

Evaluation of Incoming Solar Radiation Parameter Derived from Empirical and Satellite Models

HAMIDEH NOORY^{1*}, ALI MOKHTARI², MAJID VAZIFEDOUST³

1. Assistant professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
 2. Master graduated student of irrigation and drainage, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
 3. Assistant professor, Water Engineering Department, University of Guilan, Rasht, Iran.
- (Received: March. 11, 2018- Revised: Aug. 12, 2018- Accepted: Oct. 1, 2018)

ABSTRACT

Evapotranspiration is one of the most important processes in water and radiative transfer in hydrological cycle, and the required energy for this process is provided by solar radiation. Therefore, the accuracy of evapotranspiration estimation is strongly depends on the accuracy of solar radiation estimation. This study was conducted to evaluate the different surface solar radiation models such as empirical models (Angstrom and Hargreaves-Samani), physically-based models (NCEP and GLDAS) and a satellite observation model (CM-SAF). The results showed that the calibrated Angstrom model with $R^2=0.9$ and $SEE=2.58$ was the most efficient model. However, the accuracy of this model is strongly depends on the calibration procedure and the existence of sunshine data. The GLDAS model with $R^2= 0.87$ and $SEE=3.5$ was the second most efficient model after calibrated Angstrom model. The GLDAS model, in spite of 10.2% overestimation of surface solar radiation, can be the most efficient model in areas with the lack of meteorological data.

Keywords: Angstrom, CM-SAF, GLDAS, Hargreaves-Samani, NCEP, Surface solar radiati

ارزیابی پارامتر تابش خورشیدی ورودی به زمین حاصل از مدل‌های تجربی و ماهواره‌ای

حمیده نوری^{۱*}، علی مختاری^۲، مجید وظیفه دوست^۳

۱. استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۵/۲۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۷/۹)

چکیده

یکی از مهم‌ترین فرآیندهای انتقال آب و انرژی در چرخه هیدرولوژیکی، تبخیر-تعرق است و تابش خورشیدی انرژی لازم برای انجام این فرآیند را تأمین می‌کند. در نتیجه تخمین هرچه دقیق‌تر میزان تبخیر-تعرق به تخمین دقیق میزان تابش خورشیدی وابسته است. این تحقیق با هدف ارزیابی میزان تابش خورشیدی در سطح زمین حاصل از سه روش معادلات تجربی (مدل‌های آنگستروم و هارگریوز-سامانی) مدل‌های فیزیکی داده‌گویی شده (NCEP/NCAR, GLDAS/Noah) و مشاهدات ماهواره‌ای (CM-SAF) با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد مدل کالیبره شده آنگستروم با ضریب تبیین برابر با ۰/۹ و SEE برابر با ۲/۵۸ بهترین عملکرد را داشته است. اما دقت این مدل وابسته به روش کالیبراسیون و وجود داده‌های ساعات آفتابی است. محصول تابش سطح زمین مستخرج از GLDAS/Noah با ضریب تبیین و SEE به ترتیب برابر با ۰/۸۷ و ۳/۵ بهترین کارایی را بعد از مدل واسنجی شده آنگستروم داشت. مدل GLDAS/Noah با وجود برآورد ۱۰/۲ درصدی تابش خورشیدی بیش از اندازه‌گیری زمینی، در مناطقی که کمبود داده هواشناسی وجود دارد می‌تواند کارایی بسیار خوبی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آنگستروم، هارگریوز-سامانی، CM-SAF, GLDAS/Noah, NCEP/NCAR

مقدمه

تابش خالص در سطح زمین نشان‌دهنده میزان واقعی انرژی دریافت شده توسط زمین است. این انرژی منبع گرمایش و روشنایی زمین است که پارامتر کلیدی در محاسبه تبخیر-تعرق روزانه و دیگر فرآیندهای بیولوژیکی در گیاهان می‌باشد (Rosenberg *et al.*, 1983). گیاهان با بهره‌گیری از آن عمل فتوسنتز را انجام می‌دهند و مواد غذایی تولید می‌نمایند. تابش خالص در سطح زمین از موازنه تابش‌های ورودی و خروجی در سطح زمین محاسبه می‌گردد (رابطه ۱).

رابطه ۱)
$$R_n = (1-\alpha)R_s + RL_{\downarrow} - RL_{\uparrow} - (1-\epsilon_0)RL_{\downarrow}$$
 در این رابطه پارامترهای تابش خالص سطح زمین R_n (Watt.m⁻²)، α ضریب آلبیدوی سطحی (بدون واحد)، R_s تابش سطحی با طول‌موج کوتاه (Watt.m⁻²)، RL_{\downarrow} تابش ورودی به سطح زمین با طول‌موج بلند (Watt.m⁻²)، RL_{\uparrow} تابش خروجی از سطح زمین با طول‌موج بلند (Watt.m⁻²)، ϵ_0 ضریب گسیلندگی سطحی (بدون واحد) هستند. بخش اعظم تابش خالص را تابش خورشیدی تشکیل

می‌دهد و میزان جذب‌شده آن توسط سطح زمین تابعی از آلبیدو است. در تحقیقات پیشین نشان داده شده است که میزان تبخیر-تعرق مرجع به‌شدت به میزان تابش خورشیدی سطح زمین و دمای هوا وابسته است (Jensen, 1985; Wang *et al.*, 2007). از این رو محاسبه دقیق تابش خورشیدی در محاسبات تبخیر-تعرق و در ادامه در محاسبات بیلان آبی بسیار حائز اهمیت است.

با وجود اینکه روش ثابت و تأییدشده‌ای برای دسته‌بندی برآوردهای تابش خورشیدی وجود ندارد (Gueymard and Myers, 2008). روش‌های برآورد تابش خورشیدی R_s به چهار مورد شرح داده شده است (Bojanowski, 2013). ۱. اندازه‌گیری‌های زمینی ۲. معادلات تجربی ۳. مدل‌های فیزیکی ۴. مشاهدات ماهواره‌ای

۱. اندازه‌گیری زمینی دقیق‌ترین روش برای برآورد تابش خورشیدی در سطح زمین است. این کار اصولاً با بهره‌گیری از دستگاه‌های پیرانومتر برای اندازه‌گیری تابش خورشیدی انجام می‌پذیرد (Paulescu *et al.*, 2013). به دلیل حساسیت بالا، این دستگاه‌ها نیازمند واسنجی و نگهداری مستمر هستند (Ohmura *et al.*, 1998). به همین خاطر اندازه‌گیری تابش خورشیدی

