

## ارزیابی مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در تخمین تبخیر-تعرق مرجع

جواد بهمنش<sup>۱\*</sup>، سعید مهدی‌زاده<sup>۲</sup>، توحید علیقلی‌نیا<sup>۳</sup> و نگار رسولی‌مجد<sup>۴</sup>

<sup>۱\*</sup> - نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه j.behmanesh@urmia.ac.ir

<sup>۲</sup> - دانشجوی دکتری مهندسی آب (آبیاری و زهکشی) دانشگاه ارومیه

<sup>۳</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب (آبیاری و زهکشی) دانشگاه ارومیه

<sup>۴</sup> - دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب دانشگاه ارومیه

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۱۹

### چکیده

تابش خورشیدی یکی از عوامل ضروری در برنامه‌ریزی آبیاری، چرخه هیدرولوژیکی، مدل‌های شبیه‌ساز عملکرد گیاه و برآورد تبخیر-تعرق مرجع می‌باشد. هدف تحقیق حاضر، بررسی دقت مدل‌های برآورد تابش خورشیدی و تأثیر آنها بر تبخیر-تعرق مرجع می‌باشد. برای این منظور از داده‌های هواشناسی چهار ایستگاه سینوپتیک ارومیه، تکاب، سلماس و مهاباد در غرب حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مقیاس روزانه استفاده گردید. تابش خورشیدی توسط هفت مدل هارگریوز-سامانی، آلن، خودکالیبراسیون، سامانی، آناندال، بریستف-کمپیل و آنگستروم-پرسکات برآورد گردید. سپس مقادیر به‌دست آمده در معادله فائو-پنمن-مانتیتش، برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا، متوسط خطای بایاس و ضریب تبیین استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان داد که مدل آنگستروم-پرسکات دارای بهترین عملکرد و مدل سامانی ضعیف‌ترین روش در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه بود. متوسط مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل‌های آنگستروم-پرسکات و سامانی در منطقه مطالعاتی به ترتیب برابر  $0/48$  و  $1/43$  میلی‌متر بر روز به‌دست آمد.

کلید واژه‌ها: تابش خورشیدی، ساعات آفتابی، مدل‌های تجربی، هواشناسی.

## Evaluation of Solar Radiation Estimation Models in Estimating Reference Evapotranspiration

J. Behmanesh<sup>1\*</sup>, S. Mehdizadeh<sup>2</sup>, T. Aligholnia<sup>3</sup> and N. Rasouli Majd<sup>4</sup>

1\* - Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran.

2- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran.

3- MS.C. Student, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran.

4- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran.

Received: 9 May 2015

Accepted: 4 January 2016

### Abstract

Solar radiation is an essential factor in irrigation scheduling, hydrological cycle, crop growth simulation models and estimation of reference evapotranspiration. The aim of the present research was to investigate the accuracy of solar radiation estimation models and their effects on reference evapotranspiration. For this purpose, the meteorological data of 4 synoptic stations including Urmia, Takab, Salmas and Mahabad in West of Urmia lake catchment in daily scale were used. Solar radiation was estimated using seven models including, Hargreaves-Samani, Allen, Self-Calibrating, Samani, Annandale, Bristow-Campbell and Angstrom-PreScott. Then, the obtained values were used in FAO- Penman-Monteith equation to estimate the reference evapotranspiration. In order to evaluate the models' accuracy, the statistical indicators including root mean square error, mean bias error and determination coefficient were used. The evaluation results of the models showed that the Angstrom - Prescott model had the best performance, and the Samani method was the weakest method in the studied stations. The average values of the

root mean square error for the Angstrom–Prescott and Samani methods in the studied region were obtained 0.48 and 1.43 mm/day, respectively.

**Keywords:** Solar radiation, Sunshine hours, Experimental models, Meteorology.

#### مقدمه

مشکل به استفاده از دما به جای پارامتر ساعت آفتابی پرداخته‌اند. سایر مطالعات، همانند مطالعات هانت و همکاران<sup>۱۲</sup> (۱۹۹۸)، آلموروکس (۲۰۱۱) و وولی و پاز<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۲) داده‌های بارش به عنوان مبنای جهت تخمین تابش خورشیدی ( $R_s$ ) قرار دادند. این در حالی است که بارکر<sup>۱۴</sup> (۱۹۹۲) و سوپیت<sup>۱۵</sup> (۱۹۹۴) از پارامتر ابرناکی به عنوان مبنای جهت تخمین تابش خورشیدی ( $R_s$ ) استفاده کرده‌اند.

