های جو،

۳- توپوگرافی زمین.

مورد اول به شیب زمین و فصل بستگی دارد. مورد دوم با فراسنج‌های جو منطقه در ارتباط است و مورد سوم به

متغیرهایی از جمله ارتفاع، جهت و اندازه شیب و گرادیان غالب در منطقه دریافت تابش خورشیدی بستگی دارد. تغییرپذیری در ارتفاع، زاویه سمت‌الرأس و موانع افقی موجود بر سر راه تابش که در اثر وجود ارتفاعات مجاور پدید می‌آید عامل مهم و اساسی در مقدار تابش رسیده به زمین است. برای مثال در نیمکره شمالی شیب‌های جنوبی، در معرض تابش بیشتری نسبت به شیب‌های شمالی هستند. اگرچه به اهمیت اثر توپوگرافی بر تابش خورشیدی پی برده شده است ولی در مدل‌های برآورد تابش خورشیدی، تأثیر عوامل فوق کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است.

پیشرفت‌های به‌دست آمده در زمینه سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی Geographical Information System (GIS) در سال‌های اخیر و استفاده از مدل رقمی زمین Digital Terrain Model (DTM) در محاسبات تابش خورشیدی باعث بهبود در برآورد تابش شده است. بسته نرم‌افزاری GIS به راحتی با مدل‌های برآورد تابش کار می‌کند و قادر است تابش را برای هر نوع از توپوگرافی محاسبه کند. روش تحلیل تابش خورشیدی (Solar Analyst) یکی از پرکاربردترین مدل‌های GIS برای برآورد تابش است. این ابزار با استفاده از مدل رقمی زمین به برآورد تابش مستقیم، تابش پخشیده و تابش کل می‌پردازد. پارامترهای مهم در این ابزار، کسر پخشیده (Diffuse Fraction) و تراکسیلایی (Transmission) جو است که آنها را به ترتیب با k و τ نمایش می‌دهند (برینگر، ۱۹۹۴).

به‌منظور برآورد تابش خورشیدی، بوش و همکاران (۲۰۱۰) از ترکیب روش رقمی زمین و تصاویر ماهواره‌ای استفاده کردند. نتایج آنها مقدار ریشه مربع میانگین خطا

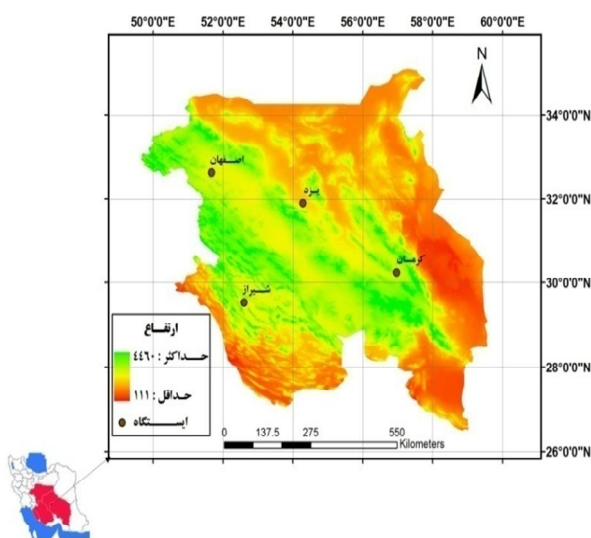
جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد بررسی.

ارتفاع (m)	طول جغرافیایی		نام ایستگاه
	عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	(درجه شرقی)	
۱۵۵۰/۴	۳۲°۳۷" N	۵۱°۴۰" E	اصفهان
۱۴۸۴/۰	۲۹°۳۲" N	۵۲°۳۶" E	شیراز
۱۷۵۳/۸	۳۰°۱۵" N	۵۶°۵۸" E	کرمان
۱۲۳۶/۲	۳۱°۵۴" N	۵۴°۱۷" E	یزد

۲ روش تحقیق

۱-۲ منطقه مورد بررسی

این تحقیق در چهار استان مرکزی ایران صورت گرفت. علت استفاده از این استان‌ها منظم بودن اندازه‌گیری تابش در ایستگاه‌های تابش‌سنجی آنها بود. انتخاب ایستگاه‌ها به گونه‌ای بود که منطقه وسیعی از مرکز ایران را پوشش دهد (شکل ۱). جدول ۱ اطلاعات موجود در هر ایستگاه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ارتفاع ایستگاه‌ها از سطح دریا بین ۱۲۳۶/۲ تا ۱۷۵۳/۸ متر متغیر است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی به همراه اطلاعات ارتفاعی و مکان ایستگاه‌های اندازه‌گیری تابش.

(RMSE) و میانگین خطای اریبی (MBE) به ترتیب ۱۰ درصد و ۲ درصد را نشان داد. باتلس و همکاران (۲۰۰۸) برای برآورد تابش خورشیدی در مناطقی با توپوگرافی متفاوت (نقشه‌های جهانی جو) از روش تحلیل تابش در نرم‌افزار Arc GIS به صورت ماهانه استفاده کردند. نتایج آنها روشن ساخت که در ماه‌های تابستان نسبت به ماه‌های زمستان، نرم افزار برآورد دقیق‌تری از تابش خورشیدی ارائه می‌کند.

پیدالا و همکاران (۲۰۰۸) برآورد تابش خورشیدی از مدل‌های توسعه یافته توزیعی Arc GIS و مدل رقمی زمین استفاده کردند. نتایج آنها مقدار ضریب همبستگی ۰/۴۲- را بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده با مدل نشان داد. مارتینز و همکاران (۲۰۰۹) به منظور برآورد تابش روزانه خورشیدی در مناطقی با توپوگرافی متفاوت از مدل رقمی زمین و تصاویر ماهواره‌ای Meteosat استفاده کردند، نتایج آنها مقادیر کم آماره‌های خطاسنجی RMSE و MBE را برای مقادیر برآورد شده نشان داد. گاستلی و چرابی (۲۰۱۰) برای اندازه‌گیری تابش خورشیدی در عمان از روش تحلیل تابش در نرم‌افزار Arc GIS استفاده کردند. نتایج آنها توان زیاد انرژی خورشیدی را در بیشتر مناطق عمان در طول یک سال نشان داد.

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل رقمی ایران و با استفاده از روش تحلیل تابش خورشیدی، به برآورد تابش کل در استان‌های مرکزی ایران پرداخته شد. مقادیر برآورد شده تابش با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های همدیدی هر استان مقایسه شد تا بتوان دقت برآورد تابش توسط GIS را با یکدیگر مورد مقایسه قرار داد. در نهایت، نقشه تابش سالانه استان‌های مرکزی کشور به روش تحلیل تابش رسم شد.

