

جغرافیا و توسعه شماره ۵۱ تابستان ۱۳۹۷

وصول مقاله: ۹۵/۱۱/۱۲

تأیید نهایی: ۹۶/۰۳/۲۸

صفحات: ۱۷۴-۱۵۹

## برآورد تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین در استان اصفهان با مدل برد و هول استورم

دکتر زهرا حجازی زاده<sup>۱</sup>، علیرضا کربلانی درئی<sup>۲\*</sup>، محمد رضا کربلانی<sup>۳</sup>

### چکیده

هدف از مطالعه حاضر برآورد تابش دریافتی سطح زمین با استفاده از مدل برد و هول استورم در استان اصفهان است. نتایج به دست آمده از این مدل با روش زمین آماری (کوکریجینگ) در سطح این استان پهنه بندی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل برد و هول استورم، توانایی خوبی در برآورد میزان تابش در این استان دارد؛ به طوری که بیشترین مقدار تابش مستقیم برای آسمان صاف (IB) مربوط به ماه جولای با مقدار  $36/77 \text{ MJ/m}^2$  است. تابش پراکنده در آسمان صاف ( $I_{DF}$ ) در فصل زمستان و پاییز کمترین مقدار را دارد؛ به طوری که در ماه ژانویه با مقدار  $5/68 \text{ MJ/m}^2$  کمترین و در ماه ژوئن و جولای با مقدار  $6/34 \text{ MJ/m}^2$  بیشترین تابش دریافتی را دارند. مقدار تابش مستقیم روزانه دریافتی سطح زمین ( $H_B$ ) و تابش پراکنده روزانه دریافتی سطح زمین ( $H_{DF}$ ) در ماه جولای و تابش کل روزانه دریافتی سطح زمین ( $H$ ) در ژوئن، بیشترین مقدار را دارند. به طور کلی به نظر می رسد عواملی که سبب شده تا بیشترین مقادیر تابشی در فصل تابستان وجود داشته باشد، ارتفاع خورشید و همچنین افزایش ساعات آفتابی و قرارگیری ایران در استیلای پرفشار جنب حاره است. نتایج برآورد شده نشان می دهد که فصل زمستان و پاییز در ماه های دسامبر و ژانویه دارای کمترین مقدار تابش دریافتی سطح زمین بوده، همچنین بیشترین مقدار دریافتی در این استان در ماه ژوئیه است. متوسط مقدار تابش دریافتی در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب  $16/91$ ،  $27/37$ ،  $27/04$  و  $15/93 \text{ MJ/m}^2$  است. واژه های کلیدی: تابش دریافتی، ساعت آفتابی، برد و هول استورم، مگاژول بر مترمربع.

Hejazizadeh@khu.ac.ir  
std\_karbalaee@khu.ac.ir  
m.karbalaee@mail.sbu.ac.ir

۱- استاد اقلیم شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران  
۲- دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران\*  
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد لیزر، دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

## مقدمه

انرژی خورشیدی از مهمترین انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران است که با وجود پتانسیل فراوان ایران برای استفاده از این انرژی، هم‌اکنون به‌طور جدی از این انرژی استفاده نمی‌شود. کشور ایران دارای مناطق بیابانی است که پتانسیل قابل توجهی برای استفاده از انرژی خورشیدی دارد. امروزه افزایش جمعیت در جهان باعث محدود شدن منابع انرژی شده و اثرات زیست‌محیطی زیادی به بار آورده است. توجه جهان به انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر شده است؛ به‌طور مثال کشور آلمان با وجود اینکه در عرض‌های بالای جغرافیایی قرار دارد، طرح استفاده از انرژی خورشیدی را شروع کرده است. هدف این مقاله محاسبه انرژی تابشی خورشید به زمین و بررسی مناطق قابل استفاده از این انرژی است. ویژگی‌های این انرژی، ارزان بودن، دائمی بودن، بی‌خطر بودن، نداشتن آلودگی زیستی و... است. از آنجاکه منابع نفتی تجدیدناپذیراند، با احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌توان از انرژی تجدیدپذیر خورشید، برق تولید کرده و به کشورهای همسایه منتقل کرد که یک نوع درآمدزایی برای دولت محسوب می‌شود.

تابش خورشیدی از ایمن‌ترین، مؤثرترین و اقتصادی‌ترین منابع انرژی است که پتانسیل تبدیل شدن به منبع اصلی انرژی در آینده نه چندان دور را دارد. برآورد و تخمین اشتباه تابش دریافتی، بزرگترین ریسک در پروژه ایجاد یک سایت خورشیدی است. مجریان همواره نیازمند بررسی منبع تابش برای تعیین مکان مناسب سایت خورشیدی و در پی آن تولید انرژی برق هستند. استفاده بهینه از انرژی خورشیدی نیازمند مکان‌یابی دقیق سایت خورشیدی است. تخمین تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین کاربردهای زیادی در علوم معماری، مهندسی انرژی، کشاورزی و هیدرولوژی و... دارد (Almorox & Hontoria, 2004: 1529).

از دهه ۱۹۷۰ که کاربرد انرژی خورشیدی به‌صورت جدی‌تر مطرح شد، در اقصی نقاط جهان، مطالعه وسیع و قابل توجهی درباره میزان تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین و برآورد آن صورت گرفت و مدل‌های مناسبی با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی مناطق مختلف ارائه شد (Samimi, 1994: 401). انرژی برای جوامع بشری از دیرباز دارای اهمیت بوده و در سال‌های اخیر با پیشرفت تکنولوژی و پیشرفت صنعت، جایگاه مهمی در زندگی انسان‌ها پیدا کرده است. فزون بودن و ارزان بودن انرژی حاصل سوخت‌های فسیلی، باعث شده که انسان در استفاده از این انرژی تجدیدپذیر بازماند. در سال‌های اخیر کمبود نفت و افزایش آلودگی‌های زیستی باعث شده تا کشورهای توسعه‌یافته به فکر استفاده کردن از این انرژی پاک بیفتند. کشور ما با توجه به پتانسیلی که دارد نباید فقط به استفاده از انرژی‌های فسیلی بپردازد؛ بلکه باید از تکنولوژی‌های حاضر استفاده کرده و انرژی خورشیدی را به انرژی‌های قابل استفاده در زندگی خود تبدیل کند.

خورشید منبع اصلی انرژی سیاره زمین است. در زمینه برآورد انرژی تابشی خورشید تحقیقاتی انجام شده است که شامل موارد زیر است.

الیس و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۵)، مدلی را برای محاسبه تابش خورشید روی توپوگرافی‌ها و پهنه‌بندی تابش خورشید ارائه کردند (Olseth, 1995: 475).

طغرل و اونات<sup>۲</sup> (۱۹۹۹) با استفاده از شش پارامتر دمای هوا، تابش خورشیدی، ساعت آفتابی، فشار هوا، میزان ابرناکی و دمای خاک، یک مدل رگرسیون خطی چندمتغیره برای تخمین تابش در منطقه الازیگ<sup>۳</sup> ترکیه ارائه نمودند (Togrul & Onat, 1999: 1577).

1-Olseth  
2-Togrul and Onat  
3-Elazig

خورشید در کشاورزی، شهرسازی، معماری و چشم‌انداز فناوری استفاده از انرژی خورشید را بیان می‌کنند.

باکیرسی<sup>۴</sup> در کشور ترکیه برای مدل‌سازی و برآورد میزان تابش خورشیدی از عواملی مانند میزان ساعات آفتابی، بارش، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، دما و فشار هوا استفاده کرده است (Bakirci, 2009: 2580).

صفاری‌پور و مهرابیان<sup>۵</sup> (۲۰۱۱) در شهر کرمان برای پیش‌بینی میانگین مقدار کل تابش خورشیدی روزانه از یک رابطه رگرسیون خطی با تأثیر دادن هفت پارامتر جغرافیایی و هواشناسی استفاده کردند (Safaripour and Mehrabian, 2011: 1537).

یزدان‌پناه و همکاران (۱۳۸۹) در اصفهان به برآورد تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین پرداختند. در این بررسی از مدل‌های مختلف، با شاخص‌های رایج MBE و RMSE مقایسه شده است، نتایج نشان داد ضرایب رگرسیون برای مدل‌های فرر و ام‌سی‌کلوج ۰/۶ و ۰/۷ است. این مدل برای ماه‌های می و آگوست دقت بسیار بالایی دارد و خطای آن کمتر از ۲- درصد بیان شده است (یزدان‌پناه و همکاران، ۱۳۸۹: ۹۵).