محققان بسیاری در نقاط مختلف دنیا به ارزیابی دقت و مناسب بودن مدل‌های برآورد تابش خورشیدی پرداخته‌اند. دی جانگ و استوارت<sup>۱۶</sup> (۱۹۹۳) در تحقیقی که در مناطق مرتعی کانادا انجام داده بودند، بیان کردند که مقدار تابش خورشیدی روزانه به پارامترهای حداکثر و حداقل دما و همچنین به بارندگی بستگی دارد. رحمان<sup>۱۷</sup> (۱۹۹۸) با استفاده از ۱۶ مدل مختلف برآورد تابش، مقادیر تابش محاسبه‌شده را در عربستان با مقادیر تابش اندازه‌گیری شده با پیرانومتر مقایسه کرد و از بین آن‌ها بهترین مدل را که مدل خطی آنگستروم-پرسکات با ضرایب  $a=0.3465$  و  $b=0.352$  بود، انتخاب نمود. در تحقیق ارائه شده توسط ایزومون و مایر<sup>۱۸</sup> (۲۰۰۲) مدل‌های کاستن<sup>۱۸</sup> (بر مبنای ابرناکی) و آنگستروم-پرسکات، گارج-گارج و سیوکف (بر مبنای ساعات آفتابی) مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق در دو منطقه کوهستانی فلدبرگ<sup>۱۹</sup> و منطقه مسطح برمگارتن<sup>۲۰</sup> کشور سوئیس انجام شد که در نهایت مدل آنگستروم-پرسکات و گارج-گارج به عنوان بهترین مدل‌های برآورد تابش خورشیدی انتخاب شدند. همچنین سوزن و همکاران<sup>۲۱</sup> (۲۰۰۵)، مقدار تابش خورشیدی را با استفاده از شبکه‌های عصبی برای مناطق مختلف کشور ترکیه محاسبه نمود که نتایج به دست آمده، نشان دهنده قابل اعتماد بودن این تکنیک برای محاسبه تابش خورشیدی در اقلیم ترکیه می‌باشد. اسکیکر<sup>۲۲</sup> (۲۰۰۶) در استان داماسکو سوریه با استفاده از هفت پارامتر مختلف هواشناسی و جغرافیایی، ۱۳ معادله یک تا هفت متغیری را برای محاسبه تابش خورشیدی مورد بررسی قرار داد و با وجود قابل قبول بودن همه معادلات، معادله ارائه شده با

تابش خورشیدی یکی از محرک‌های اصلی در مسائل کاربردی از جمله تخمین تبخیر-تعرق، طراحی و معماری مدل‌های رشد محصولات کشاورزی و غیره می‌باشد. از این رو دانستن مقدار تابش خورشیدی اهمیت فراوانی دارد (استوکل و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳؛ یانگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶). اما علی‌رغم اهمیت اندازه‌گیری این پارامتر، به دلیل مشکلات اقتصادی، وسایل و ابزار مناسب اندازه‌گیری تابش مانند سایر پارامترهای هواشناسی از جمله دما و بارش در همه مناطق موجود نبوده و بنابراین باید به گونه‌ای آن را تخمین زد (آلموروکس و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۵؛ ایزومون و مایر<sup>۴</sup>، ۲۰۰۲). این مسئله باعث ترغیب دانشمندان و محققان به سوی ارائه و استفاده از مدل‌های تابش شده است. مقادیر تابش به روش‌های مختلفی از جمله روابط تجربی و رگرسیونی، استفاده از فن سنسور از دور، شبکه‌های عصبی و میان‌یابی خطی محاسبه می‌شوند. اما از میان همه این روش‌ها، معادله‌های تجربی کاربرد گسترده‌تری داشته و بین کاربران نیز از محبوبیت بیشتری برخوردار است.

به طور کلی معادله‌های تجربی برآورد تابش طول موج کوتاه خورشیدی را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد. دسته اول معادله‌هایی هستند که مبنای آنها ساعات آفتابی است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های آنگستروم<sup>۵</sup> (۱۹۲۴) و پرسکات<sup>۶</sup> (۱۹۴۰) اشاره نمود. دسته دوم معادله‌هایی هستند که مبنای آن‌ها دمای هوا است، مانند معادله‌های بریستفو و کمپیل<sup>۷</sup> (۱۹۸۴) و دسته سوم معادله‌هایی هستند که بر مبنای ابرناکی محاسبه می‌شوند که از آن جمله می‌توان به مدل انبرگ و بولن<sup>۸</sup> (۲۰۰۵) اشاره کرد. عمدتاً اکثر مدل‌های تخمینی تابش خورشیدی بر مبنای پارامتر ساعت آفتابی می‌باشند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های آلن و همکاران<sup>۹</sup> (۱۹۹۸)، ایزومون و مایر<sup>۴</sup> (۲۰۰۲) و ترنکا و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۵) اشاره نمود. استفاده از این مدل‌ها گاهی به دلیل عدم ثبت و وجود داده‌های ساعت آفتابی غیر ممکن می‌گردد. مدل‌های دمایی مانند مدل‌های هارگریوز و سامانی<sup>۱۱</sup> (۱۹۸۲)، بریستفو و کمپیل (۱۹۸۴) و آلن و همکاران (۱۹۹۸) برای حل این

- 12- Hunt *et al.*
- 13- Woli and Paz
- 14- Barker
- 15- Supit
- 16- De Jong and Stewart
- 17- Rehman
- 18- Kasten
- 19- Feldberg
- 20- Bremgarten
- 21- Sozne *et al.*
- 22- Skeiker

- 1- Stöckle *et al.*
- 2- Yang *et al.*
- 3- Almorox *et al.*
- 4- Iziomon and Mayer
- 5- Angstrom
- 6- Prescott
- 7- Bristow and Campbell
- 8- Ehnberg and Bollen
- 9- Allen *et al.*
- 10- Trnka *et al.*
- 11- Hargreaves and Samani

هارگریوز و سامانی (۱۹۸۲) فرض نمودند که میزان تابش خورشیدی با مجذور اختلاف مابین درجه حرارت حداکثر ( $T_{max}$ ) و حداقل ( $T_{min}$ ) متناسب است و به این منظور معادله تجربی زیر را ارائه نمودند:

$$R_s = K_{RS}(\sqrt{T_{max} - T_{min}})R_a \quad (۱)$$

که در این رابطه،  $R_s$ : تابش خورشیدی بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز،  $K_{RS}$ : ثابت تجربی (۰/۱۶) برای مناطق داخلی و ۰/۱۹ (برای مناطق ساحلی)،  $T_{max}$ : درجه حرارت حداکثر روزانه هوا بر حسب درجه سانتیگراد،  $T_{min}$ : درجه حرارت حداقل روزانه هوا بر حسب درجه سانتیگراد و  $R_a$ : تابش برون جوی بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز می‌باشند.