۲-۲ داده‌های مورد استفاده

۱-۲-۲ مدل رقمی زمین (DTM)

مدل رقمی این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان در هر نقطه و هر لحظه افق‌های مصنوعی (Artificial Horizon) و مکان نسبی خورشید را برآورد کرد. با توجه به این قابلیت مدل رقمی، می‌توان تابش خورشیدی مستقیم، تابش خورشیدی پخشیده (Diffuse) و در نتیجه تابش کل را برآورد کرد (مارتینز و همکاران، ۲۰۰۹). در این تحقیق از مدل رقمی ایران با دقت متوسط ارتفاعی ۲۰ متر و تفکیک مکانی ۳۰ متر برای برآورد تابش استفاده شد.

۲-۲-۲ تابش اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه

در این تحقیق از مقادیر اندازه‌گیری شده تابش کل خورشیدی در ۴ ایستگاه همدیدی واقع در استان‌های فارس، اصفهان، یزد و کرمان در سال ۲۰۰۷ به صورت روزانه استفاده شد. نوع ابزارهای تابش‌سنجی نصب شده در ایستگاه‌های مورد بررسی به شرح زیر است:

الف) تابش کل خورشیدی با دستگاه پیرانومتر CM5 ساخت کارخانه Kipp & Zonen آلمان با انتگراتور CC1 اندازه‌گیری شده است.

ب) طول ساعت‌های آفتابی با آفتاب‌نگار نوع Cambell-Stokes اندازه‌گیری شده است.

۳-۲ روش تحقیق

مقدار تابش رسیده به سطح زمین بستگی به توپوگرافی دارد، به طوری که توپوگرافی می‌تواند مقدار تابش مستقیم و تابش پخشیده را در یک محل تغییر دهد. در این تحقیق مقدار تابش خورشیدی کل به روش تحلیل تابش خورشیدی که از دو مؤلفه تابش مستقیم و تابش پخشیده تشکیل می‌شود، برآورد شد. این روش برای برآورد تابش

کل نیاز به ساعت‌های آفتابی، کسر پخشیده (k) و تراگسیلایی جو (T) دارد. پارامترهای ورودی مدل (کسر پخشیده و تراگسیلایی جو) به علت نبود اندازه‌گیری در ایستگاه‌ها به طور مجزا برآورد شد و در مدل GIS مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، تابش برآورد شده با ابزار تابش GIS با تابش کل اندازه‌گیری شده مقایسه شد تا دقت روش تحلیلی در مقایسه با داده‌های میدانی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۱-۳-۲ برآورد تابش کل به روش تحلیلی (GIS)

توپوگرافی عامل اصلی در تعیین پراکنش مکانی تابش است. تغییر در ارتفاع، شیب، جهت شیب و سایه‌ها که ناشی از تفاوت توپوگرافی در نقاط گوناگون است، منجر به تغییر در شدت تابشی می‌شود که به زمین می‌رسد. مقدار تابش در طول سال از روزی به روز دیگر نیز تغییر می‌کند. روش تحلیل تابش قادر به تحلیل و به تصویر کشیدن اثر خورشید روی یک منطقه جغرافیایی در طول یک دوره زمانی مشخص است. این ابزار با در نظر گرفتن اثرات جوی، عرض جغرافیایی، ارتفاع محل، مقدار شیب، جهت شیب و زاویه ورودی خورشید در طول روز به برآورد تابش می‌پردازد. پرتوهای خورشید در گذر از جو دچار تغییر می‌شود که بیشترین تغییر در تابش توسط توپوگرافی و ذرات موجود در وردسپهر صورت می‌گیرد و باعث ایجاد مولفه‌های تابش مستقیم، تابش پخشیده و بازتابیده می‌شود. موارد پیش گفته، به ترتیب اجزای اصلی تابش کل را تشکیل می‌دهند. روش تحلیل تابش مولفه‌های بازتابیده تابش را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، تابش کل از جمع تابش مستقیم و تابش پخشیده برآورد می‌شود. همچنین این ابزار قادر است تابش را برای یک نقطه یا یک منطقه جغرافیایی برآورد کند (موون و اسپنسر، ۱۹۴۲). شکل ۲ مراحل شش‌گانه برآورد تابش در



شکل ۲. مراحل شش‌گانه برآورد تابش توسط روش تحلیل تابش.

نقطه توزیع زاویه‌ای قابلیت دید آسمان در مقابل موانع موجود بر سر راه تابش برای رسیدن به نقطه موردنظر است. سایه‌نما با در نظر گرفتن امتداد تابش در یک نقطه و تعیین موانع موجود بر سر راه تابش در امتداد موردنظر تولید می‌شود (شکل ۳).

این ابزار را نشان می‌دهد. فرایند برآورد تابش مستقیم و تابش پخشیده با روش تحلیلی، نیازمند برآورد سایه‌نما (Viewshed) ، نقشه خورشید (Sunmap) و نقشه مسیر حرکت خورشید (Sun-Track) است. در ادامه، جزئیات برآورد تابش کل روزانه با این ابزار شرح داده خواهد شد (مارتینز و همکاران، ۲۰۰۹). منظور از سایه‌نما در یک



شکل ۳. سایه‌نما (مارتینز و همکاران، ۲۰۰۹).

برای برآورد استفاده می‌کند. این مدل با یک ثابت خورشیدی شروع به کار می‌کند و اثرات جو را بر اساس تراگیسیلایی و ژرفای نوری (Optical depth) برآورد می‌کند. روابط (۱) تا (۳) نحوه محاسبه تابش مستقیم روزانه (Hb) را نشان می‌دهند:

$$H_b = \sum B_{\theta_z, \psi} \quad (1)$$

$$B_{\theta_z, \psi} = I_{sc} \tau^{m\theta} S_{\theta_z, \psi} \xi_{\theta_z, \psi} \cos\theta \quad (2)$$

$$\theta = \arccos[\cos(\theta_z) + \sin(\theta_z) \sin(\theta_s) \cos(\psi - \psi_s)] \quad (3)$$

که $B_{\theta_z, \psi}$: تابش مستقیم لحظه‌ای خورشیدی از یک بخش از نقشه خورشیدی برحسب ($MJ.m^{-2}. Day^{-1}$)، I_{sc} : ثابت خورشیدی (۱۳۶۷ وات بر متر مربع)، τ : تراگیسیلایی روزانه جو، $m\theta$: جرم نوری جو (Optical Air Mass) در مسیر پرتوهای خورشیدی و تابع زاویه سمت‌الرأس خورشیدی است، $S_{\theta_z, \psi}$: نسبت تابش پخشیده نسبت به کل تابش، $\xi_{\theta_z, \psi}$: کسر شکاف موجود برای بخشی از نقشه خورشیدی، θ زاویه بین مرکز جرم بخشی از آسمان و محور عمود بر سطح، $\cos(\theta_z)$ و $\sin(\theta_z)$: کسینوس و سینوس زاویه سمت‌الرأس خورشیدی، و ψ_s : زاویه سمت‌القدم (آزیموت) است.