معینی و همکاران (۱۳۸۹)، با محاسبه ضرایب ثابت اقلیمی و وارد کردن آن در مدل بهینه‌شده انگستروم، تابش خورشیدی را برای ۲۱ ایستگاه در ایران برآورد کردند؛ اما اندک بودن تعداد پارامترهای اقلیمی در مدل رفع نشد. در این پژوهش اثر پارامترهای اقلیمی و محیطی، به‌ویژه رطوبت نسبی، بر کاهش تابش کل دریافتی سطح‌زمین در ایستگاه‌های میناب و بندرعباس بررسی می‌شود (معینی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱).

فتح‌نیا و رجایی (۱۳۹۴)، به برآورد اثر پارامترهای هواشناسی با تأکید بر تغییرات رطوبت نسبی، بر کاهش تابش دریافتی سطح زمین به‌منظور ایجاد سایت‌های خورشیدی پرداخته‌اند. در این پژوهش اثر

سوزن<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۴)، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به برآورد پتانسیل تابش خورشیدی در ترکیه پرداخته‌اند. آنان در مطالعه خود از داده‌های هواشناسی و جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، ماه، میانگین ساعت آفتابی و میانگین دما) ۱۷ ایستگاه ترکیه به‌مدت سه‌سال برای ورودی مدل خود بهره گرفتند (Sozne et al., 2005: 367).

راماچندرا<sup>۲</sup> (۲۰۰۶)، در مقاله‌ای تحت عنوان تعیین پتانسیل انرژی خورشیدی با استفاده از GIS چنین بیان میکند که پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر و قابلیت دسترسی به این منابع نیاز به بررسی دارد که سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور (RS) در مقیاس‌های مکانی و زمانی و تقاضا از منابع تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی برای آن کمک می‌کند. وی با استفاده از GIS نقشه پتانسیل انرژی خورشیدی در ایالت کارانتکای هند را برای بهره‌برداری از این انرژی تهیه کرد (Ramachandra, 2006: 101-114). ایشان ضمن تجزیه و تحلیل نقشه‌های به‌دست‌آمده، مناطق و نواحی مستعد را شناسایی و میزان تابش رسیده به آن‌ها را به‌دست آورد (به‌نقل از خسروی و همکاران، ۱۳۹۲).

سبزی‌پرور<sup>۳</sup> (۲۰۰۸)، با گنجاندن ارتفاع، تعداد روزهای گردوغبار و وردایی فصلی مسافت زمین تا خورشید در مدل‌های صباغ، پالتریج و دانشیار، تابش خورشیدی را برای سطوح افقی در شهرهای مختلف بیابان‌های خشک مرکزی ایران محاسبه کرد و به این نتیجه رسید که مدل اصلاح‌شده صباغ برآورد بهتری با خطای کمتر از ۲ درصد دارد (Sabziparvar, 2008: 1002).

طاوسی (۱۳۹۰)، به بررسی کاربرد اقلیمی تابش خورشیدی در برنامه‌ریزی محیطی پرداخته است. ایشان مفاهیمی همچون برنامه‌ریزی محیطی، انرژی خورشیدی، محاسبه زاویه تابش، کاربرد انرژی تابشی

4-Bakirci

5-Safaripour and Mehrabian

1-Sozne

2-Ramachandra

3-Sabziparvar

تخمین میزان تابش خورشیدی روزانه، براساس تفاوت بین دمای حداکثر و دمای حداقل (مدل‌های بریستو-کمپبل، هارگریوز، سامانی، لی و چن) است. نتایج این پژوهش نشان داد که این مدل‌ها در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب دارای دقت بیشتری است؛ بنابراین استفاده از این مدل‌ها برای تخمین تابش خورشیدی روزانه در مناطق خشک ایران که تنها داده‌های دمای هوای در دسترس است، توصیه می‌شود (فرجی‌مهپاری و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۷).

غلام‌نیا و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی مدل‌سازی و پهنه‌بندی انرژی خورشیدی دریافتی در سطح زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی ایران پرداخته‌اند. بدین‌منظور در این پژوهش، با استفاده از دماهای پنج‌گانه در مقیاس زمانی روزانه، ابتدا از یک مدل ریاضی معتبر برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، میزان  $RS$  ۵۰ ایستگاه هواشناسی که در آن‌ها میزان تابش خورشیدی ثبت نمی‌شود، برآورد شده است. نتایج نشان داد به‌طورکلی در منطقه مورد مطالعه، به تبعیت از تأثیر عرض جغرافیایی در تغییرات مکانی  $RS$ ، میانگین انرژی تابشی دریافتی در سطح زمین در همه فصول از شمال به جنوب افزایش یافته و در فصول گرم، مقادیر  $RS$  بیشتر از فصول سرد است (غلام‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۳۹۴).

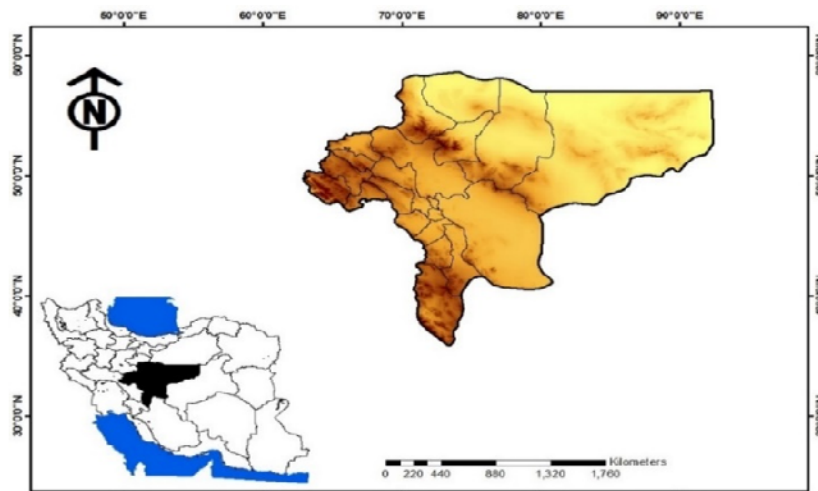
#### منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان با مساحت ۱۰۷۰۴۵ کیلومتر مربع (معادل ۶/۵۷ درصد از مساحت کشور) بین ۳۰ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی در بخش مرکزی ایران در جلگه‌ای حاصلخیز و پربرکت واقع شده است.

پارامترهای هواشناسی (طول روز، جرم جو، فشار هوا، آب قابل بارش، آلبدوی جو، مقدار جذب در جو و مقدار جذب به وسیله ازن) به‌خصوص رطوبت نسبی و عوامل محیطی (ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی) بر کاهش تابش کل دریافتی در ایستگاه‌های بندرعباس و میناب در دوره زمانی ۲۰۰۹-۲۰۰۶، روزانه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد، بیشترین مقدار تابش کل دریافتی برای ایستگاه میناب در ماه ژوئیه و حدود  $48/14 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$  و برای ایستگاه بندرعباس در ماه می و حدود  $197/13 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$  است. ایستگاه میناب به دلیل تابش کل دریافتی بیشتر از بندرعباس، توان بیشتری در تولید انرژی برای ایجاد سایت خورشیدی داشته‌باشد (فتح‌نیا و رجایی، ۱۳۹۴: ۴۹۷).

فیروز مجرد و همکاران (۱۳۹۴) به برآورد تابش خورشیدی در استان کرمانشاه پرداخته‌اند. در این پژوهش با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه در دوره زمانی ۲۰۰۹-۱۹۹۰ استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد بین مقادیر تابش اندازه‌گیری شده با پیرانومتر و مقادیر برآورد شده توسط مدل اختلاف کمی وجود دارد که نشان‌دهنده توانایی مدل در برآورد تابش است. کمترین مقادیر تابش دریافتی ماهانه منطقه در ماه‌های ژانویه و دسامبر رخ می‌دهد که از ۹ تا ۱۳ مگاژول بر مترمربع در نقاط مختلف استان متغیر است (فیروز مجرد و همکاران، ۱۳۹۴: ۵۵).