* نویسنده مسئول: hnoory@ut.ac.ir

می‌نمایند (Rodell et al., 2004; Schulz et al., 2009). از آنجاکه کمبود داده‌های مشاهداتی برای بسیاری از مناطق وجود دارد و اینکه آشنایی با فرآیندهای طبیعی که در زمین اتفاق می‌افتد محدود است، استفاده از داده‌گذاری (Data Assimilation) در این روش پیشنهاد گردیده است و گفته می‌شود که میزان عدم قطعیت داده‌های ورودی کاهش یافته و نیز دقت پیش‌بینی‌های آب و هوایی افزایش می‌یابد (Zhang and Pu, 2010). داده‌گذاری با استفاده از داده‌های مشاهداتی زمینی و یا داده‌های مشاهداتی ماهواره‌ای صورت می‌گیرد، از این‌رو روش مدل‌های فیزیکی را نمی‌توان کاملاً از روش مشاهدات ماهواره‌ای جدا دانست. از محصولات تابش خورشیدی که با استفاده از مدل‌های فیزیکی داده‌گذاری شده به دست آمده‌اند می‌توان به سیستم داده‌گذاری زمینی آمریکای شمالی، NLDAS (Rodell et al., 2004) اشاره نمود. محصول سیستم داده‌گذاری زمینی جهانی (GLDAS) حاصل پیشرفت این سیستم در سطح جهانی است که داده‌هایی با قدرت تفکیک زمانی ۳ ساعته در اختیار محققین می‌گذارد. پروژه مراکز بین‌المللی برای پیش‌بینی‌های زیست‌محیطی/مرکز ملی تحقیقات جوئی (NCEP/NCAR) (Kalnay et al., 1996) از سال ۱۹۹۱ با هدف مطالعات اقلیمی و استفاده از سیستم داده‌گذاری جهانی تعریف شد و تا به حال در حال ارائه داده‌های مختلف هواشناسی در سطح جهانی است. یکی از ضعف‌های این مدل‌ها قدرت تفکیک مکانی پایین آن‌هاست به طوری که در برخی از مطالعات نشان داده شده است که بعضی از پارامترهای برآورد شده توسط این مدل‌ها در وسعت منطقه‌ای دقت محدودی دارند (Babst et al., 2008). در تحقیقات گذشته تابش خورشیدی GLDAS با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه در دو ایستگاه هواشناسی در چین مورد ارزیابی قرار گرفتند و نشان داده شد که GLDAS مقادیر تابش خورشیدی را کمی بیشتر از حد واقعی برآورد می‌نماید و با اعمال ضریب اصلاحی در منطقه برای فصول گرم و سرد میزان دقت برآورد تابش خورشیدی افزایش یافت (Wang et al., 2011).

۴. از میان سنسورهای ماهواره‌ای که میزان تابش خورشیدی را ارائه می‌دهند می‌توان به سنسورهای بیلان تابش زمینی سوار بر ماهواره NIMBUS-7 (Jacobowitz and Tighe, 1984)، ابر و بیلان انرژی زمین سوار بر ماهواره‌های Terra، Aqua و TRMM (Barkstrom and Smith, 1986)، سنسور بیلان تابش زمین ماهواره زمین-ثابت سوار بر ماهواره‌های Meteorat-8 و Meteorat-9 (Harries et al., 2005)، تصویربردار تقویت‌شده در حال چرخش در طیف مادون قرمز و مرئی مربوط به ماهواره نسل دوم METEOSAT و GOES-R ABI (Laszlo

کاری وقت‌گیر و هزینه‌بر است و در نتیجه امکان نصب آن در تمام ایستگاه‌های هواشناسی وجود ندارد.

۲. معادلات تجربی بر اساس رابطه بین تابش خورشیدی و داده‌های هواشناسی پایه‌گذاری شده‌اند. این داده‌ها به صورت مستقیم یا غیرمستقیم میزان ابری بودن هوا را نشان می‌دهند، زیرا وجود ابر در آسمان مقدار بسیار زیادی از تابش خورشیدی را بازتاب می‌کند و باعث می‌گردد که بخش کمتری از آن به سطح زمین برسد. داده‌های هواشناسی از قبیل ساعات آفتابی روز (Angstrom, 1924) و دمای هوا (Hargreaves and Samani, 1982) هستند. تمام ایستگاه‌های هواشناسی قابلیت اندازه‌گیری ساعات آفتابی روز را ندارند و از این‌رو برای چنین مناطقی راهکار دوم یعنی استفاده از معادلات برآورد تابش خورشیدی با به کارگیری دمای روزانه کاربرد پیدا می‌کند. یکی از بزرگترین محدودیت‌های معادلات تجربی وجود ضرایب وابسته به منطقه است (Abraha and Savage, 2008). امکان کالیبره کردن دقیق این ضرایب به خاطر کمبود داده‌های هواشناسی وجود ندارد. در مناطق مختلف اروپا با اقلیم‌های متفاوت معادله آنگستروم کالیبره شده با استفاده از تابش خورشیدی روزانه ماهواره زمین-ثابت نسل دوم Meteorat دقت بیشتری را نسبت به معادله کالیبره شده هارگریوز-سامانی داشته است (Bojanowski et al., 2013). همچنین مدل کالیبره شده آنگستروم در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی کانادا کارایی بهتری را نسبت به مدل هارگریوز-سامانی در برآورد تابش خورشیدی داشت (Aladenola and Madramootoo, 2014). در سه منطقه با اقلیم‌های متفاوت در چین، نشان داده شد که معادله آنگستروم با RMSE برابر ۱/۹۶ در اقلیم غیر مرطوب عملکرد بهتری دارد (Liu et al., 2014). علاوه بر آن در دو منطقه زاهدان و بجنورد ضرایب معادلات آنگستروم و هارگریوز-سامانی کالیبره شدند و نیز نشان داده شد که در هر دو منطقه معادله آنگستروم با R^2 بالاتر (حدود ۰/۱) و RMSE پایین‌تر (حدود ۱۰ کالری بر مترمربع)، برآورد دقیق‌تری نسبت به معادله هارگریوز-سامانی دارد (Piri and Kisi, 2015).

۳. مدل‌های فیزیکی تنها با به کارگیری مدل‌های انتقال تابش بر پایه قوانین فیزیکی و استفاده از داده‌های فیزیکی سطح زمین، اتمسفر و ابرها که از تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده‌اند میزان تابش خورشیدی را محاسبه می‌نمایند (Inamdar and Guillevic, 2015). این الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن مواردی از قبیل میزان ابرناکی، نوع و ضخامت آبروسول‌ها، میزان بخار آب در اتمسفر، ضخامت لایه ازن و عمق و ضخامت لایه برفی پوشاننده زمین در منطقه، اقدام به برآورد تابش خورشیدی

قطب را با قدرت تفکیک مکانی بسیار پایینی مورد ارزیابی قرار می‌دهند.