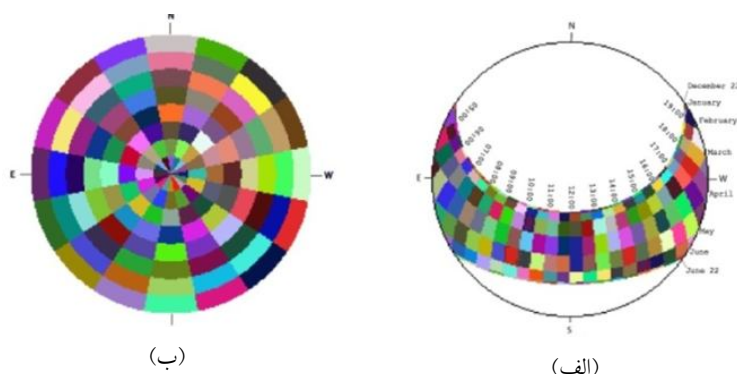
نقشه مسیر حرکت خورشید نقشه رقمی است که مکان خورشید را در زمان‌های متفاوت نشان می‌دهد. نقشه آسمان نقشه رقمی است که با تقسیم آسمان به قطعات کوچک‌تر و با در نظر گرفتن زوایای سمت‌الرأس خورشیدی ساخته می‌شود. زوایای سمت‌الرأس خورشیدی در مرکز هر پیکسل به صورت نقطه‌ای با روابط نجومی برآورد می‌شوند. شکل ۴ نقشه حرکت خورشید و نقشه آسمان را نشان می‌دهد.

برای برآورد مؤلفه‌های تابش مستقیم و تابش پخشیده دریافت شده در هر امتداد، نقشه شکل‌های ۳ و ۴ با یکدیگر ترکیب می‌شوند. شکل ۵ چگونگی ترکیب سایه‌نما را روی نقشه آسمان و نقشه حرکت خورشید نشان می‌دهد.

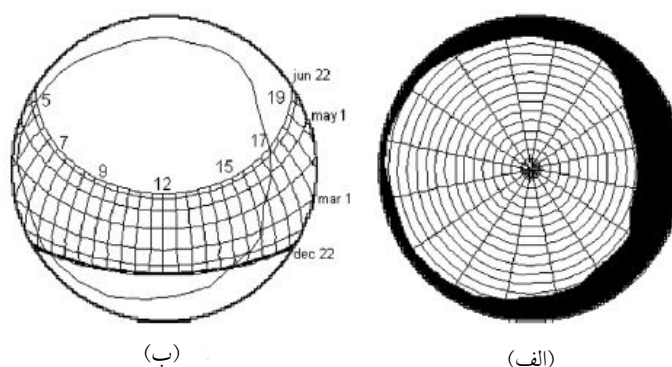
قسمت‌های سیاه‌رنگ امتدادهای تابشی هستند که در اثر وجود موانع، پرتوهای آن به سطح زمین نمی‌رسند. هر قطعه تقسیم‌بندی شده در شکل ۵-ب متعلق به نیم‌ساعت حرکت خورشید است.

۲-۳-۱-۱ برآورد مولفه مستقیم تابش خورشیدی

تابش خورشیدی برای هر قطعه از نقشه خورشید که موانع به‌طور کامل مانع از رسیدن تابش از آن نمی‌شوند، برآورد می‌شود. روش تحلیل تابش خورشیدی از یک مدل ساده



شکل ۴. (الف) نقشه مسیر حرکت خورشید، (ب) نقشه آسمان (نرم‌افزار GIS نسخه ۹/۳).



شکل ۵. (الف) ترکیب سایه‌نما و نقشه آسمان، (ب) ترکیب سایه‌نما و نقشه مسیر حرکت خورشید (باتلس و همکاران، ۲۰۰۸).

زمانی، $V_{\theta Z, \psi}$: نسبت سایه‌نمای آسمان برای بخشی از آسمان، $S_{\theta Z, \psi}$: مدت‌زمان تابش در آسمان است

۲-۱-۳-۲ تابش خورشیدی کل

تابش کل (Hg) ($\text{MJ.m}^{-2} \cdot \text{Day}^{-1}$) از حاصل جمع تابش مستقیم و تابش پخشیده به دست می‌آید (رابطه ۶). این مراحل برای هر نقطه از منطقه به‌طور جداگانه تکرار و در نهایت نقشه تابش برای کل منطقه برآورد می‌شود.

$$H_g = H_b + H_d, \quad (6)$$

در روش تحلیل تابش GIS مقدار تابش برحسب Wh.m^{-2} برآورد می‌شود. برای تبدیل واحد MJ.m^{-2} به Wh.m^{-2} باید عدد حاصل از رابطه (۶) را در $277/77$ ضرب نمود.

۲-۳-۲ برآورد پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل در

هر ایستگاه

مدل تحلیل خورشیدی برای برآورد تابش کل نیاز به دو پارامتر کسر پخشیده (k) و تراکسیلایی جو (τ) دارد که این دو پارامتر در ایستگاه‌های همدیدی و تابش‌سنجی اندازه‌گیری نمی‌شود. در این تحقیق، به منظور وارد کردن این دو پارامتر در بسته نرم‌افزاری GIS ابتدا باید این دو

۲-۱-۳-۲ برآورد مولفه تابش پخشیده خورشیدی

برای برآورد تابش پخشیده از دو مدل تابش پخشیده یکنواخت و تابش پخشیده تمام‌ابری استاندارد (Standard Overcast Diffuse) استفاده می‌شود. در مدل تابش پخشیده یکنواخت که در شرایط آسمان صاف استفاده می‌شود، فرض بر این اساس استوار است که تابش پخشیده ورودی در همه امتدادهای آسمان یکسان است. در مدل تابش پخشیده تمام‌ابری استاندارد، تابش پخشیده با توجه به زاویه سمت‌الرأس متغیر است و با آن رابطه‌ای تجربی دارد (مارتینز و همکاران، ۲۰۰۹). هر دو مدل در روش تحلیل تابش خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابتدا تابش پخشیده در مرکز هر قسمت ($D_{\theta Z, \psi}$) برآورد شده (رابطه ۴) و سپس تابش پخشیده شده کل روزانه (H_d) در هر منطقه از حاصل جمع مقادیر برآورد شده به دست می‌آید (رابطه ۵) (مارتینز و همکاران، ۲۰۰۹):

$$D_{\theta Z, \psi} = R_n k \Delta V_{\theta Z, \psi} S_{\theta Z, \psi} \cos(\theta), \quad (4)$$

$$H_d = \sum D_{\theta Z, \psi}, \quad (5)$$

که $D_{\theta Z, \psi}$: تابش پخشیده از یک بخش از آسمان ($\text{MJ.m}^{-2} \cdot \text{Day}^{-1}$)، R_n : تابش خورشیدی مستقیم در سطح، k: کسر پخشیده تابش روزانه، Δ : دوره

جدول ۲. مقادیر پارامتر کسر پخشیده (k) و ضریب تراگیلابی (τ) ایستگاه‌ها در سال ۲۰۰۷.