### مدل آلن

آلن (۱۹۹۵) رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب  $K_{RS}$  در رابطه (۱) ارائه نمود که این ضریب به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$K_{RS} = K_{Ra} \times \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.5} \quad (۲)$$

ضریب  $K_{Ra}$ : یک ثابت تجربی (۰/۱۷) برای مناطق داخلی و ۰/۲ برای مناطق ساحلی،  $P$ : متوسط فشار اتمسفر در محل بر حسب کیلو پاسکال و  $P_0$ : متوسط فشار اتمسفر در سطح دریا (تقریباً برابر ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال) می‌باشند.

### مدل خودکالیبراسیون

آلن (۱۹۹۷) رابطه (۳) را برای میزان تابش خورشیدی در آسمان صاف که در آن ساعات آفتاب واقعی و حداکثر مساوی هستند و برای تعیین تابش طول موج بلند خالص ( $R_{nl}$ ) مورد نیاز می‌باشد ارائه نمود. همچنین مقدار  $R_{so}$  از رابطه (۳) تعیین می‌گردد:

$$R_{so} = (a + b + 2 \times 10^{-5}Z)R_s \quad (۳)$$

$a$  و  $b$ : ثابت‌های آنگستروم ( $a = 0.25, b = 0.5$ ) و  $Z$ : ارتفاع محل از سطح دریا (متر) می‌باشند.

### مدل سامانی

سامانی (۲۰۰۰) ضریب  $K_{RS}$  در رابطه (۲) را بر حسب تابعی از اختلاف مابین درجه حرارت حداکثر ( $T_{max}$ ) و درجه حرارت حداقل ( $T_{min}$ ) به صورت رابطه (۴) اصلاح نمود:

$$K_{RS} = 0.00185 \times (T_{max} - T_{min})^2 - 0.0433 \times (T_{max} - T_{min}) + 0.4023 \quad (۴)$$

هفت متغیر را به عنوان بهترین مدل از نظر آماری انتخاب نمود. تحقیقات یانگ و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که معادله آنگستروم- پرسکات در مطالعات و مدل‌سازی‌های هیدرولوژی و کشاورزی کاربرد بسیار گسترده‌ای دارد. سونمت و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱)، ۱۴۷ مدل تخمینی ماهانه تابش خورشیدی را در ترکیه مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل‌های بال و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) و چن و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) بهترین عملکرد را در تخمین تابش خورشیدی در شهر آنکارا دارا می‌باشند. آلدنولا و مادرامتو<sup>۴</sup> (۲۰۱۴)، به ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی تابش خورشیدی برای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل مرجع پرداختند. آنها برای این منظور ۸ ایستگاه هواشناسی را با توجه به اقلیم‌های مختلف در گستره دشت‌های کانادا انتخاب کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که از بین ۹ مدل مورد بررسی مدل آنگستروم- پرسکات دارای بیشترین دقت و مدل محمود و هوبارد<sup>۵</sup> (۲۰۰۲) دارای کمترین دقت در پیش‌بینی تابش خورشیدی می‌باشد. از دیگر تحقیقات انجام گرفته به منظور ارزیابی مدل‌های تابش خورشیدی می‌توان به تحقیقات ون و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۰۸)، سن<sup>۷</sup> (۲۰۰۸)، پلکوفسکی<sup>۸</sup> (۲۰۰۹) و روبا<sup>۹</sup> (۲۰۰۹) اشاره کرد. نتایج تمامی این تحقیقات حاکی از قابل قبول بودن همه معادلات، مخصوصاً مدل آنگستروم- پرسکات می‌باشد.

تاکنون مطالعه‌ای در مورد ارزیابی و بررسی دقت مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه انجام نشده است. هدف از این تحقیق تعیین صحت و دقت مدل‌ها و ارزیابی آنها در محدوده غربی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، با توجه به اهمیت تبخیر-تعرق در این ناحیه می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