هدف از انجام این تحقیق بررسی کارایی دو مدل تجربی بر پایه ساعات آفتابی روز (آنگستروم) و دمای روزانه (هارگریوز-سامانی) و دو مدل فیزیکی داده‌گواری برآورد تابش خورشیدی سطح زمین GLDAS/Noah و NCEP/NCAR و نیز مدل مشاهداتی ماهواره‌ای CM-SAF در دشت قزوین است.

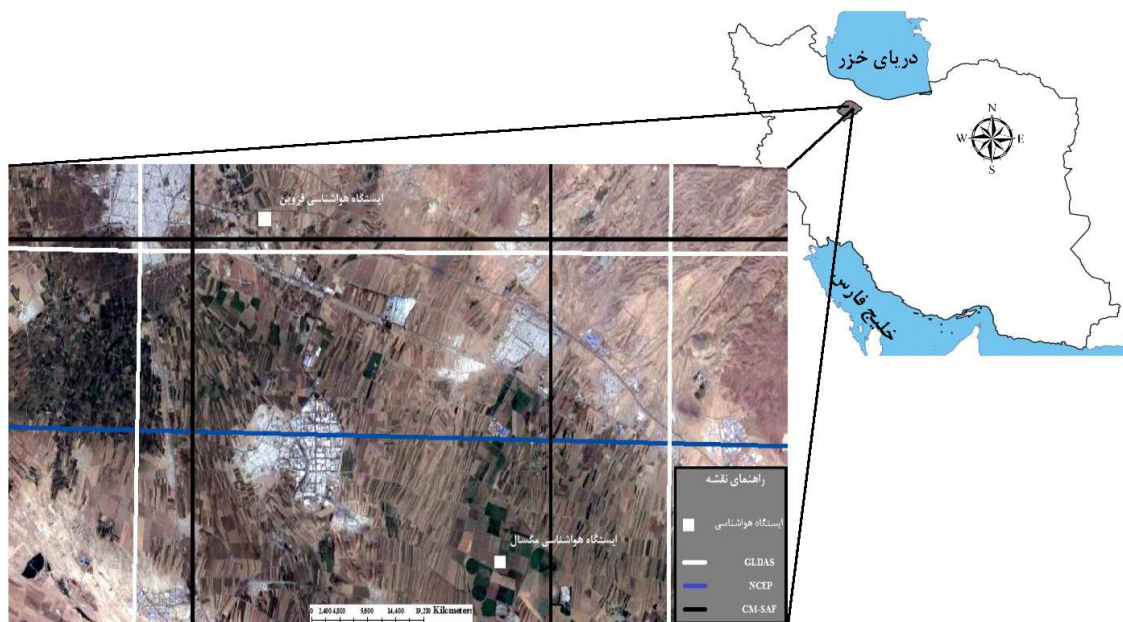
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شبکه آبیاری قزوین واقع است. اقلیم این منطقه خشک (مؤسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه روستایی)، متوسط بارندگی سالانه ۲۵۰ میلی‌متر و متوسط تبخیر آن ۲۲۰۰ میلی‌متر است. ترکیب کشت محصولات این منطقه در کشت پاییزه گندم، جو و کلزا و در کشت بهاره ذرت و چغندر قند است.

داده‌های هواشناسی ساعات آفتابی روز، حداقل و حداکثر دمای روزانه و نیز تابش خورشیدی روزانه از ایستگاه سینوپتیک قزوین با عرض جغرافیایی ۳۶/۲۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰/۰۶ درجه شرقی دریافت شد.

(*et al.*, 2008)، طیف‌سنج تصویربرداری با تفکیک‌پذیری متوسط (Liang *et al.*, 2006)، سنسورهای آزمایش بیلان تابش زمین که توسط ماهواره‌های ERBS، NOAA-9 و NOAA-10 حمل می‌گردند (Barkstrom *et al.*, 1989; Barkstrom *et al.*, 1990)، سنسور ScaRaB سوار بر ماهواره‌های روسی Meteor-3-7 و Resurs-1 (Duvel *et al.*, 2001; Kandel *et al.*, 1998)، تصویربرداری مادون‌قرمز و مرئی Meteosat بر روی ماهواره نسل اول METEOSAT و سنسورهای متعدد دیگر سوار بر ماهواره‌های زمین-ثابت (GOES E، INDOEX، GMS) و GOES W اشاره نمود. اساس برآورد تابش خورشیدی در این روش، رابطه معکوس میان بازتابش بالای اتمسفر که نشان‌دهنده میزان ابری بودن آسمان است، با تابش خورشیدی سطح زمین است (Cano *et al.*, 1986) که دریافت این اطلاعات توسط ماهواره‌ها با عدم قطعیت زیادی ممکن است همراه باشد. از این رو تأثیر این عدم قطعیت‌ها بر روی خروجی، یعنی تابش خورشیدی خواهد بود. به دلیل قدرت تفکیک زمانی بهتر، ماهواره‌های زمین-ثابت نسبت به ماهواره‌های قطب مدار دقت بالاتری را در برآورد تابش خورشیدی دارند (برای مثال ماهواره‌های GOES E and W قدرت تفکیک زمانی ۱ دقیقه دارند). از طرفی این ماهواره‌ها تمام زمین را به صورت یکسان پوشش نمی‌دهند، برای مثال از آنجاکه اغلب، محل قرار گرفتن این ماهواره‌ها بر روی خط استواست، مناطق قطبی و نزدیک به



شکل ۱. مکان پیکسل‌های مربوط به محصولات تابش خورشیدی GLDAS/Noah، NCEP/NCAR و CM-SAF در منطقه مورد مطالعه.

گردید. آنگستروم در رابطه (۲) میزان تابش خورشیدی را وابسته به ساعات آفتابی روز و تابش خورشیدی برون جوی نشان داد:

$$R_s = (a_s + b_s \cdot \frac{n}{N}) R_a \quad (\text{رابطه ۲})$$

مدل‌های تجربی

در این مطالعه از دو مدل آنگستروم (Angstrom, 1924) و هارگریوز-سامانی (Hargreaves and Samani, 1982) استفاده

پیشرفته شامل Noah (Chen et al., 1996)، Mosaic (Koster et al., 1994)، VIC (Liang et al., 2003) و CLM (Dai et al., 2003) و Suarez, 1992) برای محاسبه داده‌های هواشناسی استفاده می‌نماید. در این تحقیق از مدل GLDAS/Noah با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و قدرت تفکیک زمانی ۳ ساعته جهت استخراج تابش خورشیدی سطح زمین استفاده گردید. الگوریتم محاسبه تابش خورشیدی سطح زمین مربوط به این محصول در (Shapiro, 1972) ارائه شده است.