نام ایستگاه	تابش کل (R) Wh.m ⁻² .year ⁻¹	تابش فراجوی (Ra) Wh.m ⁻² .year ⁻¹	$K_t = \frac{R}{Ra}$	کسر پخشیده (k)	تراگیلابی جو (τ)
اصفهان	۱۷۳۳۸۸۳	۲۶۲۹۳۹۲	۰/۶۶	۰/۳۲	۰/۸۶
شیراز	۱۸۸۲۷۹۵	۳۲۰۷۳۷۱	۰/۵۸	۰/۳۹	۰/۸۷
کرمان	۱۹۴۳۱۳۱	۲۹۹۸۸۸۱	۰/۶۵	۰/۲۹	۰/۸۶
یزد	۱۸۱۹۸۶۷	۲۸۴۲۲۸۴	۰/۶۴	۰/۲۲	۰/۸۸

$$k = 0/99 - 0/356k_t + 2/783k_t^2 - 10/67k_t^3 + 7/63k_t^4 \quad (۷)$$

$$\tau = 0.2505 + 1.1468 \frac{n}{N} - 0.3974 \left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (۸)$$

مراحل برآورد مقادیر کسر پخشیده (k) و ضریب تراگیلابی جو (τ) برای ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۲ داده شده است. با انتقال ضرایب به دست آمده به زیربرنامه تحلیل تابش در نرم‌افزار GIS مقدار تابش سال ۲۰۰۷ در ایستگاه‌های مورد بررسی تعیین شد.

پارامتر برآورد شود. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده تابش کل و تابش فراجوی (تابش در بام جو) در ایستگاه‌های مورد بررسی، ابتدا ضریب شفافیت جو (k_t) که نسبت تابش اندازه‌گیری شده در سطح افق در ایستگاه‌ها به تابش فراجوی است، محاسبه شد. سپس با استفاده از این ضریب مقدار کسر پخشیده (k) محاسبه شد (رابطه ۷).

ضریب تراگیلابی نیز از رابطه (۸) به دست آمد که در آن τ ضریب تراگیلابی و $\frac{n}{N}$ درصد ساعت‌های آفتابی است (گاستلی و قرابی، ۲۰۱۰):

جدول ۳. مقایسه تابش کل ماهانه و سالانه اندازه‌گیری شده و برآورد شده با روش تحلیل تابش GIS در سال ۲۰۰۷ (وات ساعت بر متر مربع) برای هر ایستگاه.

ایستگاه	یزد		کرمان		شیراز		اصفهان	
	روش تحلیل GIS	اندازه‌گیری شده	روش تحلیل GIS	اندازه‌گیری شده	روش تحلیل GIS	اندازه‌گیری شده	روش تحلیل GIS	اندازه‌گیری شده
دی	۷۵۲۵۵	۱۱۲۲۲۵	۱۶۴۱۲۳	۱۱۳۵۱۲	۱۴۷۴۸۴	۱۰۹۴۸۲	۸۶۵۷۱	۸۰۴۶۷
بهمن	۷۶۳۰۷	۱۲۹۴۸۵	۱۶۱۶۴۲	۱۱۵۹۰۴	۱۴۶۶۷۴	۱۰۹۴۵۲	۹۲۰۸۷	۱۰۷۴۸۴
اسفند	۱۱۶۹۲۹	۱۴۵۸۸۴	۲۰۳۸۳۴	۱۷۴۴۹۱	۱۸۵۱۳۳	۱۵۵۲۹۲	۱۳۷۲۴۹	۱۴۴۱۲۰
فروردین	۱۲۹۵۱۰	۱۵۱۲۷۸	۲۱۶۵۸۱	۱۶۸۵۴۸	۱۹۶۵۲۴	۱۷۴۴۶۰	۱۷۲۵۸۵	۱۸۳۷۳۱
اردیبهشت	۱۵۲۲۷۲	۱۹۸۰۸۷	۲۲۲۵۲۸	۱۹۹۸۰۵	۲۰۱۸۹۵	۲۰۹۹۵۹	۱۹۲۰۶۵	۱۸۷۷۹۰
خرداد	۱۸۷۳۶۵	۲۰۸۳۵۹	۲۳۴۸۶۶	۲۱۸۳۹۶	۱۹۱۱۱۷	۱۹۷۱۰۶	۲۰۹۳۲۳	۱۹۹۰۲۲
تیر	۱۸۹۳۳۷	۲۰۸۵۹۵	۲۳۲۵۶۷	۲۲۱۹۹۱	۲۱۱۲۴۵	۲۰۵۶۶۵	۲۳۱۶۱۱	۲۲۳۷۴۷

ادامه جدول ۳. مقایسه تابش کل ماهانه و سالانه اندازه‌گیری شده و برآورد شده با روش تحلیل تابش GIS در ۲۰۰۷ (وات ساعت بر متر مربع) برای هر ایستگاه.