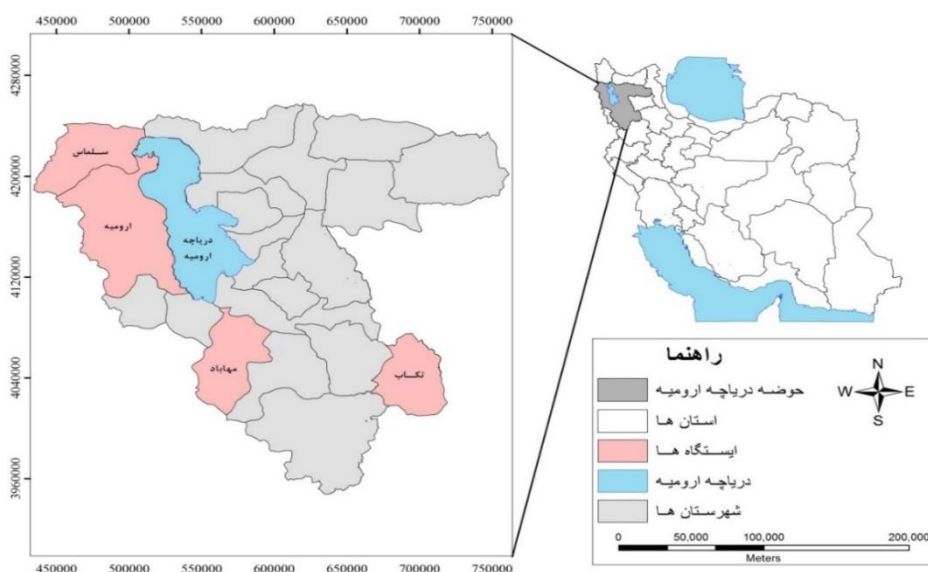
#### معادله‌های برآورد تابش خورشیدی

همان‌طور که ذکر شد برای برآورد میزان تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین، تاکنون تلاش‌های فراوانی صورت گرفته و معادله‌های بسیاری ارائه شده است. در این تحقیق هفت مدل تخمین تابش خورشیدی شامل؛ هارگریوز-سامانی، آلن، خودکالیبراسیون، سامانی، آناندال، بریستف- کمپیل و آنگستروم- پرسکات بررسی شد.

#### مدل هارگریوز-سامانی

- 1- Sonmete *et al.*
- 2- Ball *et al.*
- 3- Chen *et al.*
- 4- Aladenola and Madramootoo
- 5- Mahmood and Hubbard
- 6- Wan *et al.*
- 7- Şen
- 8- Pelkowski,
- 9- Robaa

بهمنش و همکاران: ارزیابی مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در...



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌ها و منطقه مورد مطالعه

ماهانه  $\overline{\Delta T}$  : اختلاف درجه حرارت حداکثر و حداقل روزانه) به صورت رابطه (۸) می‌باشد. پارامتر  $C$  نیز ثابت تجربی و برابر  $2/4$  است.

$$B = 0.036 \times \exp(-0.154 \overline{\Delta T}) \quad (8)$$

#### مدل آنگستروم-پرسکات

این روش برای محاسبه تابش خورشیدی در ابتدا توسط آنگستروم (۱۹۲۴) پیشنهاد و سپس بوسیله پرسکات (۱۹۴۰) اصلاح گردید. این مدل بر اساس رابطه خطی بین نسبت تابش خورشیدی به تابش برون جوی ( $\frac{R_s}{R_a}$ ) و نسبت ساعات واقعی آفتابی به حداکثر ممکن ساعات آفتابی ( $\frac{n}{N}$ ) به صورت رابطه (۹) می‌باشد:

$$R_s = \left(0.25 + 0.5 \frac{n}{N}\right) R_a \quad (9)$$

ضرایب  $a = 0.25$  و  $b = 0.5$  ثابت‌های تجربی آنگستروم-پرسکات می‌باشند.

#### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از کوچک‌ترین حوضه‌های منطقه‌ای ایران است که در بخش شمال‌غرب ایران واقع شده است. این حوضه با وسعتی برابر  $52700$  کیلومتر مربع و مساحتی معادل  $3/2$  درصد مساحت کل کشور، بین مدارهای  $38^\circ 30'$  تا  $44^\circ 07'$  عرض شمالی قرار گرفته است. در این مطالعه داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه، سلماس، مهاباد و تکاب در غرب حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گرفت. موقعیت منطقه جغرافیایی مورد مطالعه و قرارگیری آن در کنار دریاچه ارومیه، به اهمیت

#### مدل آناندال

آناندال و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۲) یک فاکتور اصلاحی را برای در نظر گرفتن تأثیر کاهش ضخامت اتمسفر بر میزان تابش خورشیدی برای ضریب  $K_{RS}$  به صورت رابطه (۵) معرفی نمود:

$$\hat{K}_{RS} = (1 + 2.7 \times 10^{-5} Z) K_{RS} \quad (5)$$

که  $\hat{K}_{RS}$ : ضریب اصلاح شده،  $K_{RS}$ : ضریب تجربی ارائه شده توسط هارگریوز-سامانی (۰/۱۶) برای مناطق داخلی و ۰/۱۹ برای مناطق ساحلی) و  $Z$ : ارتفاع محل از سطح دریا (متر) می‌باشند.

#### مدل بریستف-کمپل

بریستف و کمپل (۱۹۸۴) رابطه (۶) را برای تعیین میزان تابش خورشیدی پیشنهاد نمودند:

$$R_s = T_t \times R_a \quad (6)$$

که  $R_s$ : تابش خورشیدی بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز،  $R_a$ : تابش برون جوی بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز و  $T_t$ : میزان کل تابش روزانه عبوری از جو می‌باشد که از رابطه (۷) تعیین می‌گردد:

$$T_t = A[1 - \exp(-B\Delta T^c)] \quad (7)$$

در این رابطه،  $A$ : کل پتانسیل تابش عبور از جو در یک آسمان صاف و بدون ابر (برابر  $0/7$ )،  $B$ : تابعی از متوسط درجه حرارت

در نهایت با استفاده از رابطه (۱۰) و نیز روابط (۱) تا (۹)، مقدار تبخیر-تعرق مرجع برای تمامی روزهای ژولینوسی و برای تمامی ایستگاه‌ها به طور مجزا محاسبه گردید.