فرجی‌مهپاری و همکاران (۱۳۹۴)، به ارزیابی مدل‌های تجربی برآورد تابش خورشیدی روزانه برپایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران پرداخته‌اند. هدف از این مطالعه، ارزیابی عملکرد پنج مدل تجربی



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه استان اصفهان

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱: موقعیت نسبی ایستگاه‌های مورد بررسی

ردیف	ایستگاه‌ها	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع ایستگاه
۱	اصفهان	۵۱/۶۶۷	۳۲/۶۱۷	۱۵۵۰/۴
۲	کیوتر آباد	۸۵۰/۵۱	۳۲/۵۱۷	۱۵۴۵
۳	کاشان	۴۵۰/۵۱	۳۳/۹۸۳	۹۸۲/۳
۴	اردستان	۵۲/۳۸۳	۳۳/۳۸۳	۱۲۵۲/۴
۵	داران	۵۰/۳۶۷	۳۲/۹۶۷	۲۲۹۰
۶	شرق اصفهان	۵۱/۸۶۷	۳۲/۶۶۷	۱۵۴۳
۷	نابین	۵۳/۰۸۳	۳۲/۸۵۰	۱۵۴۹
۸	گلپایگان	۵۰/۲۸۳	۳۳/۴۶۷	۱۸۷۰
۹	خور	۵۵/۰۸۳	۳۳/۷۸۳	۸۴۵
۱۰	شهرضا	۵۱/۸۳۳	۳۱/۹۸۳	۱۸۴۵/۲

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

### داده‌ها و روش‌ها

در مطالعه تابش خورشیدی نمی‌توان تمام عناصر مؤثر را در معادلات وارد نمود؛ در نتیجه برای تخمین میزان تابش خورشیدی تنها از تعداد محدودی از پارامترهای اقلیمی استفاده می‌شود. مهمترین پارامتر که در بیشتر معادلات تجربی برآورد تابش خورشیدی از آن استفاده می‌گردد، ساعات آفتابی است. گرچه بسیاری از محققان در مدل‌های تجربی خود علاوه بر ساعات آفتابی، از پارامترهایی همچون رطوبت نسبی، ارتفاع، عرض جغرافیایی و دما بهره برده‌اند، لیکن

تحقیقات نشان داده است که ساعات آفتابی مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده میزان تابش خورشیدی است. (مجرد و همکاران، ۱۳۹۴: ۵۶).

دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری تابش خورشیدی استفاده از پیرانومتر است که به علت نبود امکانات و هزینه زیاد، کمتر از آن استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری تابش کل دریافتی، تنها ایستگاه‌های اندکی در سطح جهان از این ابزار استفاده می‌کنند؛ بنابراین، محاسبه تابش خورشیدی به‌جای استفاده از وسایل آب و هواشناسی، کاری طبیعی به‌نظر می‌رسد

تابش مستقیم روزانه دریافتی سطح زمین  $\theta$  زاویه سمت الرأس خورشید  $H_{DF}$  تابش پراکنده روزانه دریافتی سطح زمین، و  $I_s$  و  $I_g$  به ترتیب آبدوی جو و آبدوی زمین هستند. مقدار  $H_B$  تابش مستقیم (روزانه دریافتی سطح زمین) با رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$HB = I_B \left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{رابطه ۳:}$$

$I_B$  تابش مستقیم برای آسمان صاف است که خود با رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$IB = 0.9662I_0(T_M - a_w)T_A \quad \text{رابطه ۴:}$$

$I_0$  ثابت خورشیدی به میزان ۱۳۶۷ وات بر مترمربع،  $T_M$  قابلیت انتقال گازهای اتمسفری به جز بخار آب،  $T_A$  قابلیت انتقال به علت جذب و پخش توسط ذرات،  $a_w$  ضریب جذب بخار آب است.  $T_M$  قابلیت انتقال گازهای اتمسفری از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

رابطه ۵:

$$T_M = 1.041 - 0.15[m(9.368 * 10^{-4}p + 0.051)]^{\frac{1}{2}}$$

$m$  جرم توده هوا و  $p$  فشار مطلق محلی است. مقدار  $m$  با رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

رابطه ۶:

$$m = [\cos\theta + 0.15(93.885 - \theta z)^{-1.25}]^{-1}$$

$\theta$  زاویه سمت الرأس خورشید بر حسب درجه است و برابر  $\theta_z$  با سینوس ارتفاع خورشید منهای ۹۰ است.  $T_A$  قابلیت انتقال به علت جذب و پخش به وسیله ذرات با رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

رابطه ۷:

$$T_A = \exp(-\tau_A^{0.873}(1 + -\tau_A - \tau_A^{0.7088})m^{0.9108})$$

$m$  جرم توده هواست  $\tau_A$  ضریب کدورت است؛ این ضریب از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

(Almorox & Hontoria, 2004: 1530). در نتیجه محققان امروزه برای تخمین آن با استفاده از پارامترهای مؤثر اقلیمی و محیطی تلاش می‌کنند (Belcher & DeGaetano, 2007: 330). نخستین بار انگستروم میانگین روزانه شدت انرژی خورشیدی برای روزهای ابری روی سطح افق را از رابطه (۱) محاسبه کنند (Angstrom, 1940: 122).

$$Rs = a + b\left(\frac{n}{N}\right)Ra \quad \text{رابطه ۱:}$$

$Rs$  تابش کل دریافتی در سطح افق،  $Ra$  مقدار ثابت تابش در خارج از جو،  $b$  و  $a$  ضرایب اقلیمی،  $n$  ساعت آفتابی و  $N$  پتانسیل ساعت آفتابی در روز مورد مطالعه است.

در این مدل بسیاری از پارامترهای جوی مانند مقدار رطوبت، آبدوی جو، آبدوی زمین، جذب و پخش ذرات جو، اثر گازها و بخار آب جو، ازن و... در نظر گرفته نشده است. چنین پارامترهایی نقش اساسی در مقدار تابش کل دریافتی دارند. این مدل را بعدها دیویس و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۸۸) برای محاسبه مقدار تابش، با نام مدل  $MAC$  اصلاح کردند، ولی نقص این مدل استفاده نکردن از ساعات ابری و آفتابی در محاسبه مقدار تابش کل دریافتی در سطح زمین بود. برد و هول استورم (Bird & Hulstrom, 1981:3)، معادله‌هایی با توجه به اثر پارامترهای جوی ارائه کردند که به شرح زیر است (Safaripour & Mehrabian, 2011: 1537). برای تخمین تابش کل روزانه دریافتی در سطح زمین از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$H = (H_B \cos \theta + H_{DF}) / (1 - \tau_g \tau_s) \quad \text{رابطه ۲:}$$

معادله  $H$ ، تابش کل روزانه دریافتی در سطح زمین است که از پارامترهای مختلفی تشکیل شده است  $H_B$

$$H_{DF} = I_{DF} \left( \frac{n}{N} \right) + K^* \left( 1 - \left( \frac{n}{N} \right) \right) (I_B + I_{DF}) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در آن مقدار ثابت  $K^*$  برابر است با  $0.32$ ،  $n$  تعداد ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده در طی روز و  $N$  تعداد ساعات آفتابی بالقوه نجومی در روز مورد مطالعه است (طول روز) که براساس فصل، سال و زاویه خورشید متغیر است.

$I_{DF}$  تابش پراکنده برای آسمان صاف است که با رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود (Bird & Hulstrom, 1981:8).

رابطه ۱۵:

$$I_{DF} = I_0 (\cos \theta) (0.79) T_0 T_W T_{UM} T_{AA} [0.5(1 - T_R) + B_a(1 - T_{AS})] / [1 - m + (m)^{1.02}]$$

که در آن  $T_0$  قابلیت انتقال به وسیله ازن،  $T_W$  بخار آب،  $T_{UM}$  اکسیژن و دی‌اکسید کربن،  $T_A$  قابلیت انتقال به علت جذب و پخش توسط ذرات،  $T_{AA}$  قابلیت انتقال به علت جذب توسط ذرات،  $T_R$  قابلیت انتقال به علت پخش ریلی، است.  $B_a$  درصد تابش پراکنده در سطح زمین تحت تأثیر ذرات معلق سطحی (مقدار ثابت  $0.84$ ).

$T_0$  قابلیت انتقال به وسیله ازن، از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$T_0 = 1 - \frac{0.161 X_0 (1 + 139.48 X_0)^{-0.3035}}{0.00271 X_0 + 1.0 + 0.0044 X_0 + 0.0003 X_0^2} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$X_0$  مقدار ازن توده هواست که با رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$X_0 = 0.3 \text{ m} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$T_W$  قابلیت انتقال به وسیله بخار آب، از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$T_W = 1 - a_w \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$a_w$ : ضریب جذب بخار آب.