علاوه بر آن محصول NCEP/NCAR نیز به کار گرفته شد. این محصول با استفاده از سیستم داده‌گذاری جهانی (GDAS) و دارا بودن مجموعه داده‌هایی که تا حد امکان کامل شده‌اند و نیز مدل‌های فیزیکی برآورد کننده، میزان تابش خورشیدی را برآورد می‌کند. قدرت تفکیک مکانی در این محصول ۰/۹۴ درجه و داده‌ها به صورت روزانه در اختیار عموم گذاشته شده‌اند.

مشاهدات ماهواره‌ای

در این بخش، محصول تابش سطح زمین حاصل خدمات کاربردی مرکز پایش اقلیمی، SAF-CF (Hollmann et al., 2006) که با هدف تهیه مجموعه داده‌های اقلیمی با بهره‌گیری از تصاویر حاصل از سنسورهای ماهواره نسل دوم METEOSAT و ماهواره‌های مدار قطبی NOAA و METOP ایجاد شده است، مورد ارزیابی قرار گرفت (Hollmann et al., 2006). در تولید این محصول همانند دیگر روش‌های مشاهدات ماهواره‌ای فرض بر این است که میزان تابش خورشیدی در سطح زمین رابطه معکوسی با بازتابش بالای اتمسفر دارد و این بازتابش به میزان ابرناکی آسمان وابسته است.

مجموعه داده و اطلاعات مکانی

مشخصات داده‌های استفاده شده در این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است.

در این رابطه R_a تابش خارج از جو (Watt.m^{-2})، n ساعات آفتابی روز (hr)، N طول روز (hr)، a_s و b_s ضرایب معادله آنگستروم هستند. این دو ضریب در هر منطقه متفاوت است که به صورت پیش‌فرض به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شده‌اند (Allen, 1997). که a_s و b_s به ترتیب در این منطقه برابر ۰/۱۵۵ و ۰/۶۱ در نظر گرفته شد (آقاشریعتمداری، ۲۰۱۱).

مدل هارگریوز-سامانی با استفاده از اختلاف دمای حداکثر و حداقل در روز میزان تابش خورشیدی را برآورد می‌کند. از این رو در غیاب داده ساعات آفتابی روز بهتر است که از مدل‌هایی همچون هارگریوز-سامانی ارائه شده در رابطه (۳) برای برآورد تابش خورشیدی استفاده گردد (Aladenola and Madramootoo, 2014).

$$R_s = K_r(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این رابطه T_{\max} و T_{\min} حداکثر و حداقل دمای روزانه ($^{\circ}\text{C}$) هستند و K_r از معادله (۴) قابل محاسبه است (Allen, 1995).

$$K_r = K_{ra} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.5} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه P و P_0 میانگین فشار جو در منطقه مورد مطالعه (Kpa) و میانگین فشار جو در سطح دریا (Kpa) هستند. K_{ra} ضریب تجربی که برای مناطق ساحلی ۰/۲ و برای مناطق داخلی ۰/۱۷ ارائه شده است.

مدل‌های فیزیکی داده‌گذاری شده

برای این منظور در این تحقیق داده‌های روزانه تابش خورشیدی سطح زمین محصولات GLDAS، NCEP مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های GLDAS که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت به‌عنوان بخشی از مأموریت جمع‌آوری دانش زمینی ناسا بوده است که با همت مرکز خدمات اطلاعات و داده (DISC) دانش‌های زمینی گوآرد (GEOS) ثبت و توزیع شده است. محصولات GLDAS از چهار نوع مدل سطح زمین (LSM)

جدول ۱. مجموعه داده و اطلاعات مکانی شامل داده‌های هواشناسی، نقشه رقومی ارتفاعی و محصولات تابش سطح زمین

| داده | منبع | نام محصول | قدرت تفکیک مکانی | قدرت تفکیک زمانی | بازه زمانی داده‌ها |
|---------------------|------------------------|--|------------------|------------------|-------------------------|
| داده‌های هواشناسی | ایستگاه هواشناسی قزوین | تابش خورشیدی سطح زمین | - | روزانه | 1-Jan-2012 to 31-Dec-15 |
| تصویر رقومی ارتفاعی | ایستگاه هواشناسی مگسال | حداقل و حداکثر دما | - | - | - |
| GLDAS/Noah | earthexplorer.usgs.gov | - | ۳۰ متر | - | - |
| GLDAS/Noah | mirador.gsfc.nasa.gov | GLDAS_NOAH025SUBP_3H | ۰/۲۵ درجه | روزانه | 1-Jan-2012 to 31-Dec-15 |
| NCEP/NCAR | esrl.noaa.gov | Downward Solar Radiation Flux | ۰/۹۴ درجه | روزانه | 1-Jan-2012 to 31-Dec-15 |
| CM-SAF | cmsaf.eu | SIS - Surface Incoming Shortwave Radiation | ۱۵ کیلومتر | روزانه | 1-Jan-2012 to 31-Dec-15 |

ارزیابی دقت

دقت داده‌های به‌دست‌آمده و محاسبه‌شده با استفاده از ضریب همبستگی R^2 و خطای استاندارد تخمین (SEE) که از رابطه (۵) قابل محاسبه است مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum(Y_r - Y_p)^2}{n-1}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

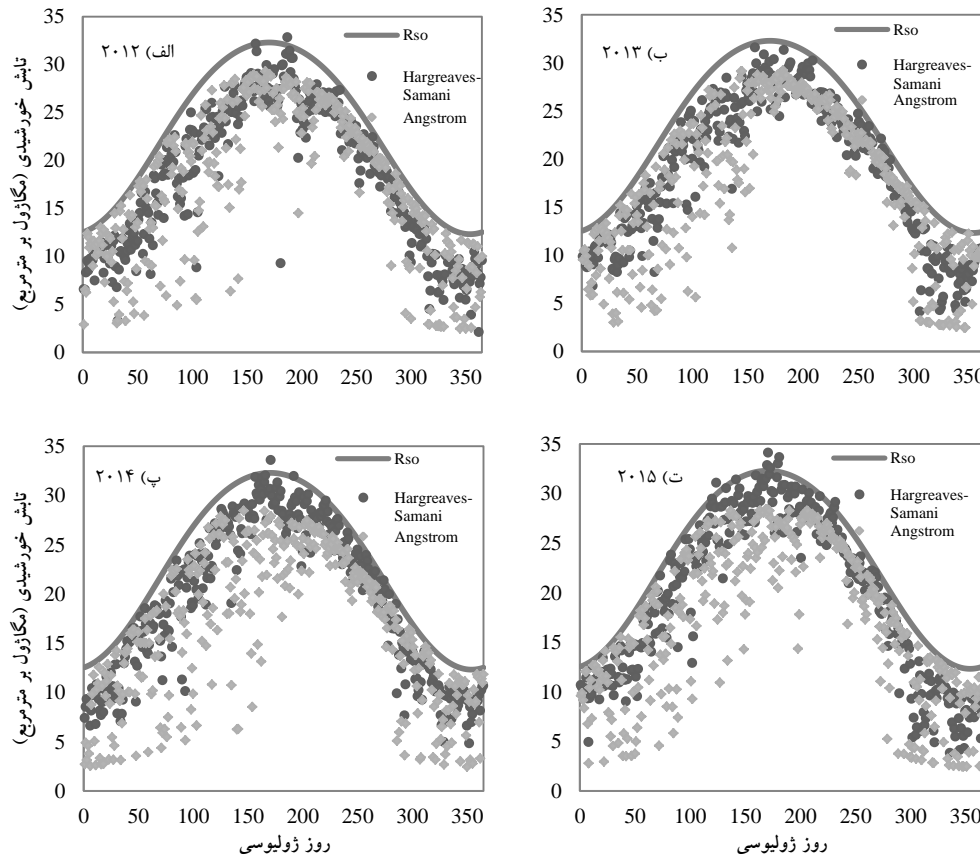
در این رابطه Y_p و Y_r مقدار مرجع یا اندازه‌گیری شده و