#### معیارهای مقایسه مدل‌ها

به منظور بررسی تأثیر روش (مدل) مورد استفاده در محاسبه تابش خورشیدی در تعیین مقادیر تبخیر-تعرق مرجع، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای بایاس (MBE) استفاده شد (روابط ۱۱ و ۱۲):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{o,i} - X_{p,i})^2}{N}} \quad (11)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{o,i} - X_{p,i})}{N} \quad (12)$$

که در این روابط،  $X_{o,i}$ : میزان تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده با روابط ارائه شده در این مطالعه برای محاسبه تابش خورشیدی،  $X_{p,i}$ : میزان تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده با رابطه ارائه شده توسط فائو برای محاسبه تابش خورشیدی و  $N$ : تعداد مشاهدات می‌باشند.

شاخص میانگین مربعات خطا امکان مقایسه مابین مقادیر مشاهداتی و برآوردی را فراهم می‌نماید که مقدار پایین این شاخص نمایانگر عملکرد بهتر روش (مدل) مورد نظر می‌باشد. همچنین شاخص متوسط خطای بایاس نشان‌دهنده گرایش داده‌های برآوردی به مقدار واقعی آنها می‌باشد. به طوری که مقادیر نزدیک به صفر بیانگر مطلوبیت روش مورد استفاده است.

#### نتایج و بحث

نتایج مربوط به شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا و متوسط خطای بایاس در مقادیر تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده برای تمامی ایستگاه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین مقادیر ضرایب تبیین در جدول (۱) با استفاده از ضرایب تبیین خط برازش داده شده به مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده حاصل شده‌اند. به منظور مقایسه بهتر مقادیر تبخیر-تعرق مرجع واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف، شکل‌های (۲) تا (۸) به علت محدودیت صفحات مقاله فقط برای ایستگاه سینوپتیک ارومیه ارائه شده است. هر نقطه بر روی نمودارهای مزبور معرف مقدار واقعی و متناظر با آن مقدار برآورد شده توسط مدل مربوطه است. مشابه نمودارهای مورد نظر برای سایر ایستگاه‌ها نیز حاصل شد.

تحقیق و ارزیابی پارامترهای هواشناسی، تابش خورشیدی و در نهایت تبخیر-تعرق در این منطقه می‌افزاید. شکل (۱) موقعیت ایستگاه‌ها و منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در این تحقیق برای محاسبه روزانه تابش خورشیدی و سپس مقادیر تبخیر-تعرق مرجع، از متوسط داده‌های ۱۰ ساله ثبت شده پارامترهای هواشناسی در تمام ایستگاه‌های ذکر شده استفاده گردید. داده‌های مورد استفاده شامل پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر، ساعت آفتابی، سرعت باد، فشار بخار، بارندگی و رطوبت نسبی حداقل و حداکثر بودند. لازم به ذکر است که پس از بررسی داده‌ها، برای افزایش دقت محاسبات، مقادیر پرت حذف شده و محاسبات تنها با داده‌های قابل قبول انجام شد. مدل‌های شرح داده شده در بالا به منظور برآورد تابش خورشیدی و مقایسه آن با استفاده از تبخیر-تعرق مرجع می‌باشد.

#### معادله فائو - پنمن - مونتیث

برای تعیین مقادیر تبخیر-تعرق مرجع روزانه، ابتدا با استفاده از داده‌های روزانه پارامترهای هواشناسی، مقادیر تبخیر-تعرق مرجع روزانه از روش فائو-پنمن-مانتیث (رابطه ۱۰) برای دوره آماری موجود محاسبه شد. معادله فائو-پنمن-مانتیث به عنوان دقیق‌ترین روش برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع که در حال حاضر اساس محاسبات نیاز آبی می‌باشد. در این تحقیق نیز روش فائو-پنمن-مانتیث به عنوان یک روش مبنا انتخاب گردید. علت این انتخاب این است که آن و همکاران (۱۹۹۸) مدل مذکور را به عنوان یک روش استاندارد برای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل پیشنهاد کردند.

معادله فائو - پنمن - مونتیث به صورت زیر می‌باشد:

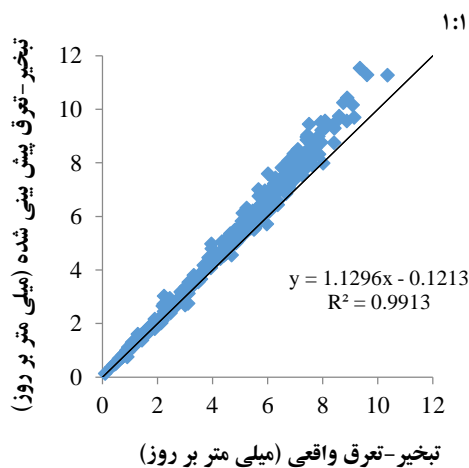
$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+237} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (10)$$

که در آن،  $ET_0$ : تبخیر-تعرق مرجع بر حسب میلی‌متر بر روز،  $R_n$ : تابش خالص ورودی به سطح گیاه بر حسب مگاژول بر متر مربع بر روز،  $G$ : شار گرمای خاک بر حسب مگاژول بر متر مربع بر روز،  $T$ : میانگین روزانه دمای هوا بر حسب درجه سانتیگراد،  $U_2$ : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری بر حسب متر بر ثانیه،  $e_s$ : فشار بخار اشباع بر حسب کیلو پاسکال،  $e_a$ : فشار بخار واقعی بر حسب کیلو پاسکال،  $e_s - e_a$ : کمبود فشار بخار اشباع بر حسب کیلو پاسکال،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سانتیگراد،  $\gamma$ : ضریب ثابت سایکرومتری بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سانتیگراد و  $0.34$ : ضریب باد برای گیاه مرجع بر حسب ثانیه بر متر می‌باشند.