رابطه ۸:

$$\tau_A = 0.2758 \tau_{A(0.38)} + 0.35 \tau_{A(0.50)}$$

$$\tau_{A(0.38 \mu m)} = 0.35$$

$$\tau_{A(0.50 \mu m)} = 0.27$$

$a_w$  ضریب جذب بخار آب است که با رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

رابطه ۹:

$$a_w = 2.4959 \text{ m } U_w [(1.0 + 79.03 \text{ m } U_w)^{0.6824} + 6.385 \text{ m } U_w]^{-1}$$

$m$  جرم توده هوا و  $U_w$  آب قابل بارش در یک ستون عمودی است. مقدار  $U_w$  براساس رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود (Barnes, 1996):

رابطه ۱۰:

$$U_w = 0.493 * \left( \frac{RH}{100} \right) * \text{Exp}(26.23 - 5416/T)/T$$

در رابطه فوق،  $RH$  رطوبت نسبی و  $T$  دمای محیط است.  $r_s$  و  $r_g$  به ترتیب آلدوی جو و آلدوی زمین‌اند که مقدار  $r_g$  ثابت و برابر  $0.2$  است و مقدار  $r_s$  از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

رابطه ۱۱:

$$r_s = 0.0685 + (1 - B_a)(1 - T_{AS})$$

مقدار  $B_a$  ثابت و برابر  $0.84$  است و  $T_{AS}$  از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$T_{AS} = 10^{-0.045[p/p_0]m} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

مقدار  $p$  و  $p_0$  از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود:

رابطه ۱۳:

$$\frac{p}{p_0} = \exp \left( \frac{h}{1000(-0.174 - 0.0000017h)} \right)$$

$h$  مقدار ارتفاع ایستگاه از سطح دریا و  $p$  فشار مطلق محلی است همان ( $QFF$ )

مقدار  $H_{DF}$  تابش پراکنده روزانه دریافتی سطح زمین، با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$\omega_s$  زاویه ساعتی خورشید در هنگام غروب از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\theta \tan\delta) \quad \text{رابطه ۲۴:}$$

$E_0$  از رابطه (۲۵) برآورد می‌شود:

$$E_0 = (1 + 0.033 \cos \frac{360n^*}{365}) \quad \text{رابطه ۲۵:}$$

در رابطه فوق  $n^*$  مجموع روزها از اول ژانویه تا روز مورد نظر تابش مستقیم خورشید بر روی سطح افقی از رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود:

رابطه ۲۶:

$$I_d = I_0 * \cos\theta * 0.9662 * T_r * T_0 * T_{UM} * T_w * T_A$$

در رابطه فوق مقدار  $T_r$  از رابطه (۲۷) برآورد می‌گردد  
رابطه ۲۷:

$$T_r = \text{EXP}(-0.0903 * mp^{0.84} * (1 + mp - mp^{1.01}))$$

$mp$  از رابطه (۲۸) به دست می‌آید:

$$m * P/1013 \quad \text{رابطه ۲۸:}$$

$m$  جرم توده هواست  $P$  فشار هوا (QFF)

تابش خورشیدی بر روی سطح افقی از پراکندگی اتمسفری با رابطه (۲۹) برآورد می‌شود:

رابطه ۲۹:

$$I_{as} = I_0 * \cos\theta * 0.79 * T_A * a_w * T_0 * T_{UM}$$

مجموع جهانی تابش خورشید بر روی سطح افقی از رابطه (۳۰) برآورد می‌شود:

$$.(\text{Bird \& Hulstrom, 1981: 8})$$

$$IT = (I_d + I_{as}) / (1 - r_g * Ba) \quad \text{رابطه ۳۰:}$$

$T_{UM}$  قابلیت انتقال به وسیله اکسیژن و دی‌اکسیدکربن که از رابطه (۱۹) استفاده می‌شود:

$$T_{UM} = \exp(-0.127m^{0.26}) \quad \text{رابطه ۱۹:}$$

که در آن  $m$  جرم توده هواست.

$T_{AA}$  قابلیت انتقال به علت جذب با ذرات از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$T_{AA} = 1 - 0.1(1 - T_A)(1 - m + m^{1.06}) \quad \text{رابطه ۲۰:}$$

که در آن  $m$  جرم توده هواست،  $T_A$  قابلیت انتقال به علت جذب و پخش با ذرات و  $T_R$  قابلیت انتقال به علت پخش ریلی است که از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$T_R = \exp(-0.093m^{0.84}) \quad \text{رابطه ۲۱:}$$

که در آن  $m$  جرم توده هواست و مقدار  $T_{AS}$  از نسبت مقدار  $T_A$  به  $T_{AA}$  به دست می‌آید. با استفاده از روابط گفته شده می‌توان به بررسی محاسبه شدت تابش براساس مدل برد و هول استورم<sup>۱</sup> پرداخت. با استفاده از رابطه (۲۲) شدت تابش بر روی یک صفحه توان افقی در بالای جو برحسب  $\text{MJ/m}^2$  را می‌توان برآورد کرد:  
رابطه ۲۲:

$$H_0 = \frac{24I_0E_0}{\pi} (\cos\theta \cos\delta \sin\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180} \sin\theta \sin\delta)$$

در رابطه فوق:

$$I_0 \text{ ثابت خورشیدی برابر } 1367 \text{ W/m}^2$$

$\delta$  مدار میل خورشید که از رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$\delta = 23.45 \sin(360 \frac{284 + n^*}{365}) \quad \text{رابطه ۲۳:}$$

در رابطه فوق  $n^*$  مجموع روزها از اول ژانویه تا روز مورد نظر



اقلیمی برآورد گردیده. ورودی‌های مورد نیاز جهت محاسبه مدل به صورت جدول (۲) است که در آن از متغیر دما، فشار، رطوبت نسبی و ساعت آفتابی نشان داده شده است. این جدول به‌طور نمونه فقط برای ایستگاه اصفهان بیان می‌گردد. به دلیل اینکه حجم جدول‌ها و محاسبات بسیار زیاد است؛ در این مبحث فقط به ایستگاه اصفهان پرداخته می‌شود. نتایج سایر ایستگاه‌ها در اشکال (۲) و (۳) نشان داده خواهد شد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار دما و ساعت آفتابی و کمترین مقدار رطوبت نسبی و فشار مربوط به ماه جولای است.

هدف از تحقیق حاضر برآورد و ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی میزان تابش دریافتی سطح زمین در استان اصفهان، با استفاده از مدل بهینه‌شده برد و هول‌استورم است. این مدل اغلب پارامترهای مؤثر بر تابش دریافتی از جمله پخش، جذب، بخار آب، جرم جو، آلودگی جو و... را مدنظر قرار می‌دهد.

### نتایج و بحث

در این تحقیق برای برآورد میزان تابش دریافتی سطح زمین در استان اصفهان از داده‌های روزانه ۱۰ ایستگاه سینوپتیک منطقه استفاده شده است. مقادیر تابش خورشیدی با مدل برد و هول‌استورم به صورت روزانه با در نظر گرفتن ویژگی‌های مکانی و ویژگی‌های

جدول ۲: میانگین‌های ماهانه متغیرهای اقلیمی در ایستگاه اصفهان (۱۹۵۱ تا ۲۰۱۰)

ماه	ژانویه	فبریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
میانگین دمای هوا (سانتی‌گراد)	۳/۴	۶/۲	۱۰/۷	۱۶	۲۱/۱	۲۶/۵	۲۹	۲۷/۴	۲۳/۳	۱۷	۱۰/۱	۵
میانگین رطوبت نسبی (به درصد)	۶۰	۵۰	۴۲	۳۹	۳۴	۲۵	۲۵	۲۵	۲۸	۳۷	۵۰	۶۰
میانگین ساعت آفتابی	۶/۶	۷/۷۴	۸/۲۱	۸/۳۶	۹/۹۵	۱۱/۶۳	۱۱/۲۷	۱۱	۱۰/۴۲	۹/۰۷	۷/۴۶	۶/۳۳
فشار (هکتوپاسکال)	۱۰۲۰/۹	۱۰۱۷/۲	۱۰۱۳/۲	۱۰۱۰/۲	۱۰۰۷	۱۰۰۰/۲	۹۹۷/۲	۱۰۰۰/۳	۱۰۰۶/۵	۱۰۱۴/۵	۱۰۱۹/۳	۱۰۲۱/۶

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

شد تا محاسبات نشانگر قابل قبول بودن تخمین‌ها باشد؛ به‌طور نمونه محاسبات برای اولین روز در ژانویه به صورت جدول (۳) خواهد بود.

برای محاسبات پارامترهای مختلف، در جهت برآورد تابش‌های خورشیدی از روش ساعتی برای هر روز در طی یک سال استفاده شد. برای تمامی ماه‌ها مقادیر به صورت ساعتی در نرم‌افزار اکسل برنامه‌نویسی

جدول ۳: نمونه سطرهای ابتدا و انتهای آرایه پارامترهای اولیه و مقادیر تابش های ماه ژانویه

ردیف	ماه	روز	ساعت	مقدار تابش (G <sub>h</sub> )	SING	Gz	زاویه دید	m	X0	TM	TA	aw	TQ	Tw	Tum	TAA	TR	TAS	Tas-TAS	rs	IB	IOF	HB	HDF	H		
1	ژانویه	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
	ژانویه	۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
	ژانویه	۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ژانویه	۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ژانویه	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
11	ژانویه	۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
	ژانویه	۱۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
	ژانویه	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

بارش به بیشترین مقدار، یعنی ۶۵۰/۱ می‌رسد و کمترین آن در ماه ژانویه با مقدار ۸۲۳/۰ مشاهده می‌شود. جدول (۵) نتایج محاسبات پارامترهای مختلف مؤثر بر تابش را در ایستگاه اصفهان نشان می‌دهد.