مرداد	۱۹۰۹۸۹	۲۱۷۵۳۶	۲۲۸۳۱۱	۲۱۱۰۴۵	۲۱۳۵۴۲	۲۱۶۳۲۷	۲۲۰۷۰۳	۲۰۴۱۷۵
شهریور	۱۷۰۶۷۶	۱۹۱۸۹۰	۲۱۰۳۲۳	۱۸۳۹۵۴	۲۰۶۴۸۱	۱۷۶۴۴۹	۱۵۰۱۴۲	۱۵۴۷۵۸
مهر	۹۱۶۶۴	۱۱۳۸۷۷	۱۸۰۰۰۸	۱۴۷۸۳۴	۱۶۴۱۸۰	۱۳۸۲۹۳	۱۰۸۵۷۲	۱۰۵۱۵۶
آبان	۶۷۵۲۱	۸۵۷۷۶	۱۵۹۸۴۹	۹۹۱۲۲	۱۴۳۷۴۹	۱۰۱۴۱۵	۸۴۰۷۵	۸۲۰۲۵
آذر	۶۵۴۶۳	۵۶۸۷۵	۱۶۲۳۹۶	۸۸۵۲۹	۱۴۵۷۵۳	۸۸۱۹۵	۶۸۹۷۰	۶۱۴۰۸
جمع سالانه	۱۵۱۳۲۸۸	۱۸۱۹۸۶۷	۲۳۷۷۰۲۸	۱۹۴۳۱۳۱	۲۱۵۳۷۷۷	۱۸۸۲۷۹۵	۱۷۵۳۹۵۳	۱۷۳۳۸۸۳

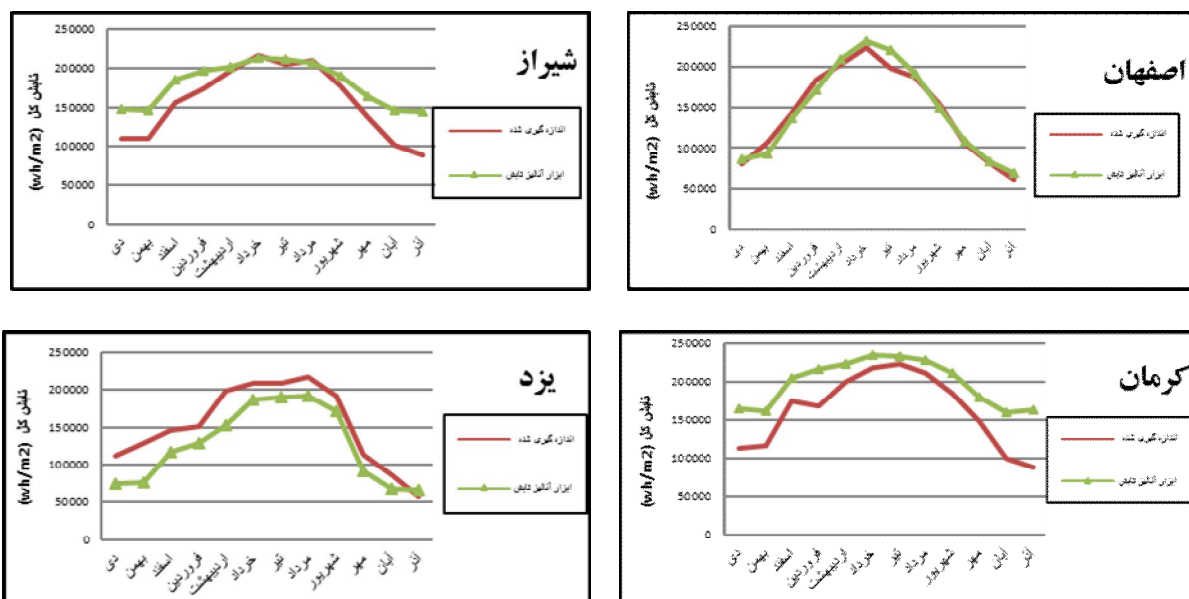
۳ نتیجه و بحث

مقایسه شد تا بتوان دقت این دو مدل در برآورد تابش را با یکدیگر مقایسه کرد. جدول ۳ مقادیر ماهانه و سالانه تابش اندازه‌گیری شده را با مدل تحلیل تابش GIS در هر ایستگاه نشان می‌دهد. طبق اطلاعات این جدول، ایستگاه کرمان درحکم مرتفع‌ترین ایستگاه مورد بررسی دارای بیشترین مقدار تابش $23770.28 \text{ Wh.m}^{-2}$ است. از طرف دیگر ایستگاه یزد با ارتفاع $1236/2$ دارای کمترین مقدار تابش $1513288 \text{ Wh.m}^{-2}$ است. با مقایسه مقادیر تابش این دو ایستگاه ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع

در این تحقیق پهنه تابش خورشیدی کل با استفاده از زیربرنامه تحلیل تابش GIS تهیه شد. ابتدا دو پارامتر تراگسیلایی جو و کسر پخشیده که روش تحلیل تابش از آنها درحکم ورودی برای برآورد تابش استفاده می‌کند، با استفاده از تابش اندازه‌گیری شده هر ایستگاه به‌طور مجزا برآورد و به منزله ورودی وارد مدل شد تا تابش به روش تحلیل تابش تعیین شود. مقادیر برآورد شده به روش تحلیل تابش با مقادیر اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه

جدول ۴. مقایسه آماری خطای تابش ماهانه برآورد شده به روش تحلیل تابش نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده (درصد).

ایستگاه	یزد		کرمان		شیراز		اصفهان	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
ماه دی	-۳۲	۳۲	۴۴	۴۴	۳۴	۳۴	۷	۷/۶
بهمن	-۴۱	۴۱	۳۹	۳۹	۳۴	۳۴	-۱۴	۱۴
اسفند	-۱۹	۲۰	۱۶	۱۶	۱۲	۱۹	-۴	۵
فروردین	-۱۴	۱۴	۲۷	۲۸	۱۳	۱۲/۸	-۶	۶
اردیبهشت	-۲۳	۲۳	۱۱	۱۱	-۳	۳	۲	۲
خرداد	-۱۰	۱۲	۷۵	۷۵	-۳	۲	۵	۵
تیر	-۹	۹	۴۷	۴۶	۲/۷	۱	۳	۳
مرداد	-۱۲	۱۲	۸۰	۸۰	-۱	۱۷	۸	۸
شهریور	-۱۱	۱۱	۱۴	۱۴	۱۷	۱۸	-۲	۳
مهر	-۱۹	۱۹	۲۲	۲۲	۱۸	۱۸	۳	۳
آبان	-۲۱	۲۲	۶۱	۶۱	۱۴	۱۴	۲	۲
آذر	۱۵	۱۶	۸۴	۸۲	۶۳	۶۰	۱۲	۱۲



شکل ۶. مقایسه تابش کل ماهانه برآورد شده با روش تحلیل تابش در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده.

کمترین مقدار تابش در ماه دی ۷۵۲۵۵ وات ساعت بر متر مربع در ایستگاه یزد مشاهده می‌شود.