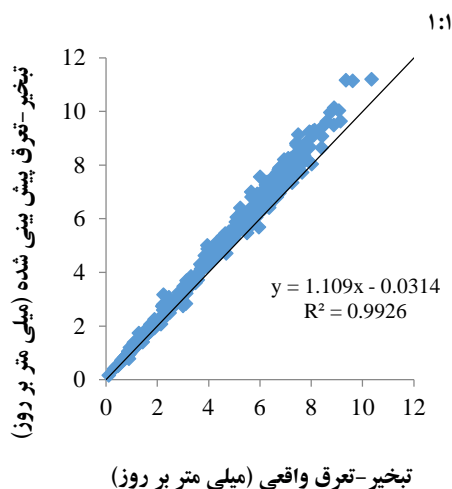
بهمنش و همکاران: ارزیابی مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در...

**جدول ۱- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده با استفاده از روش‌های مختلف برآورد تابش خورشیدی**

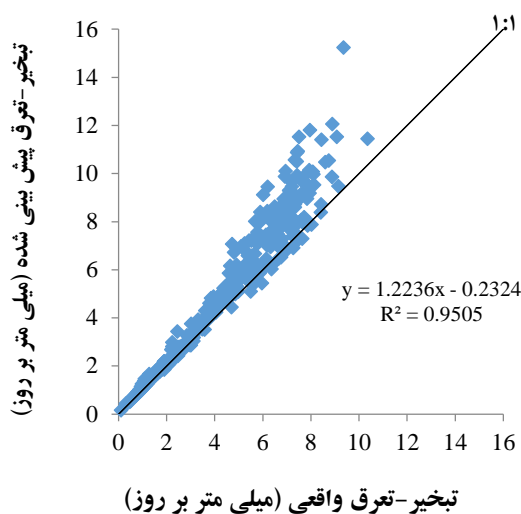
ایستگاه	شاخص آماری	روش‌های تخمین تابش خورشیدی					
		آنگستروم-پرسکات	سامانی	هارگریوز-سامانی	آناندال	آلن	بريستف-کمپیل
ارومیه	ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۴۱	۱/۱۴	۰/۵۵	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۶۸
	متوسط خطای بایاس	۰/۳۱	۰/۶۷	۰/۴۱	۰/۴۷	۰/۴	-۰/۱
	ضریب تبیین	۰/۹۹۷۵	۰/۹۵۰۵	۰/۹۹۲۶	۰/۹۹۲۴	۰/۹۹۱۳	۰/۹۹۳۶۳
تکاب	ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۴۸	۱/۸۹	۰/۸	۰/۹۱	۰/۸۲	۰/۵۱
	متوسط خطای بایاس	۰/۳۵	۱/۱۸	۰/۵۸	۰/۶۷	۰/۵۵	۰/۲۱
	ضریب تبیین	۰/۹۹۷۵	۰/۹۱۷۸	۰/۹۸۹	۰/۹۸۸۳	۰/۹۸۷۶	۰/۹۶۶۹
مه‌باد	ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۶۲	۱/۶۵	۰/۸۱	۰/۹	۰/۹۱	۰/۸۴
	متوسط خطای بایاس	۰/۴۷	۰/۹۱	۰/۵۷	۰/۶۴	۰/۶	-۰/۲۵
	ضریب تبیین	۰/۹۹۳۷	۰/۸۸۵۵	۰/۹۸۰۳	۰/۹۷۹۳	۰/۹۷۵۴	۰/۹۰۵
سلماس	ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۴۰	۱/۰۳	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۵۹	۰/۵۷
	متوسط خطای بایاس	۰/۳۱	۰/۵۷	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۰۱
	ضریب تبیین	۰/۹۹۷۶	۰/۹۳۹۳	۰/۹۹۰۹	۰/۹۹۰۶	۰/۹۸۹۹	۰/۹۴۵۱



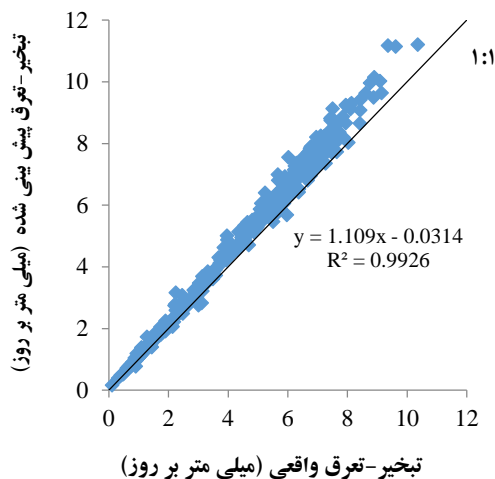
**شکل ۲- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل آلن**



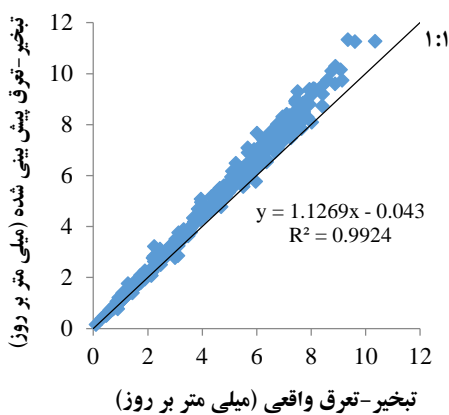
**شکل ۳- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل هارگریوز-سامانی**