یکی از ساختارهای جوی که بسیار بر مقدار انرژی تابشی رسیده به سطح زمین اثرگذار است، مقدار رطوبت قابل بارش در جو است.  $Uw$  ضریب احتمالی مقدار آب قابل بارش است (Leckner, 1978: 148). با توجه به جدول (۴) در ماه جولای مقدار آب قابل

جدول ۴: مقدار آب قابل بارش ایستگاه اصفهان

ماه	ژانویه	فبریه	مارس	آوریل	می	ژوئیه	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
UW	-/۸۲	-/۸۳	-/۹۳	۱/۲۰	۱/۴۲	۱/۴۳	۱/۶۵	۱/۵۱	۱/۳۳	۱/۲۱	۱/۰۶	-/۹۲

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

قابلیت انتقال به وسیله بخار آب ( $X_0$ ) در ماه ژانویه بیشترین مقدار و در ماه ژوئیه کمترین مقدار را دارد. در فصل زمستان به علت وجود بخار آب فراوان در جو، این انتقال نسبت به فصل تابستان بیشتر است. قابلیت انتقال گازهای اتمسفری ( $T_M$ ) در ماه جولای بیشترین مقدار و در ماه ژانویه کمترین مقدار را دارد. دیگر پارامترهای مختلف مؤثر بر تابش در جدول (۵) نشان داده شده است.

زاویه میل خورشید ( $\delta$ )، در ماه ژوئیه به بیشترین مقدار (۲۳/۲۵) و در ماه دسامبر به کمترین مقدار می‌رسد. کاهش زاویه میل خورشید و افزایش زاویه ساعتی ( $\omega$ )، باعث افزایش تعداد ساعات آفتابی ( $n$ )، کاهش مقدار فشار هوا ( $p$ ) و جرم هوا ( $m$ ) می‌شود که نتیجه این عوامل باعث افزایش مقدار تابش در سطح زمین است. بیشترین مقدار جرم موجود در هوا مربوط به ماه‌های ژانویه و دسامبر است.

جدول ۵: نتایج به دست آمده از پارامترهای مختلف مؤثر بر تابش با استفاده از مدل برد هول استورم در ایستگاه اصفهان به صورت متوسط روزانه

ماه	ژانویه	فبریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
$\delta$	-۲۱/۱	-۱۳/۲	-۲/۰۲	۹/۹۷	۱۹/۲۶	۲۳/۲۵	۲۱/۱۸	۱۳/۱۲	۱/۶۱	-۱۰/۳	-۱۹/۴	-۲۳/۲
$m$	۱۱/۲۹۱	۵/۲۵۶	۲/۷۲۷	۴/۳۹۵	۲/۲۷	۱/۸۳۳	۱/۸۲۸	۲/۲	۳/۶۹۸	۵/۶۹	۴/۷۴۸	۱۰/۵۰۴
$x_o$	۳/۵۲۶	۱/۷۰۶	۰/۹۳۶	۱/۳۱۸	۰/۶۸۱	۰/۵۵	۰/۵۴۸	۰/۶۶	۱/۱۰۹	۱/۷۰۷	۱/۵۶۱	۳/۲۹۳
$T_M$	۱/۱۷۲	۱/۱۲۵	۱/۰۵۳	۰/۹۴۹	۰/۹۰۷	۰/۸۸۷	۰/۹۰۱	۰/۹۵	۱/۰۱۴	۱/۰۸۹	۱/۱۹۶	۱/۲۰۴
$T_A$	۰/۷۲۴	۰/۷۲۸	۰/۷۵۲	۰/۶۰۵	۰/۶۳۲	۰/۶۴۱	۰/۶۵۴	۰/۶۷۱	۰/۶۶۳	۰/۶۵۴	۰/۷۹۱	۰/۷۴۸
$a_w$	۰/۳۳۹	۰/۳۰۷	۰/۲۷۵	۰/۱۲۵	۰/۱۱۴	۰/۱۰۸	۰/۱۱۳	۰/۱۱۹	۰/۱۳۳	۰/۱۵	۰/۳۳۹	۰/۳۴۹
$T_o$	۱/۲۰۹	۱/۱۵۱	۱/۰۶۹	۰/۹۶۹	۰/۹۲	۰/۸۹۶	۰/۹۱	۰/۹۶۲	۱/۰۲۲	۱/۱۱۷	۱/۲۲۲	۱/۲۴
$T_w$	۱/۱۴۷	۱/۰۷۷	۰/۹۹۳	۰/۸۸۶	۰/۸۳۳	۰/۸۱۲	۰/۸۲۱	۰/۸۷	۰/۹۳۸	۱/۰۲	۱/۱۳۴	۱/۱۷۱
$T_{UM}$	۱/۰۹۵	۱/۰۳۶	۰/۹۶۳	۰/۸۵۷	۰/۸۱۴	۰/۷۹۴	۰/۸۰۷	۰/۸۵۱	۰/۹۱۲	۰/۹۸۶	۱/۰۹۹	۱/۱۲۲
$T_{AA}$	۱/۰۰۸	۱/۰۹۴	۱/۰۵۳	۰/۹۱۸	۰/۹۰۶	۰/۸۸۷	۰/۹۰۲	۰/۹۴۹	۰/۹۹۸	۱/۰۵۱	۱/۱۷۸	۱/۰۶۳
$T_R$	۰/۹۳۳	۰/۹۳۹	۰/۹۲۷	۰/۷۸۶	۰/۷۹۱	۰/۷۸۵	۰/۷۹۹	۰/۸۳۳	۰/۸۵۶	۰/۸۸۳	۱/۰۱۴	۰/۹۶۳
$T_{AS}^{as}$	۰/۷۴۸	۰/۷۵۸	۰/۷۷۷	۰/۶۳۱	۰/۶۵۵	۰/۶۶۲	۰/۶۷۵	۰/۶۹۵	۰/۶۹۱	۰/۶۸۶	۰/۸۲۲	۰/۷۴۴
$r_s$	۰/۳۵۹	۰/۳۲۵	۰/۲۸۴	۰/۱۳	۰/۱۱۲	۰/۱۰۴	۰/۱۰۵	۰/۱۱۵	۰/۱۳۴	۰/۱۵۸	۰/۳۴	۰/۳۷۱

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

قابلیت انتقال گازهای اتمسفری ( $T_M$ ) و قابلیت انتقال به علت جذب و پخش توسط ذرات ( $T_A$ ) بیشترین مقادیر آن مربوط به ماه جولای است. ضریب جذب بخار آب ( $a_w$ ) به علت افزایش فشار در زمستان و پاییز بیشتر است و در تابستان مقدار آن کاهش می یابد.

در جدول (۶) نتایج پارامترهای مختلف مؤثر بر تابش به صورت ماهانه نشان داده شده است. از نظر جرم هوا ( $m$ ) و قابلیت انتقال به وسیله بخار آب ( $X_o$ ) بیشترین مقدار مربوط به ماه ژانویه و کمترین آن مربوط به ماه جولای است. کاهش جرم هوا سبب این امر می شود.