تابش ماهانه به روش تحلیل تابش و به کمک مدل رقمی زمین با تفکیک مکانی ۳۰۰ متر برای هر ایستگاه به‌طور مجزا و به‌صورت نقطه‌ای برآورد شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، پارامترهای اصلی برای برآورد تابش در روش تحلیل تابش کسر پخشیده (k) و تراگیسیلایی جو (T) هستند. مقایسه آماری بین نتایج حاصل از روش تحلیل تابش با مقادیر اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه با پارامترهای آماری میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریبی (MBE) صورت گرفت (رابطه‌های ۹ و ۱۰). کوچک بودن نمایه میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) نشانه نزدیکی داده‌های شبیه‌سازی شده به مقادیر مشاهده‌ای و در نتیجه عملکرد بهتر مدل است (فاکس، ۱۹۸۱). مقادیر منفی و مثبت مقادیر MBE به ترتیب نشان‌دهنده تمایل مدل به برآورد کم و زیاد را

ایستگاه، مقدار تابش افزایش پیدا می‌کند. این نتیجه با نتایج پیدالو و ژکوت (۲۰۰۸) سازگار است. آنها به این نتیجه رسیدند که به‌ازای افزایش هر ۱۰۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا تابش کل ۸ درصد افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، با مقایسه تابش دریافتی دیگر ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود که علی‌رغم وجود اختلاف ارتفاع هر ایستگاه نسبت به ایستگاه دیگر، مقادیر دریافتی تابش تفاوت محسوسی با یکدیگر ندارند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در این ایستگاه‌ها اختلاف ارتفاع در مقایسه با دیگر متغیرهای توپوگرافی نظیر سایه حاصل از کوهستان‌های مجاور، تاثیر قابل توجهی روی تابش دریافتی ندارد. این یافته نیز با نتایج عرضه شده باتلس و همکاران هم‌خوانی نشان می‌دهد (باتلس و همکاران، ۲۰۰۸). تحلیل ماهانه مقادیر به‌دست آمده تابش نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تابش در ماه تیر ۲۳۲۵۶۷ وات ساعت بر متر مربع در ایستگاه کرمان و

برای مدل روش تحلیلی ۲۲/۲ درصد به دست آمد. علت وقوع تفاوت در خطاهای مدل در شهرهای متفاوت را می‌توان به عوامل گوناگون نسبت داد. برای مثال رطوبت بیشتر هوا در منطقه شیراز می‌تواند دقت برآورد را در این نوع اقلیم کاهش دهد. وجود توپوگرافی پیچیده در برخی مناطق مانند کرمان در مقایسه با اصفهان که از همگنی جغرافیایی بهتری برخوردار است، می‌تواند دقت برآورد تابش کل را در کرمان کاهش دهد. علاوه بر این، اندازه ذرات هواویز، توزیع ذرات و نوع ذرات که در روش حاضر لحاظ نشده است می‌تواند دقت برآوردها را در شهرهای متفاوت تحت تأثیر قرار دهد.

در تحلیل سالانه (جدول ۳) بیشترین مقدار تابش سالانه برآورد شده به روش تحلیل تابش در ایستگاه کرمان به دست آمد که این برآورد با تابش سالانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها سازگار است. شکل ۶ نمودارهای تابش برآورد شده به روش تحلیلی را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۷ مقدار ضریب تعیین (R^2) به دست آمده حدود ۰/۷۱ نشان‌دهنده دقت مناسب مدل GIS در برآورد تابش کل است.

باید به این نکته توجه کرد که این مقایسه به طور نقطه‌ای و در چند ایستگاه هم‌دیدگی صورت گرفته است.

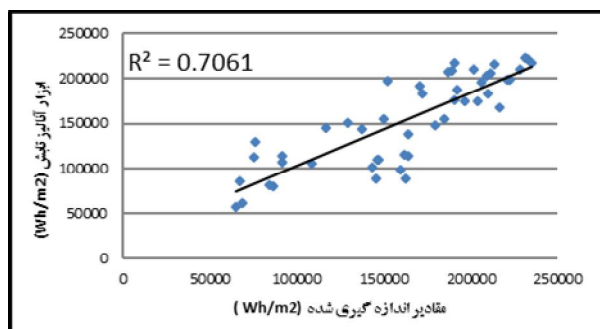
نشان می‌دهد. نمایه MBE ممکن است منفی، مثبت و یا صفر باشد ولی بهترین مقدار آن صفر است (فو و ریچ، ۲۰۰۲).

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(o_i - s_i)^2}{n}}}{o_i} * 100, \quad (9)$$

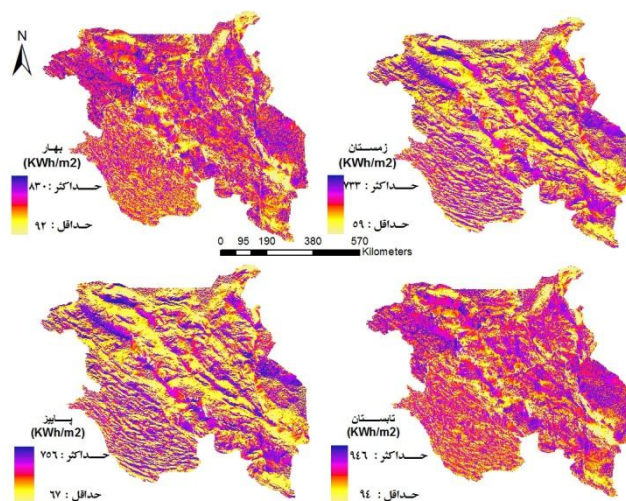
$$MBE\% = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{s_i - o_i}{n}}{o_i} * 100. \quad (10)$$

در روابط (۹) و (۱۰)، متغیرهای O و S به ترتیب مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تابش هستند و n تعداد داده‌ها است. جدول ۴ نتایج آماری حاصل از این مقایسه را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جدول ۴، مقادیر MBE نشان می‌دهد روش تحلیل تابش در ایستگاه‌های کرمان و اصفهان تمایل به برآورد بیش از واقعیت (فرا برآورد) دارد. در حالی که در شهرهای شیراز و یزد تمایل به فرو برآورد تابش دارد. طبق جدول ۴ حداکثر مقدار MBE روش تحلیلی در ایستگاه‌های شیراز و یزد دیده می‌شود. میانگین خطای اریبی برای زیر برنامه تابش GIS ۱۳/۲۵ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در برآورد تابش است. مقادیر $RMSE$ نیز نشان‌دهنده بیشترین مقدار خطای این پارامتر در روش تحلیل تابش GIS در ایستگاه کرمان با مقدار ۴۱ درصد است. میانگین منطقه‌ای $RMSE$ نیز



شکل ۷. خط برازش تابش کل ماهانه برآورد شده با روش تحلیلی و مقادیر اندازه‌گیری شده در همه ایستگاه‌های مورد بررسی.



شکل ۸. تابش کل فصلی برآورد شده به روش تحلیلی در منطقه مورد بررسی برحسب کیلووات ساعت بر متر مربع ($kWh \cdot m^{-2}$).

اندازه‌گیری شده در فصل تابستان و زمستان به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را دارند.