شکل ۴- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و پیش بینی شده توسط مدل سامانی

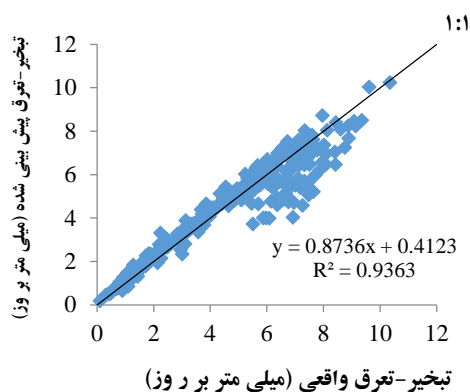


شکل ۵- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و پیش بینی شده توسط مدل خودکالیبراسیون

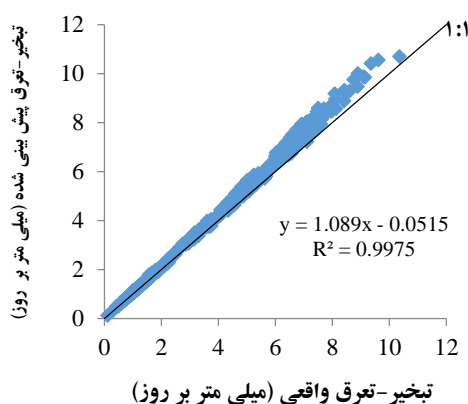


شکل ۶- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و پیش بینی شده توسط مدل آناندال

بهمنش و همکاران: ارزیابی مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در...



شکل ۷- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل بریستف-کمپیل



شکل ۸- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل آنگستروم-پرسکات

خورشیدی (به جز روش بریستف-کمپیل)، مقدار تبخیر-تعرق مرجع تخمین زده شده همواره بیشتر از مقدار تبخیر-تعرق مرجع واقعی معادله فائو-پنمن-مانتیث می‌باشد. در روش بریستف-کمپیل نیز مقدار تبخیر-تعرق مرجع برای ایستگاه‌های ارومیه و مهاباد کمتر و برای ایستگاه‌های تکاب و سلماس بیش از مقدار واقعی برآورد گردید.

با توجه به مقادیر ضریب تبیین جدول (۱) مشاهده می‌شود که بالاترین و پایین‌ترین دقت تخمین مقادیر تبخیر-تعرق مرجع در تمامی ایستگاه‌ها به ترتیب در مدل آنگستروم-پرسکات و مدل سامانی بود (به جز ایستگاه ارومیه که مدل بریستف-کمپیل پایین‌ترین دقت تخمین را دارا بود).

در شکل‌های (۲) تا (۸)، خط رسم شده نشان دهنده خط ۱:۱ یعنی خط مطلوب تخمین مقادیر تبخیر-تعرق مرجع می‌باشد. به طوری که مشاهده می‌شود در تمامی مدل‌های مورد استفاده (به جز مدل بریستف-کمپیل)، سایر مدل‌ها دارای بیش‌برآوردی در تخمین مقادیر تبخیر-تعرق مرجع بودند که این موضوع با شاخص آماری متوسط خطای بایاس نیز مشاهده شده بود. سپس بر اساس شاخص‌های آماری تعیین شده، مطلوبیت عملکرد روش‌های مورد استفاده برای هر ایستگاه تعیین و رتبه بندی شد که نتایج مربوطه در جدول (۲) ارائه شده است.

با توجه به مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و متوسط خطای بایاس ارائه شده در جدول (۱) مشاهده می‌شود که مقادیر این دو شاخص برای هر دو روش هارگریوز-سامانی و خودکالیبراسیون با هم یکسان می‌باشند. علت این امر در این است که در روش خودکالیبراسیون، تنها رابطه‌ای برای برآورد میزان تابش خورشیدی در آسمان صاف ( $R_{so}$ ) ارائه شده است و هر دو روش برای برآورد میزان تابش خورشیدی از رابطه (۲) استفاده می‌نمایند. با توجه به جدول (۱)، مقادیر تبخیر-تعرق مرجع تخمین زده شده از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر با یکدیگر تفاوت دارند. همچنین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برای روش آنگستروم پرسکات کمترین مقدار حاصل شد (۰/۴۰ تا ۰/۶۲ میلی‌متر بر روز). بنابراین روش آنگستروم-پرسکات بهترین روش تخمین میزان تابش خورشیدی و در نتیجه مقدار تبخیر-تعرق مرجع برای منطقه مورد مطالعه بود. دامنه تغییرات ریشه میانگین مربعات خطا برای روش سامانی نیز از ۱/۰۳ تا ۱/۸۹ میلی‌متر بر روز متغیر بود که بیشترین مقدار مشاهداتی برای این شاخص در تمامی ایستگاه‌ها بود که این امر بیانگر عملکرد نامطلوب این روش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین با توجه به مقادیر شاخص متوسط خطای بایاس در جدول (۱) مشاهده می‌شود که برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه و نیز برای تمامی روش‌های مورد استفاده در برآورد تابش