جدول ۶: نتایج به دست آمده از پارامترهای مختلف مؤثر بر تابش با استفاده از مدل برد هول استورم در ایستگاه اصفهان به صورت ماهانه

ماه	ژانویه	فبریه	مارس	آوریل	می	ژوئیه	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
$\delta$	-۲۱/۱	-۱۳/۲	-۲/۰۲	۹/۹۷	۱۹/۲۶	۲۳/۲۵	۲۱/۱۸	۱۳/۱۲	۱/۶۱	-۱۰/۳	-۱۹/۴	-۲۳/۲
$m$	۱۱۴	۵۶/۹۸	۳۲/۲۵	۵۶/۵۲	۳۱/۱۴	۲۵/۹	۲۵/۴۳	۲۸/۹۲	۴۴/۸۸	۶۳/۲	۴۸/۶۸	۱۰۳/۷
$x_o$	۳۵/۵۹	۱۸/۴۹	۱۱/۰۸	۱۶/۹۶	۹/۳۴	۷/۷۷	۷/۶۳	۸/۶۸	۱۳/۴۶	۱۸/۹۶	۱۶/۰۱	۳۲/۵۱
$T_M$	۱۱/۸۳	۱۲/۲	۱۲/۴۶	۱۲/۲	۱۲/۴۵	۱۲/۵۳	۱۲/۵۴	۱۲/۴۹	۱۲/۳	۱۲/۱	۱۲/۲۷	۱۱/۸۹
$T_A$	۷/۳۱	۷/۸۹	۸/۸۹	۷/۷۹	۸/۶۷	۹/۰۶	۹/۱	۸/۸۲	۸/۰۵	۷/۲۶	۸/۱۱	۷/۳۹
$a_w$	۳/۴۳	۳/۳۳	۳/۲۵	۱/۶۱	۱/۵۶	۱/۵۳	۱/۵۷	۱/۵۷	۱/۶۱	۱/۶۷	۳/۳۷	۳/۴۴
$T_o$	۱۲/۲	۱۲/۴۸	۱۲/۶۵	۱۲/۴۶	۱۲/۶۲	۱۲/۶۷	۱۲/۶۷	۱۲/۶۴	۱۲/۵۳	۱۲/۴۱	۱۲/۵۳	۱۲/۲۵
$T_w$	۱۱/۵۷	۱۱/۶۷	۱۱/۷۵	۱۱/۳۹	۱۱/۴۴	۱۱/۴۷	۱۱/۴۳	۱۱/۴۳	۱۱/۳۹	۱۱/۳۳	۱۱/۶۳	۱۱/۵۶
$T_{UM}$	۱۱/۰۶	۱۱/۲۳	۱۱/۳۹	۱۱/۰۲	۱۱/۱۷	۱۱/۲۲	۱۱/۲۳	۱۱/۱۹	۱۱/۰۸	۱۰/۹۵	۱۱/۲۷	۱۱/۰۸
$T_{AA}$	۱۰/۱۸	۱۱/۸۶	۱۲/۴۵	۱۱/۸۱	۱۲/۴۳	۱۲/۵۴	۱۲/۵۴	۱۲/۴۸	۱۲/۱۱	۱۱/۶۸	۱۲/۰۸	۱۰/۵
$T_R$	۹/۴۲	۱۰/۱۸	۱۰/۹۷	۱۰/۱۱	۱۰/۸۶	۱۱/۰۹	۱۱/۱۲	۱۰/۹۶	۱۰/۳۹	۹/۸۱	۱۰/۳۹	۹/۵۱
$T_{AS}^{as}$	۷/۵۶	۸/۲۱	۹/۱۹	۸/۱۲	۸/۹۹	۹/۳۵	۹/۳۹	۹/۱۳	۸/۳۸	۷/۶۲	۸/۴۳	۷/۳۴
$r_s$	۳/۶۲	۳/۵۲	۳/۳۶	۱/۶۷	۱/۵۳	۱/۴۷	۱/۴۷	۱/۵۱	۱/۶۳	۱/۷۵	۳/۴۸	۳/۶۶

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

مقدار تابش مستقیم روزانه دریافتی سطح زمین ( $H_B$ ) و تابش پراکنده روزانه دریافتی سطح زمین ( $H_{DF}$ ) در ماه جولای به بیشترین مقدار و تابش کل روزانه دریافتی سطح زمین ( $H$ ) در ژوئیه بیشترین مقدار را دارد. به طور کلی به نظر می‌رسد عواملی که سبب شده‌اند بیشترین مقادیر تابشی در فصل تابستان باشد، ارتفاع خورشید و همچنین افزایش ساعات آفتابی و قرارگیری ایران در استیلای پرفشار جنب حاره است.

باتوجه به محاسبات جدول (۷) از نظر متوسط ماهانه، بیشترین مقدار تابش مستقیم برای آسمان صاف ( $IB$ ) مربوط به ماه جولای با مقدار ۷۷/۳۶ مگاژول بر متر مربع در  $MJ/m^2$  است. مقادیر مربوط به تابش پراکنده در آسمان صاف ( $I_{DF}$ ) در فصل زمستان و پاییز کمترین مقدار را دارد؛ به طوری که در ماه ژانویه با مقدار ۶۸/۵ کمترین و در ماه ژوئیه و جولای با مقدار ۴۳/۶ مگاژول بر مترمربع بیشترین مقدار را دارد.

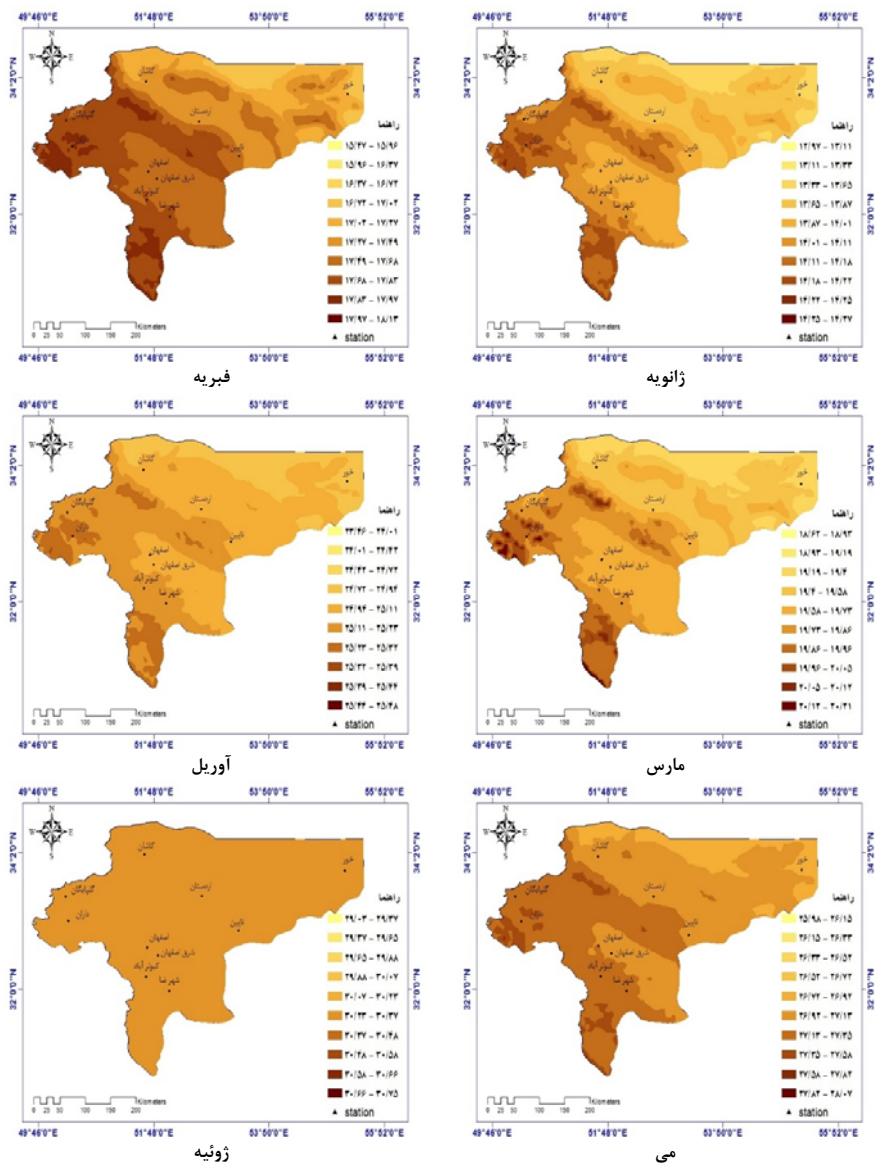
جدول ۷: متوسط روزانه تابش‌های خورشیدی مختلف بر اساس مدل برد وهول ستورم ایستگاه اصفهان ماهانه  $MJ/m^2$

ماه	ژانویه	فبریه	مارس	آوریل	می	ژوئیه	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
$IB$	۲۳/۱	۲۵/۶	۲۹/۸۲	۳۱/۵۱	۳۵/۰۲	۳۶/۷۴	۳۶/۷۷	۳۵/۶۳	۳۲/۴۷	۲۹/۰۶	۲۶/۳۱	۲۳/۳۹
$I_{DF}$	۵/۶۸	۶/۱۱	۶/۸۵	۵/۵	۶/۱۳	۶/۴۳	۶/۴۳	۶/۲۳	۵/۶۸	۴/۹۶	۶/۲۴	۵/۷۲
$H_B$	۱۵/۸	۱۸/۸۴	۲۱/۳۳	۲۰/۵۱	۲۵/۴۲	۳۰/۲۷	۲۹/۸۳	۲۹/۸۶	۲۷/۸۹	۲۳/۷۴	۱۹/۶۵	۱۵/۷
$H_{DF}$	۷/۱۶	۷/۴۷	۸/۵۶	۷/۷۲	۸/۰۶	۷/۷۳	۷/۸۳	۷/۳۹	۶/۶	۶/۰۴	۷/۵۸	۷/۲۷
$H$	۱۳/۴	۱۶/۰۱	۱۹/۸۶	۲۱/۵۸	۲۶/۲۵	۳۰/۰۶	۲۹/۹۲	۲۸/۹۷	۲۵/۷۱	۲۰/۳۵	۱۶/۸	۱۳/۶