مقدار پیش‌بینی شده و n تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

معادلات تجربی

با استفاده از دو معادله تجربی آنگستروم و هارگریوز-سامانی، مقادیر R_s روزانه در منطقه مورد مطالعه محاسبه شد (شکل ۲).



شکل ۲. تغییرات روزانه تابش خورشیدی حاصل از دو روش آنگستروم و هارگریوز-سامانی در سال‌های (الف) ۲۰۱۲، (ب) ۲۰۱۳، (پ) ۲۰۱۴ و (ت) ۲۰۱۵.

جدا شدند و سری زمانی آن‌ها برای سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵ استخراج گردید (شکل ۳).

ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تابش خورشیدی

مدل‌های تجربی

دو روش محاسباتی آنگستروم و هارگریوز-سامانی با استفاده از داده‌های زمینی تابش خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۴). تابش خورشیدی به‌دست‌آمده از روش آنگستروم زمانی می‌تواند با دقت بسیار بالایی میزان تابش خورشیدی را برآورد کند که ضرایب معادله آنگستروم به‌درستی و با دقت کافی برای هر منطقه کالیبره شده باشد. در غیر این صورت، تابش خورشیدی با دقت پایین‌تری منتج خواهد شد. معادله هارگریوز-

تغییرات روزانه R_s محاسبه‌شده در معادله آنگستروم و هارگریوز-سامانی در شکل (۲) دیده می‌شود. مقادیر R_{SO} نشان‌دهنده حد بالای مقدار تابش خورشیدی سطح زمین، یعنی در شرایط آسمان بدون ابر و گردوغبار است. بالاتر بودن مقادیر R_s می‌تواند به دلیل وجود ابرهای کومولوس باشد، گردوغبار و آئروسول‌ها نیز این پدیده را منتج می‌شوند.

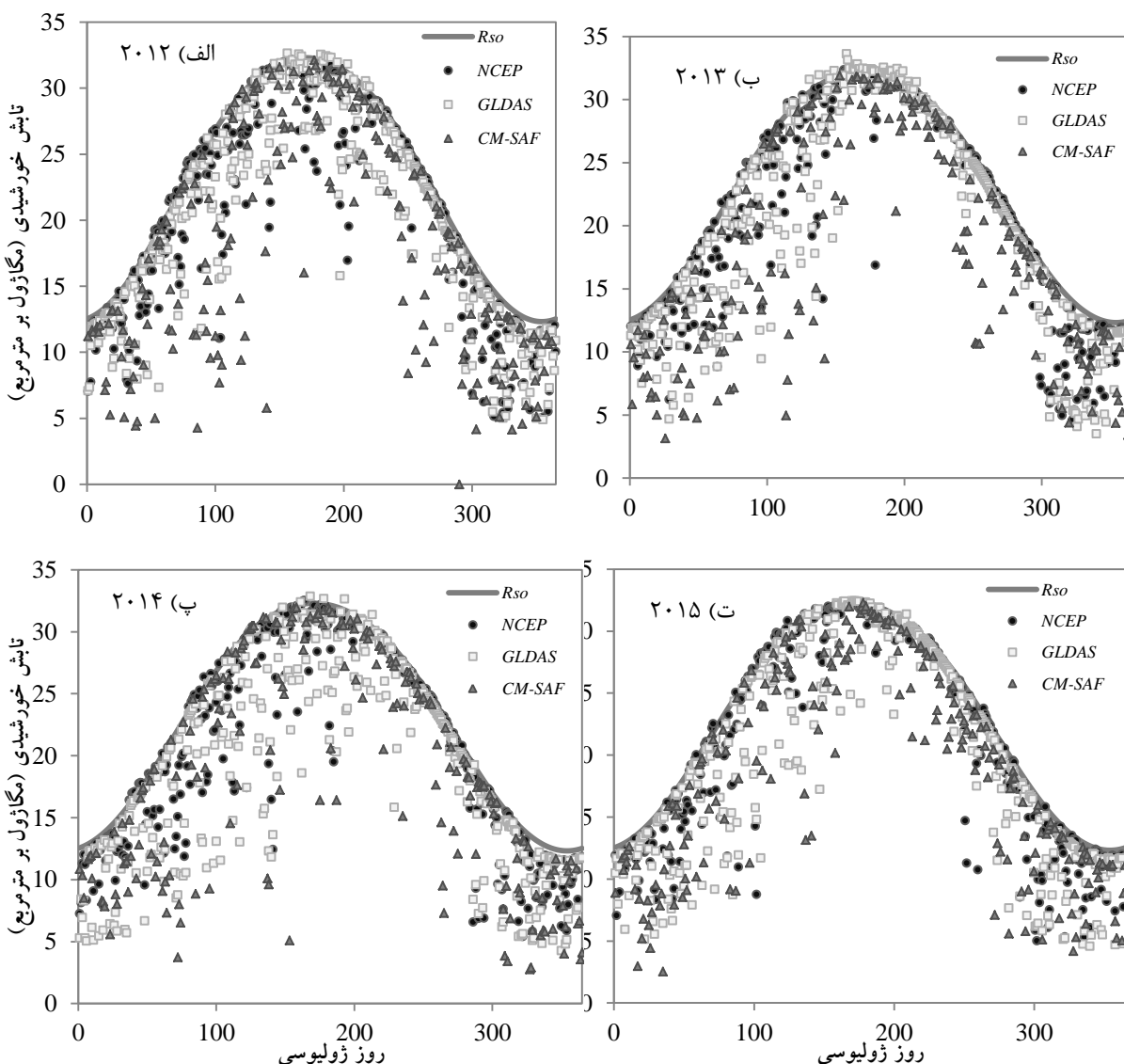
مدل‌های فیزیکی و مشاهدات ماهواره‌ای

با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی مزارع مورد مطالعه، پیکسل‌هایی که بر فراز ایستگاه هواشناسی قزوین قرار داشتند، مربوط به هر یک از محصولات GLDAS/Noah، NCEP/NCAR و CM-SAF با استفاده از نرم‌افزار MATLAB