شکل ۹ پراکنش مکانی تابش سالانه در منطقه را نشان می‌دهد. برای مشاهده دقیق‌تر تغییرات تابش دریافتی و تأثیر مولفه‌های توپوگرافی روی آن، تابش در قسمتی از منطقه مورد بررسی با وسعت $1444 km^2$ ، با استفاده از مدل رقمی با تفکیک مکانی 300 متر برآورد شد. نقشه ارتفاع، جهت شیب و سایه‌روشن نیز برای بررسی چگونگی تغییرات تابش آورده شده است.

طبق این شکل بیشترین مقدار تابش تجمعی سالانه مربوط به شیب‌های جنوبی با حداکثر $2/87 MWh \cdot m^{-2}$ است. کمترین مقدار تابش کل سالانه نیز در شیب‌های شمالی اتفاق می‌افتد که کمترین مقدار آن $0/2 MWh \cdot m^{-2}$ است. با توجه به تغییرات تابش در سطح منطقه مورد بررسی و تغییرات ارتفاع، می‌توان دید که صرفاً نقاط مرتفع تابش بیشتری را دریافت نمی‌کنند بلکه تابش دریافتی بیشتر تحت تأثیر شرایط توپوگرافی مانند جهت شیب، مقدار شیب و موانع موجود بر سر راه تابش نیز قرار دارد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های روش

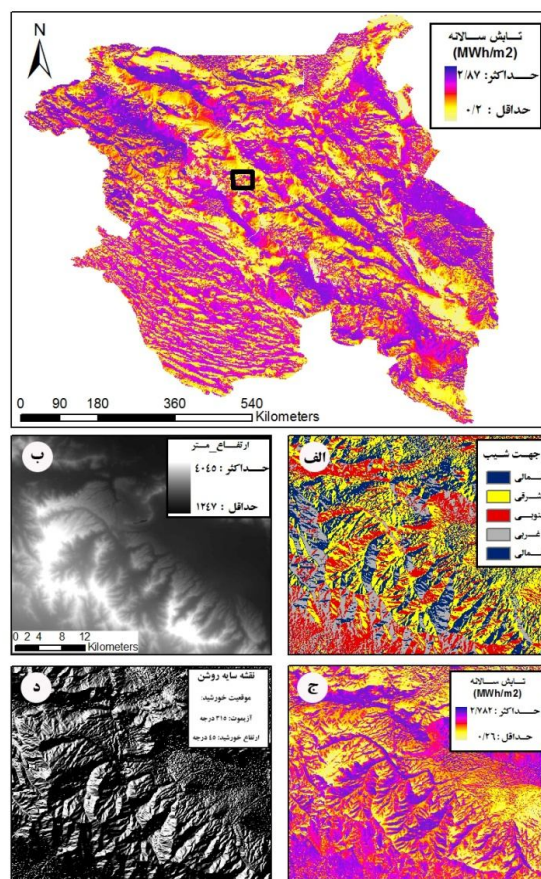
روش تحلیل تابش قادر است مقدار تابش را هم به طور نقطه‌ای و هم منطقه‌ای برآورد کند. این ابزار می‌تواند تابش را با استفاده از مدل رقمی زمین و دو پارامتر کسر پخشیده (k) و تراگسیلایی جو (τ) در هر منطقه تعیین کند و از آنجا که نصب تجهیزات اندازه‌گیری تابش در هر نقطه امکان‌پذیر نیست، می‌توان از برنامه تحلیل تابش GIS برای تهیه پهنه مولفه‌های تابش منطقه‌ای استفاده کرد. از این رو پس از مقایسه دقت این ابزار در برآورد تابش نقطه‌ای و برآورد دو پارامتر کسر پخشیده و تراگسیلایی جو، تابش سالانه به صورت منطقه‌ای در کل منطقه مورد بررسی برای ارزیابی پراکنش مکانی تابش با این ابزار برآورد شد. برای مشاهده پراکنش مکانی تابش در سطح منطقه، ابتدا تابش منطقه‌ای به صورت فصلی برآورد شد. شکل ۸ نتایج تابش فصلی برآورد شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که بیشترین تابش ورودی به سطح زمین در فصل تابستان و کمترین آن در فصل زمستان رخ می‌دهد. این امر با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در ایستگاه‌ها مطابقت دارد (جدول ۳). طبق جدول ۳ تابش تجمعی

را پیشنهاد کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از ترکیب مدل رقمی زمین و تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند برآورد تابش کل را در مناطقی که هیچگونه ایستگاه اندازه‌گیری برای تابش وجود ندارد، بهبود بخشد.

۴ نتیجه‌گیری

تاکنون برآورد تابش کل دریافت شده در سطح زمین به‌طور غالب بر مدل‌های ساده نظیر آنگستروم و آنگستروم-پریسکات استوار بوده است. افزون بر این، اغلب برآوردها به صورت ایستگاهی و نقطه‌ای هستند که به سهولت قابل تعمیم به مناطق دیگر نیستند و نمی‌توان به راحتی برآوردهای نقطه‌ای حاصل را به پهنه تبدیل

تحلیل تابش نیاز به دو پارامتر کسر پخشیده (k) و تراگسیلایی جو^(۲) است. برای برآورد این دو پارامتر هم نیاز به مقادیر اندازه‌گیری شده تابش در ایستگاه‌های اندازه‌گیری تابش در یک منطقه است. در این تحقیق به علت کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده، فقط با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری تابش در مرکز هر استان تابش کل خورشیدی برآورد شد. مسلماً با افزایش ایستگاه‌های تابش در منطقه می‌توان برآورد دقیق‌تری از دو پارامتر فوق و در نتیجه برآورد دقیق‌تری از تابش کل به دست آورد. از آنجاکه تأسیس ایستگاه‌های اندازه‌گیری به سهولت در هر محلی امکان‌پذیر نیست، باتلس و همکاران (۲۰۰۸) برای برآورد این دو پارامتر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای



شکل ۹. تابش کل سالانه برآورد شده به روش تحلیلی در منطقه مورد بررسی (مگاوات ساعت بر متر مربع): (الف) جهت شیب، (ب) نقشه ارتفاع، (ج) تابش کل سالانه برآورد شده و (د) نقشه سایه‌روشن منطقه.

همین امر می‌تواند دقت داده‌های ورودی به نرم‌افزار GIS را تحت تأثیر قرار دهد.