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

مشاهده می‌گردد. بیشترین مناطق تابشی منطبق بر ارتفاعات است. به طور متوسط مقدار تابش دریافتی سطح زمین در زمستان برابر ۱۶/۹۱ مگاژول بر متر مربع است. مقدار تابش در فصل بهار نسبت به فصل زمستان کمی متفاوت‌تر است. به طور کلی در این فصل ارتفاع خورشید افزایش یافته و مقدار تابش بیشتری به سطح زمین می‌رسد. در ماه آوریل این فصل، کمترین مقدار تابشی مربوط به شهرضا و بیشترین مقدار مربوط به ایستگاه شرق اصفهان است. در ماه می، نیمه شرقی استان دارای مقدار کمتری از تابش دریافتی است. در این ماه بیشترین مقدار تابش مربوط به ایستگاه گلپایگان و کمترین مقدار آن مربوط به کاشان است. در ماه ژوئیه اکثر مناطق استان دارای مقدار تابش زیادی است و فقط ایستگاه کاشان دارای مقدار تابش کمتری نسبت به بقیه ایستگاه‌هاست. به طور متوسط در فصل بهار مقدار تابش دریافتی سطح زمین برابر ۲۷/۳۷ مگاژول بر متر مربع است.

بر اساس ارقام برآورد شده، با روش کوکریجینگ نقشه‌های پهنه‌بندی ایستگاه‌های استان اصفهان تهیه گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل (۲) کمترین مقدار تابش دریافتی سطح زمین در ماه ژانویه مربوط به ایستگاه خوروبابانک است با ارتفاع ایستگاه (۸۴۵ متر) که دارای مقدار تابش ۱۲/۹۶ مگاژول بر مترمربع است و بیشترین مقدار تابش دریافتی مربوط به ایستگاه داران با ارتفاع ۲۲۹۰ متر با مقدار ۱۴/۲۶ مگاژول بر متر مربع در این ماه است. در ماه فبریه ایستگاه کبوترآباد دارای بیشترین مقدار تابش دریافتی و خورو بیابانک کمترین مقدار را دارد. در ماه مارس، بیشترین مقدار مربوط به ایستگاه اصفهان و کمترین مقدار مربوط به ایستگاه کاشان است. به طور کلی بالاترین مقدار تابش دریافتی در فصل زمستان مربوط به بخش‌های مرکزی و غربی و جنوبی استان اصفهان است که به نظر می‌رسد علت آن ارتفاعات این مناطق باشد که با استفاده از شکل (۱)



شکل ۲: تابش دریافتی سطح زمین، فصل زمستان و بهار در استان اصفهان

با مدل، برد و هول استورم برحسب MJ/m<sup>2</sup>/Day

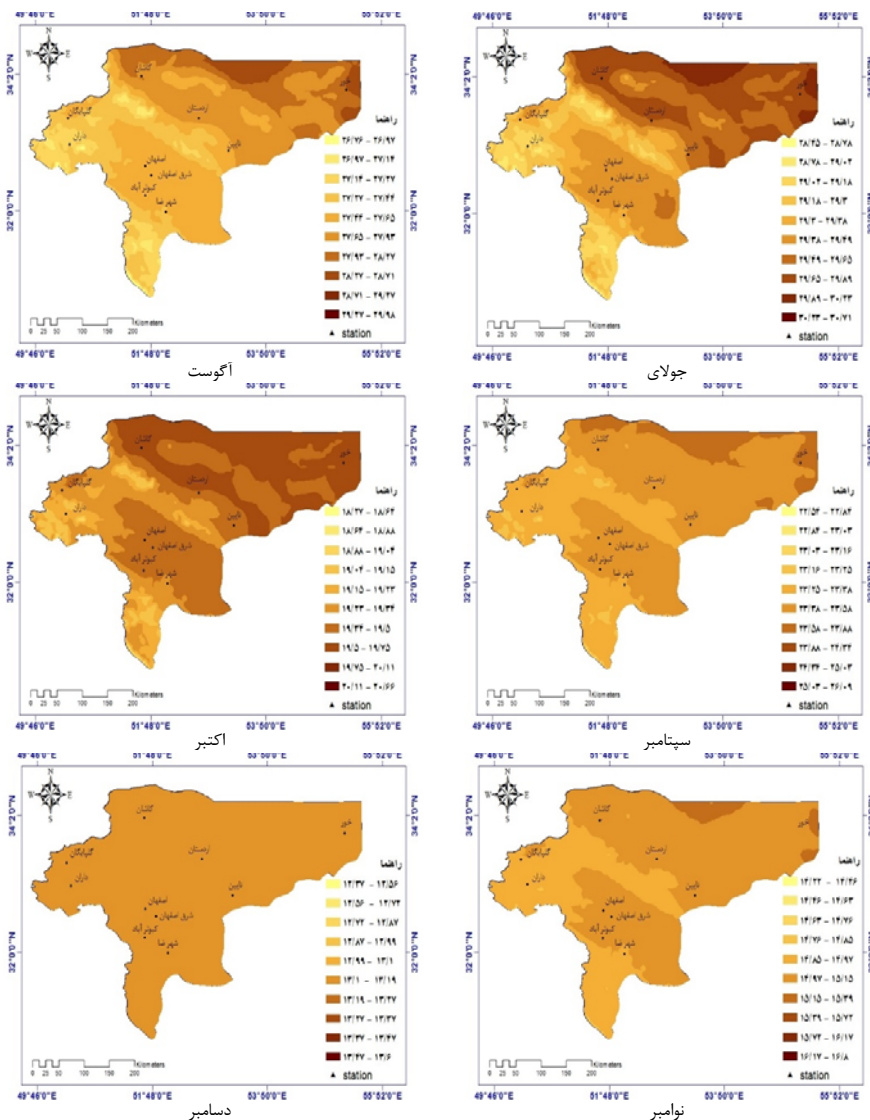
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

تابستان بیشتر متأثر از ساعت آفتابی و زاویه تابش خورشید است. از طرفی ورود عوامل بیرونی مانند توده هوا تقریباً قطع می‌شود و هوای پرفشار جنب حاره‌ای بر منطقه حاکم می‌شود. از طرف دیگر زاویه تابش در عرض‌های جنوبی استان اصفهان بیشتر و ضخامت اتمسفر کمتر از عرض‌های شمالی است. مقدار تضعیف تابش در حین عبور از اتمسفر به‌طول مسیری

در اواخر فصل بهار و اوایل فصل تابستان با حداکثر شدن ارتفاع خورشید، مناطق پست و کویری دارای مقدار انرژی تابشی بالاتری نسبت به مناطق مرتفع است. در این فصل ماه‌های ژوئیه و جولای بیشترین مقدار انرژی تابشی خورشید را دارند و علت اصلی آن دریافت تابش مستقیم در بیشتر مناطق است. میزان تابش رسیده به سطح زمین در فصل

متوسط در این فصل مقدار تابش دریافتی ۲۷/۰۴ مگاژول بر متر مربع است. بعد از ماه جولای رفته رفته از ارتفاع خورشید کاسته می‌شود. در فصل پاییز بیشترین مقدار تابش دریافتی مربوط به ایستگاه خور و بیابانک است. به طور متوسط مقدار تابش دریافتی در فصل پاییز به ۱۵/۹۳ مگاژول بر متر مربع می‌رسد (شکل ۳).

(ضخامت اتمسفر) که می‌پیماید بستگی دارد؛ زیرا پوشش گازی زمین بخش مهمی از تابش خورشید را جذب می‌کند و بخش مهم دیگری را به اطراف پخش می‌کند. این عامل علاوه بر کاهش کمیت نور، بر کیفیت آن نیز اثر دارد. مقدار تضعیف تابش در اتمسفر تابع قانون بیر است (حیدری نبی و همکاران، ۱۳۸۶: ۹). در این فصل بیشترین مقدار تابش دریافتی مربوط به نواحی شرقی و جنوبی استان است. به طور



شکل ۳: تابش دریافتی سطح زمین، فصل زمستان و بهار در استان اصفهان با مدل، برد و هول استورم بر حسب MJ/m<sup>2</sup>/Day تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

## نتیجه

زمین در ماه جولای به بیشترین مقدار و تابش کل روزانه دریافتی سطح زمین ( $H$ ) در ژوئیه بیشترین مقدار را دارد. نتایج برآورد شده تابش دریافتی سطح زمین در استان اصفهان نشان می‌دهد که کمترین مقدار دریافت انرژی در فصل زمستان و پاییز مربوط به ماه‌های دسامبر و ژانویه است، بیشترین مقدار دریافتی در این استان در ماه ژوئیه و متوسط مقدار تابش دریافتی در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب  $۷۳/۱۶$ ،  $۲۶/۱۵$ ،  $۳۰$  و  $۱۷/۴۲$  مگاژول بر متر مربع است.