مدل‌های فیزیکی و مشاهدات ماهواره‌ای

هر یک از محصولات‌های ماهواره‌ای معرفی‌شده در بخش‌های قبل نیز با استفاده از داده‌های زمینی مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۵) و نتایج کلی در جدول (۲) آورده شده است.

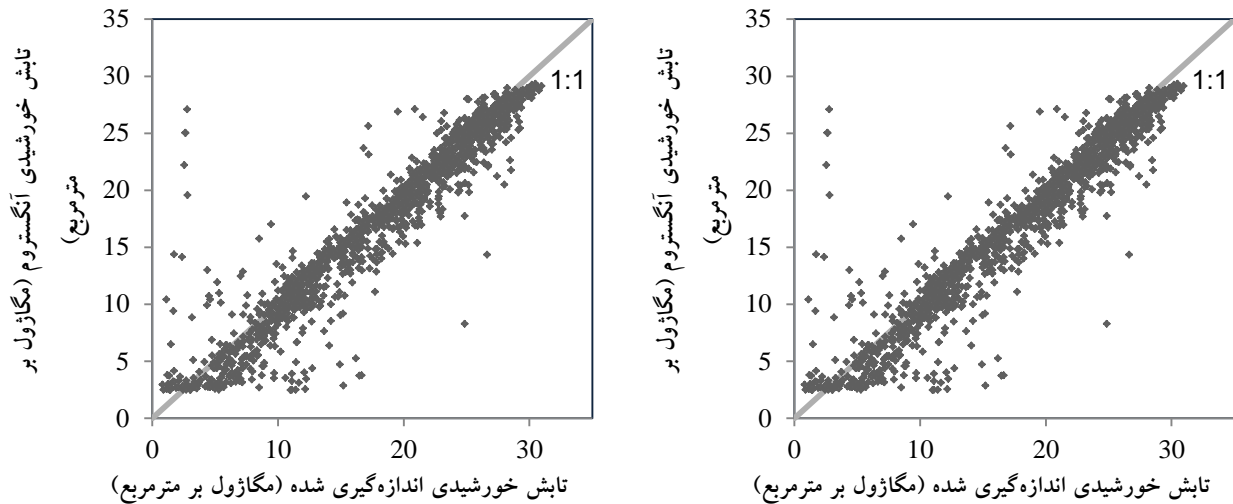
سامانی باوجود دقت پایین‌تر نسبت به معادله کالیبره شده آنگستروم (جدول ۱)، تابش خورشیدی را بدون کالیبره نمودن ضریب Kra با دقت قابل قبولی به دست آورد. به همین دلیل می‌تواند جایگزین مناسبی برای معادله آنگستروم، در مناطقی که داده‌های کافی وجود ندارد، باشد.



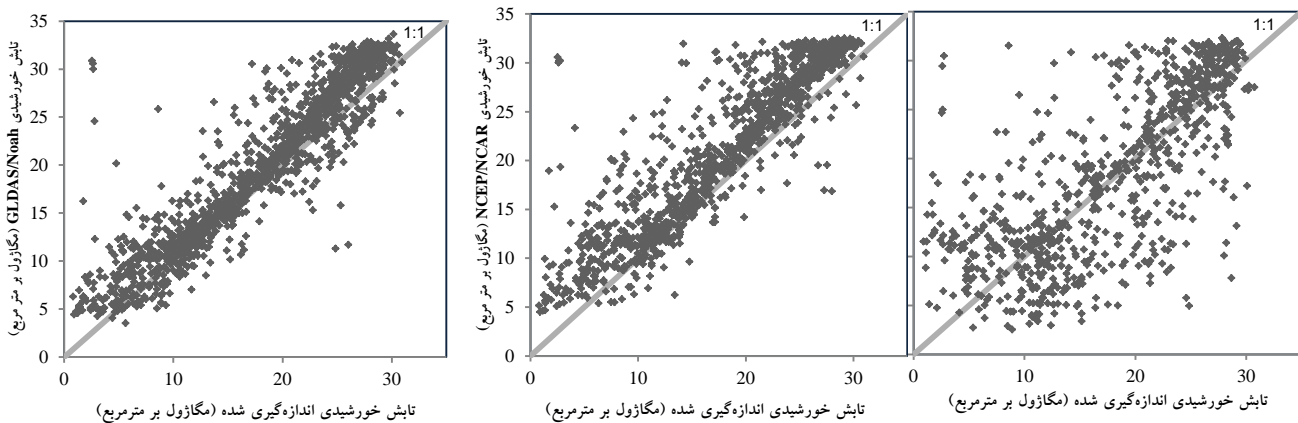
شکل ۳. تغییرات روزانه تابش خورشیدی در سه مدل GLDAS/Noah, NCEP/NCAR و CM-SAF در سال‌های (الف) ۲۰۱۲، (ب) ۲۰۱۳، (پ) ۲۰۱۴ و (ت) ۲۰۱۵.

جدول ۲. ارزیابی دقت روش‌های مختلف برآورد تابش خورشیدی

| میانگین | حداکثر | حداقل | SEE | R ² | | |
|---------|--------|-------|------|----------------|-----------------|--------------------|
| ۱۸/۰۴ | ۳۰/۹۶ | ۰/۸۳ | - | - | پیرانومتر | اندازه‌گیری زمینی |
| ۱۷/۲۱ | ۲۹/۳۲ | ۲/۴۷ | ۲/۵۸ | ۰/۹ | آنگستروم | معادلات تجربی |
| ۱۸/۹۲ | ۳۵/۰۴ | ۲/۱۲ | ۳/۶۲ | ۰/۸ | هارگریوز-سامانی | |
| ۱۹/۸۸ | ۳۳/۶۳ | ۳/۵۱ | ۳/۵ | ۰/۸۷ | GLDAS | محصولات ماهواره‌ای |
| ۲۰/۹۹ | ۳۲/۵ | ۴/۴۸ | ۴/۴۶ | ۰/۸۳ | NCEP | |
| ۱۸/۲۹ | ۳۲/۲۹ | ۲/۵۲ | ۶/۰۶ | ۰/۵۳ | CM-SAF | |



شکل ۴. ارزیابی معادلات تجربی آنگستروم و هارگریوز-سامانی با استفاده از داده‌های مشاهداتی تابش در ایستگاه همدیدی قزوین برای سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵.