پس از ارزیابی دقت روش تحلیلی تابش در برآورد تابش کل، تابش سالانه مربوط به سال ۲۰۰۷ در سطح منطقه مورد بررسی با این ابزار و با استفاده از مدل رقمی منطقه با تفکیک مکانی ۳۰۰ متر برآورد شد. نتایج محاسبات نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار تابش با مقادیر $2/87 MWh.m^{-2}$ و $1/22 MWh.m^{-2}$ به ترتیب در شیب‌های جنوبی و شمالی منطقه اتفاق می‌افتد. دریافت بیشتر تابش جمعی در شیب‌های جنوبی در نیمکره شمالی از جمله کشور ایران به علت هندسه حرکت خورشید در آسمان (از طلوع تا غروب آفتاب) در طول سال امری بدیهی است. نتایج همچنین نشان داد که تابش دریافتی در هر ایستگاه وابستگی کمتری با ارتفاع دارد و بیشتر تحت تاثیر مقدار شیب و جهت شیب موانع اطراف قرار دارد.

با توجه به اینکه نرم‌افزار مورد استفاده (ArcGIS) در حال حاضر Open Source نیست، لذا به راحتی قابلیت برنامه‌نویسی ندارد و به همین علت امکان حساسیت‌سنجی و تشخیص منابع خطا برای آن فراهم نیست. این نقاط ضعف، ارزیابی خطاها را در ایستگاه‌های گوناگون مشکل می‌سازد.

منابع

معینی، س.، جوادی، ش.، کوکبی، م. و دهقان منشادی، م.، ۱۳۸۹، برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه: نشریه انرژی ایران، ۱۳(۲)، ۱۳۴-۱۴۸.

موسوی بایگی، م.، اشرف، ب. و میان‌آبادی، آ.، ۱۳۸۹، بررسی مدل‌های مختلف برآورد تابش خورشیدی به‌منظور معرفی مناسب‌ترین مدل در یک اقلیم نیمه‌خشک: نشریه آب و خاک، ۲۴(۴)، ۴۸-۵۷.

نمود. به منزله اولین تلاش در ایران، در این تحقیق پارامترهای موردنیاز روش تحلیل تابش (تراگسیلایی جو و کسر پخشیده) برای برآورد تابش در ۴ استان ایران با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده تابش ۲۰۰۷ در ایستگاه‌های هم‌مدیدی واقع در ۴ استان، برآورد شد. سپس تابش کل در ۴ ایستگاه تابش‌سنجی به روش تحلیلی برآورد و نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد تا بتوان دقت نرم‌افزار را در برآورد نقطه‌ای تابش، مورد بررسی قرار داد. تحلیل‌های آماری نشان داد که روش تحلیل تابش با ضریب تعیین $R^2 = 0/71$ دقت مناسبی در برآورد تابش کل خورشیدی دارد. به علت کمبود ایستگاه‌های تابش‌سنجی در کشور و پوشش ناکافی داده‌های هواشناسی موردنیاز در منطقه مورد بررسی، امکان تولید پهنه مکانی تابش با داده‌های میدانی تابش و مدل‌های تجربی وجود ندارد. تحت چنین شرایطی، ابزار تحلیلی تابش GIS گزینه مناسب و مقرون به صرفه‌ای برای تولید پهنه تابش است. در این تحقیق بهترین برآورد با روش تحلیلی GIS در ایستگاه اصفهان با RMSE و MBE ۸/۸ و یک درصد به‌دست آمد. این در حالی است که در بقیه ایستگاه‌ها دامنه خطای برآورد بیشتر از مقدار ذکر شده بود. علت وقوع تفاوت خطا در شهرهای متفاوت را می‌توان به عوامل گوناگونی نسبت داد. برای مثال رطوبت بیشتر هوا در منطقه شیراز می‌تواند دقت برآورد را در این اقلیم کاهش دهد. وجود توپوگرافی پیچیده در برخی مناطق مانند کرمان در مقایسه با اصفهان که از همگنی جغرافیایی بهتری برخوردار است می‌تواند دقت برآورد تابش کل را در کرمان کاهش دهد. در این تحقیق فرض شده است که داده‌برداری تابش، ابرناکی، ساعت‌های آفتابی و دیگر پارامترهای جو طبق استاندارد WMO با خطای سامان‌مند مشابهی صورت گیرد. عملاً تأیید فرض فوق با توجه به وجود ابزارهای دستی (غیر خودکار) و دخالت نیروی انسانی (دیدبان) عملاً امکان‌پذیر نیست.

- Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista: Computers and Electronics in Agriculture, **37**, 25-35.
- Gastli, A., and Charabi, Y., 2010, Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 790-797.
- Martinez-Durban, M., Zarzalejo, L. F., Bosch, J. L., Rosiek, S., Polo, J., and Batlles, F. J., 2009, Estimation of global daily irradiation in complex topography zones using digital elevation models and METEOSAT images: Comparison of the results: *Energy Conversion and Management*; **50**, 2233–2238.
- Moon, P., and Spencer, D. E., 1987, Illumination from a non-uniform sky: *Trans. Illum. Eng. Soc.*, **37**, 707–726.
- Piedallu, C., and Gegout, J., 2008, Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models: *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1696–1706.
- The ArcGIS 9.3 Software package. developed by the Environmental Systems Research Institute (ESRI), California.
- Tovar, J., Olmo, F. J., Alados-Arboledas, L., 1995, Local scale variability of solar radiation in mountainous region: *Journal Appl Meteorol.*, **34**, 2316–22.
- Wenjun, T., Kun, Y., Jie, H., and Jun, Q., 2010, Quality control and estimation of global solar radiation in China: *Solar Energy*, **84**, 466–475.
- Addiscott, T. M., and Whitmore, A. P., 1987, Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring: *Journal. Agric. Sci. (Cambr)*, **109**, 141-15.
- Batlles, F. J., Bosch, J. L., Tavor-Pescador, J., Martinez-Durban, M., Ortega, R., and Miralles, I., 2008, Determination of atmospheric parameter to estimate global radiation in areas of complex topography: Generation of global irradiation map: *Energy Conversion and Management*, **49**, 336-345.
- Berninger, F., 1994, Simulated irradiance and temperature estimates as a possible source of bias in the simulation of photosynthesis: *Agric Forest Meteorol*, **71**, 19–32.
- Blumthaler, M., Ambach, W., and Ellinger, R., 1997, Increase in solar UV radiation with altitude: *J. Photochem Photobiol*, **39**, 130–4.
- Bosch, J. L., Batlles, F. J., Zarzalejo, L. F., and Lopez, G., 2010, Solar resources estimation combining digital terrain models and satellite images techniques: *Renewable Energy*, **35**, 2853-2861.
- Fox, D., 1981, Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion models performance: *Bull, Am. Meteorol. Soc.*, **62**, 599-609.
- Fu, P., and Rich, P. M., 2002, A geometric solar irradiation model and its applications in the agriculture and forestry. In: *Proceedings of*