مقایسه نتایج این پژوهش در برآورد مقادیر تابش سطح زمین با نتایج تحقیق‌های صفاری‌پور و مهربان (۲۰۱۱) در کرمان، مدل بردو هول استورم، مجرد و همکاران (۱۳۹۴) در کرمانشاه و فتح نیا و رجایی (۱۳۹۴) در برآورد اثر پارامترهای هواشناسی با تأکید بر تغییرات رطوبت نسبی بر کاهش تابش دریافتی سطح زمین در بندرعباس، گواهی بر صحت نسبی این پژوهش است. در پایان بهتر است عواملی مانند پوشش گیاهی، جنس خاک و میزان ابرناکی نیز در برآورد مدل‌ها مورد توجه قرار گیرند.

## منابع

- حیدری‌نسی، مهران (۱۳۸۶). برآورد تابش روزانه خورشید با استفاده از متغیرهای هواشناسی (مقایسه یافته‌های شبکه عصبی مصنوعی با سایر مدل‌ها)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی آب و خاک. دانشگاه تهران.
- خسروی، محمود؛ سعید جهانبخش؛ جعفر درخشی (۱۳۹۲). برآورد و پهنه‌بندی تابش خورشیدی دریافتی در سطح افقی با استفاده از پارامترهای اقلیمی در محیط GIS (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی)، جلد ۱۳، شماره ۴۳، صفحات ۶۳-۳۹.
- طاوسی، تقی (۱۳۹۰). کاربرد اقلیمی تابش خورشیدی در برنامه‌ریزی محیطی، انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان.

باتوجه به محدودیت منابع انرژی فسیلی که در حدود ۹۰ درصد از انرژی موردنیاز کشورهای صنعتی و بخش وسیعی از مصارف سایر کشورهای جهان را تشکیل می‌دهد، راهکارهای متفاوتی برای مقابله با بحران احتمالی و تأمین انرژی آینده جهان در نظر گرفته شده است. بدین‌منظور امروزه به استفاده از انرژی‌های تجدیدشونده، به‌ویژه انرژی خورشیدی توجه زیادی شده است و همگان را بر آن داشته تا مقدار انرژی تابشی دریافتی سطح زمین را با دقت بالایی برآورد کنند. پارامترهای بسیاری در میزان تابش کل دریافتی سطح زمین مؤثر است. بعضی از این عوامل ماهیت اقلیمی دارند و بعضی از آن‌ها محیطی‌اند. در مقایسه با پژوهش یزدان‌پناه و همکاران (۱۳۸۹) در این مطالعه از مدل برد و هول استورم بهره گرفته شده است. در این مدل از پارامترهای ماند طول‌روز، مدار میل، ارتفاع خورشید، آب قابل بارش، رطوبت، جرم هوا، آلدوی جو، مقدار جذب توسط ازن، مقدار جذب در جو، ارتفاع منطقه، فشار هوا، عرض جغرافیایی و... استفاده شده است، که محل مقدار تابش را تقریباً براساس شرایط محیط برآورد می‌کند. براین‌اساس نتایج این مطالعه نشان داد در ایستگاه اصفهان از نظر متوسط ماهانه، بیشترین مقدار تابش مستقیم برای آسمان صاف مربوط به ماه جولای با مقدار  $۳۶/۷۷$  مگاژول بر مترمربع  $MJ/m^2$  است. در فصل تابستان ارتفاع خورشید به بالاترین نقطه خود و ساعت آفتابی به بیشترین مقدار می‌رسد. در فصل زمستان و پاییز، مقادیر مربوط به تابش پراکنده در آسمان صاف کمترین مقدار را دارند؛ به‌طوری‌که در ماه ژانویه با مقدار  $۶۸/۵$  کمترین و در ماه ژوئیه و جولای با مقدار  $۴۳/۶$  مگاژول بر متر مربع بیشترین مقدار را دارند. مقدار تابش مستقیم روزانه دریافتی سطح زمین و تابش پراکنده روزانه دریافتی سطح

- Bird, R. E., & Hulstrom, R. L (1981). Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces (No. SERI/TR-642-761). Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA).
- Barnes, E. M (1996). Estimation of evapotranspiration using advanced very high resolution radiometer (AVHRR) data (Doctoral dissertation, Oklahoma State University).
- Belcher, B. N., & DeGaetano, A. T (2007). A revised empirical model to estimate solar radiation using automated surface weather observations. *Solar Energy*, 81(3), 329-345.
- Davies, J. A., McKay, D. C., Luciani, G. and Abdel-Wahab, M (1988). Validation of Models for Estimating Solar Radiation on Horizontal Surfaces, IEA Task IX, Final Report, Atmospheric Environment Service of Canada, Downsview, Ontario, Canada.
- Leckner, B (1978). The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface-elements of a model, *Solar Energy*, 20, 143-150.
- Olseth, J. A., Skartveit, A., & Zou, H (1995). Spatially continuous mapping of solar resources in a complex high latitude topography. *Solar energy*, 55(6), 475-485.
- Sabziparvar, A. A (2008). A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran, *Renewable Energy*, 33, 1002-1010.
- Samimi, J (1994). "Estimation of height-dependent solar irradiation and application to the Solar climate of Iran", *Solar Energy*, 52: 401-409.
- Safaripour, M. H., & Mehrabian, M. A (2011). Predicting the direct, diffuse, and global solar radiation on a horizontal surface and comparing with real data. *Heat and mass transfer*, 47(12), 1537.
- Sözen, A., Arcaklioglu, E., Özalp, M., & Kanit, E. G (2005). Solar-energy potential in Turkey. *Applied Energy*, 80(4), 367-381.
- Togrul I. T., and Onat E (1999). A study for estimating solar radiation in Elazig using geographical and meteorological data, *Energy Conversion and Management* 40:1577-1584.
- Ramachandra, T. V (2006). Solar energy potential assessment using GIS. *Energy Education Science and Technology*, 18 (1/2), 101.
- غلام‌نیا، اعظم؛ محمدحسین مبین؛ عاطفه جبالی؛ حمید علیپور (۱۳۹۵). مدل‌سازی و پهنه‌بندی انرژی خورشیدی دریافتی در سطح زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی ایران، نشریه آب و خاک. جلد ۳۰. شماره ۴. صفحات ۱۳۰۸-۱۲۹۴.
- فتح‌نیا، امان‌الله؛ سعید رجایی (۱۳۹۴). برآورد اثر پارامترهای هواشناسی با تأکید بر تغییرات رطوبت نسبی بر کاهش تابش دریافتی سطح زمین به‌منظور ایجاد سایت خورشیدی، مجله فیزیک زمین و فضا. شماره ۳. صفحات ۴۹۷-۴۸۷.
- فرجی‌مهباری، خدیجه؛ مجید خانعلی؛ زهرا فرجی‌مهباری (۱۳۹۴). ارزیابی مدل‌های تجربی برآورد تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران، فصلنامه انرژی ایران. شماره ۵۶. صفحه ۱۷.
- مجرد، فیروز؛ امان‌الله فتح‌نیا؛ سعید رجایی (۱۳۹۴). برآورد تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین در استان کرمانشاه، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. شماره ۱۹. صفحات ۶۹-۵۵.
- معینی، سام؛ شهرام جوادی؛ محسن کوکی؛ محسن دهقان‌منشادی (۱۳۸۹). برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه، نشریه انرژی ایران. دوره ۱۳. شماره ۲. صفحات ۱۰-۱.
- یزدان‌پناه، حجت‌الله؛ راضیه میرمجریان؛ حمید برقی (۱۳۸۹). برآورد تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین در اصفهان، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. دوره ۲۱. پیاپی ۳۷. صفحات ۱۰۴-۹۵.
- Almorox, J. and Hontoria, C (2004). Global Solar Radiation Estimation Using Sunshine Duration in Spain, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 9-10, PP. 1529-1535.
- Angstrom, A (1924). Solar and Terrestrial Radiation, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 50, PP: 121-125.
- Bakirci, K (2009). Models of Solar Radiation with Hours of Bright Sunshine; A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Vol. 13, PP. 2580-2588.