شکل ۵. ارزیابی محصول تابش در سطح زمین حاصل از GLDAS/Noah، NCEP/NCAR و CM-SAF بر فراز ایستگاه همدیدی قزوین برای سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵.

با توجه به شکل (۴) و نیز جدول (۲) (مقادیر میانگین)، در روش‌های محاسباتی، آنگستروم میزان تابش خورشیدی را کمتر و هارگریوز-سامانی بیشتر از مقدار واقعی آن برآورد نمودند. مقدار R^2 معادله آنگستروم و هارگریوز-سامانی به ترتیب ۰/۹ و ۰/۸ و مقدار SEE برای معادله آنگستروم ۲/۵۸ و برای معادله هارگریوز-سامانی ۳/۶۲ بود.

شکل (۵) و جدول (۲) نشان می‌دهد که تمامی محصولات ماهواره‌ای میزان تابش خورشیدی را بیشتر از حد واقعی آن برآورد کردند. تابش‌های خورشیدی مربوط به GLDAS/Noah، NCEP/NCAR و CM-SAF به ترتیب ۱۰/۲، ۱۶/۳۵ و ۱/۴ درصد بیشتر از حد واقعی آن است. اما از بین آن‌ها، GLDAS/Noah با $R^2=۰/۸۷$ و $SEE=۳/۵$ بهترین محصول ماهواره‌ای بود و ضعیف‌ترین کارایی را CM-SAF با $R^2=۰/۵۳$ و $SEE=۶/۰۶$ داشت. مدل GLDAS/Noah را می‌توان نسخه پیشرفته‌تر NCEP/NCAR دانست. برای برآورد تابش در مدل

GDAS از NCEP/NCAR استفاده می‌شود که این تکنیک، تکنیک عملیاتی داده‌گذاری اتمسفری NCEP/NCAR است (Derber *et al.*, 1991). از طرف دیگر، محصول GLDAS/Noah با به‌کارگیری سیستم‌های پیشرفته مشاهداتی و سیستم‌های داده‌گذاری اتمسفری اقدام به برآورد پارامترهای خود می‌نماید (Rodell *et al.*, 2004). مزیت انرژی‌های برآورد شده توسط این مدل در استفاده آن از پوشش ابر به‌دست‌آمده توسط داده‌های ماهواره‌ای محصول ۳ ساعته مربوط به سیستم مدل‌سازی هواشناسی کشاورزی آژانس آب و هوایی نیروی هوایی است. در مقابل آن سیستم‌های داده‌گذاری اتمسفری مانند GDAS محاسبات تابش تنها از پوشش‌های ابری به‌دست‌آمده بر پایه مدل استفاده می‌کنند. از این‌رو، داده‌های GLDAS/Noah نسبت به دیگر مدل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است.

یکی از عمده‌ترین مشکلات محصول CM-SAF این است که در هر بار ارائه داده‌های تابش خورشیدی، تمام کره زمین

با توجه به شکل (۴) و نیز جدول (۲) (مقادیر میانگین)، در روش‌های محاسباتی، آنگستروم میزان تابش خورشیدی را کمتر و هارگریوز-سامانی بیشتر از مقدار واقعی آن برآورد نمودند. مقدار R^2 معادله آنگستروم و هارگریوز-سامانی به ترتیب ۰/۹ و ۰/۸ و مقدار SEE برای معادله آنگستروم ۲/۵۸ و برای معادله هارگریوز-سامانی ۳/۶۲ بود.

شکل (۵) و جدول (۲) نشان می‌دهد که تمامی محصولات ماهواره‌ای میزان تابش خورشیدی را بیشتر از حد واقعی آن برآورد کردند. تابش‌های خورشیدی مربوط به GLDAS/Noah، NCEP/NCAR و CM-SAF به ترتیب ۱۰/۲، ۱۶/۳۵ و ۱/۴ درصد بیشتر از حد واقعی آن است. اما از بین آن‌ها، GLDAS/Noah با $R^2=۰/۸۷$ و $SEE=۳/۵$ بهترین محصول ماهواره‌ای بود و ضعیف‌ترین کارایی را CM-SAF با $R^2=۰/۵۳$ و $SEE=۶/۰۶$ داشت. مدل GLDAS/Noah را می‌توان نسخه پیشرفته‌تر NCEP/NCAR دانست. برای برآورد تابش در مدل

داده‌های هواشناسی مواجه باشیم، می‌توان به‌عنوان یک جایگزین بسیار خوب با دقت مناسب، از معادله هارگریوز-سامانی استفاده کرد. مقادیر R^2 معادلات آنگستروم و هارگریوز-سامانی به ترتیب ۰/۹ و ۰/۸ و مقادیر SEE برابر با ۲/۵۸ و ۳/۶۲ گردید.

از میان مدل‌های برآورد میزان تابش خورشیدی، مدل GLDAS/Noah با $R^2=0.87$ و $SEE=3.5$ بهترین نتیجه را حاصل کرد. دقت نسبتاً بالای این مدل ناشی از به‌کارگیری مشاهدات ماهواره‌ای به‌عنوان تکمیل‌کننده سیستم داده‌گذاری اتمسفری برای برآورد تابش‌های خورشیدی است. در کل، در صورتی که نیاز به داده‌های تابش خورشیدی با دقت بالا، در مکان‌هایی که امکان استفاده دقیق از معادله آنگستروم و داده‌های زمینی وجود ندارد، محصول GLDAS/Noah می‌تواند با دقت خیلی خوب، قابل‌اعتماد و با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسبی این پارامتر را در اختیار ما بگذارد.

REFERENCES

- Abraha, M.G. and Savage, M.J. (2008). Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 401-416.
- Aghashariatmadari, Z. (2011) Evaluation of different models for estimating total solar radiation at horizontal surfaces based on meteorological data, with emphasis on the performance of the angstrom model over Iran. Dissertation, University of Tehran (IN PERSIAN)
- Aladenola, O.O. and Madramootoo, C.A. (2014). Evaluation of solar radiation estimation methods for reference evapotranspiration estimation in Canada, *Theoretical and Applied Climatology*, 118(3), 377-385.
- Allen, R.G. (1995). Evaluation of procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature.
- Allen, R.G. (1997). Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic engineering*, 2(2), 56-67.
- Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50(210), 121-126.
- Babst, F., Mueller, R.W. and Hollmann, R. (2008). Verification of NCEP reanalysis shortwave radiation with mesoscale remote sensing data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*. 5(1), 34-37.
- Barkstrom, B.R. and Smith, G.L. (1986). The earth radiation budget experiment: Science and implementation. *Reviews of Geophysics*, 24(2), 379-390.
- Barkstrom, B., Harrison, E., Smith, G., Green, R., Kibler, J. and Cess, R. (1989). Earth radiation budget experiment (ERBE) archival and April 1985 results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70(10), 1254-1262.
- Barkstrom, B.R., Harrison, E.F. and Lee, R.B. (1990). Earth radiation budget experiment. *Transactions American Geophysical Union*, 71(9), 297-304.
- Bojanowski, J.S. (2013). Quantifying solar radiation at the earth's surface with meteorological and satellite data. P.h.D thesis, University of Twente. Netherlands.
- Bojanowski, J.S., Vrieling, A. and Skidmore, A.K. (2013). Calibration of solar radiation models for Europe using Meteosat Second Generation and weather station data. *Agricultural and forest meteorology*. 176, 1-9.
- Cano, D., Monget, J.M., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N. and Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*. 37(1), 31-39.
- Chen, F., Mitchell, K., Schaake, J., Xue, Y., Pan, H.L., Koren, V. and Betts, A. (1996). Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 101(D3), 7251-7268.
- Dai, Y., Zeng, X., Dickinson, R.E., Baker, I., Bonan, G.B., Bosilovich, M.G. and Oleson, K.W. (2003). The common land model. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 84(8), 1013-1023
- Derber, J.C., Parrish, D.F. and Lord, S.J. (1991). The new global operational analysis system at the National Meteorological Center. *Weather and Forecasting*, 6(4), 538-547.
- Duvel, J.P., Viollier, M., Raberanto, P. and Kandel, R.

پوشش داده نمی‌شود و این مسئله باعث می‌گردد که داده‌های روزانه برای تمام روزهای سال وجود نداشته باشد. محصول تابش خورشیدی سطح زمین مربوط به CM-SAF بدون استفاده از تکنیک داده‌گذاری و داده‌های مشاهداتی زمینی و تنها با بهره‌گیری از رابطه میان پراکنش جوی در باندهای سنسورهای ماهواره‌ای با پهنای باند نسبتاً بالا (۰/۲ تا ۰/۴ میکرومتر) و بازتابش برون جوی مقادیر تابش خورشیدی را برآورد می‌کند (Hollmann *et al.*, 2006) و همین عامل باعث می‌گردد که دقت داده‌های CM-SAF به نسبت GLDAS/Noah و NCEP/NCAR پایین‌تر باشد.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، از میان معادلات تجربی، معادله آنگستروم با دقت بسیار بالایی میزان تابش خورشیدی را تخمین زد، اما از آنجایی که ممکن است با کمبود

- (2001). The ScaRaB-Resurs Earth radiation budget dataset and first results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(7), 1397.
- Gueymard, C.A. and Myers, D.R. (2008). Validation and ranking methodologies for solar radiation models In Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface. *Springer Berlin Heidelberg*, 479-510.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108(3), 225-230.
- Harries, J.E., Russell, J.E., Hanafin, J.A. and Brindley, H. (2005). The geostationary earth radiation budget project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(7), 945.
- Hollmann, R., Mueller, R.W. and Gratzki, A. (2006). CM-SAF surface radiation budget: First results with AVHRR data. *Advance in Sp Research*, 37(12), 2166-2171.
- Inamdar, A.K. and Guillevic, P.C. (2015). Net Surface Shortwave Radiation from GOES Imagery—Product Evaluation Using Ground-Based Measurements from SURFRAD. *Remote Sensing*, 7(8), 10788-10814
- Jacobowitz, H. and Tighe, R.J. (1984). The earth radiation budget derived from the NIMBUS 7 ERB experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D4), 4997-5010.
- Jensen, M.E. (1985). Personal communication, ASAE national conference, Chicago, IL.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Zhu, Y. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-471.425.
- Kandel, R., Viollier, M., Raberanto, P. and Duvel, J.P. (1998). The ScaRaB earth radiation budget dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), 765.
- Koster, R.D. and Suarez, M.J. (1992). Modeling the land surface boundary in climate models as a composite of independent vegetation stands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D3), 2697-2715.
- Laszlo, I., Ciren, P., Liu, H., Kondragunta, S., Tarpley, J.D. and Goldberg, M.D. (2008). Remote sensing of aerosol and radiation from geostationary satellites. *Advance in Sp Research*, 41(11), 1882-1893.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F. and Burges, S.J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), 14415-14428.
- Liang, S., Zhong, B. and Fang, H. (2006). Improved estimation of aerosol optical depth from MODIS imagery over land surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 104(4), 416-425.
- Liu, X., Li, Y., Zhong, X., Zhao, C., Jensen, J.R. and Zhao, Y. (2014). Towards increasing availability of the Ångström–Prescott radiation parameters across China: Spatial trend and modeling. *Energy Conversion and Management*, 87, 975-989.
- Ohmura, A., Dutton, E.G., Forgan, B. and Frohlich, C. (1998). Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2115.
- Paulescu, M., Paulescu, E., Gravila, P. and Badescu, V. (2013). Solar radiation measurements. In *Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation*, Springer London, 17-42.
- Piri, J. and Kisi, O. (2015). Modelling solar radiation reached to the Earth using ANFIS, NN-ARX, and empirical models (Case studies: Zahedan and Bojnurd stations). *Journal of Atmosphere and Solar Terrestrial Physics*, 123, 39-47.
- Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U.E.A. and Gottschalck, J. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L. and Verma, S.B. (1983). *Microclimate: the biological environment*, John Wiley & Sons.
- Schulz, J., Albert, P., Behr, H.D., Caprion, D., Deneke, H., Dewitte, S. and Hollmann, R. (2009). Operational climate monitoring from space: the EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM-SAF), *Atmosphere, Chemistry and Physics* 9(5).
- Shapiro, R. (1972). Simple model for the calculation of the flux of solar radiation through the atmosphere. *Applied Optics*, 11(4), 760-764.
- Wang, K., Wang, P., Li, Z., Cribb, M. and Sparrow, M. (2007). A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D15).
- Wang, F., Wang, L., Koike, T., Zhou, H., Yang, K., Wang, A. and Li, W. (2011). Evaluation and application of a fine-resolution global data set in a semiarid mesoscale river basin with a distributed biosphere hydrological model. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 116(D21)
- Zhang, H. and Pu, Z. (2010). Beating the uncertainties: ensemble forecasting and ensemble-based data assimilation in modern numerical weather prediction. *Advance in Meteorology*, 10-20.