## جدول ۲- رتبه‌بندی روش‌های مختلف برآورد تابش خورشیدی برای تعیین تابش خورشیدی بر اساس شاخص ریشه میانگین مربعات خطا

روش‌های تخمین تابش خورشیدی							
ایستگاه	آنگستروم- پرسکات	سامانی	هارگریوز- سامانی	آناندال	آن	بريستف- کمپیل	خود کالیبراسیون
ارومیه	۱	۶	۲	۴	۳	۵	۲
نکاب	۱	۶	۳	۵	۴	۲	۳
مهاپاد	۱	۶	۲	۴	۵	۳	۲
سلماس	۱	۶	۳	۵	۴	۲	۳

و پایین‌ترین دقت تخمین مقادیر تبخیر-تعرق مرجع در تمامی ایستگاه‌ها به ترتیب در مدل آنگستروم-پرسکات و مدل سامانی بود (به جز ایستگاه ارومیه که مدل بریستف-کمپیل پایین‌ترین دقت تخمین را دارا بود). همچنین نتایج حاکی از بیش برآورد مقدار تبخیر-تعرق در تمامی مدل‌ها (به جز مدل بریستف-کمپیل)، می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج تحقیق حاضر می‌توان به این نتیجه رسید که برای منطقه مورد مطالعه، روش آنگستروم-پرسکات برای برآورد میزان تابش خورشیدی در اولویت استفاده می‌باشد و در صورت امکان باید از روش سامانی (به دلیل کمترین دقت) اجتناب نمود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت، مدل‌هایی که از ساعت آفتابی و نسبت ساعات واقعی آفتابی به حداکثر ممکن ساعات آفتابی استفاده نمی‌نمایند، دقت تخمینی پایینی در برآورد تابش خورشیدی دارند.

با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه و در دو روش هارگریوز-سامانی و خودکالیبراسیون رتبه یکسانی به هر دو روش اختصاص داده شده است که این امر بدلیل یکسان بودن مقادیر شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا و متوسط خطای بایاس در دو روش مورد نظر بود. همچنین روش آنگستروم-پرسکات بهترین روش برآورد تابش خورشیدی در تمامی ایستگاه‌ها می‌باشد. روش سامانی نیز ضعیف‌ترین روش برای محاسبه مقادیر تابش خورشیدی و نیز تبخیر-تعرق مرجع بود.

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که مقادیر تبخیر-تعرق مرجع تخمین زده شده از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر با یکدیگر تفاوت دارند. مقادیر ضریب تبیین محاسبه شده نشان داد که بالاترین

### منابع

- Aladenola, O. O. and C. A. Madramootoo. 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 procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. United Nations Food and Agricultural Organization (FAO), Rome.
- Allen, R. G. 1997. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2(2):56-67.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper No 56, Rome.
- Almorox, J. 2011. Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain. *Turkish Journal of Physics*, 35:53-64.
- Almorox, J., Benito, M. and C. Hontoria. 2005. Estimation of monthly Angstrom-PreScott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*, 30(6):931-936.

- 7- Annandale, J. G., Jovanic, N. Z., Benade, N. and R. G. Allen. 2002. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrigation Science*, 21(2):57–67.
- 8- Angstrom, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 50:121–125.
- 9- Ball, R. A., Purcell, L. C. and S. K. Carey. 2004. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. *Agronomy Journal*, 96:391–397.
- 10- Barker, H. W. 1992. Solar radiative transfer through clouds possessing isotropic variable extinction coefficient. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 118:1145–1162.
- 11- Bristow, K. L. and G. S. Campbell. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31(2):159–166.
- 12- Chen, R., Kang, E., Ji, X., Yang, J. and Z. Zhang. 2006. Trends of the global radiation and sunshine hours in 1961–1998 and their relationships in China. *Energy Conversion and Management*, 47(18-19):2859–2866.
- 13- De Jong, R. and D. W. Stewart. 1993. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 73:509–518.
- 14- Ehnberg, J. S. G. and M. H. J. Bollen. 2005. Simulation of global solar radiation based on cloud observations. *Solar Energy*, 78(2):157–162.
- 15- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1982. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2):96–99.
- 16- Hunt, L. A., Kuchar, L. and C. J. Swanton. 1998. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(3-4):293–300.
- 17- Iziomon, M. G. and H. Mayer. 2002. Assessment of some global solar radiation parameterizations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(15):1631–1643.
- 18- Mahmood, R. and K. G. Hubbard. 2002. Effect of time of temperature observation and estimation of daily solar radiation for the Northern Great plains. *Agronomy Journal*, 94(4):723–733.
- 19- Pelkowski, J. 2009. A physical rationale for generalized Angstrom–Prescott regression. *Solar Energy*, 83(7): 955-963.
- 20- Prescott, J. A. 1940. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 64:114–118.
- 21- Rehman, S. 1998. Solar radiation over Saudi Arabia and comparisons with empirical models. *Energy*, 23(12), 1077–1082.
- 22- Robaa, S. M. 2009. Validation of the existing models for estimating global solar radiation over Egypt. *Energy Conversion and Management*, 50(1):184-193.
- 23- Samani, Z. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4):265–267.
- 24- Şen, Z. 2008. *Solar energy fundamentals and modeling techniques*. Istanbul, Springer
- 25- Skeiker, K. 2006. Correlation of global solar radiation with common geographical and meteorological parameters for Damascus province. Syria. *Energy Conversion and Management*, 47(4):331-345.

- 26-Sonmete, M. H., Ertekin, C., Menges, H. O., Haciseferogullari, H. and F. Evrendilek. 2011. Assessing monthly average solar radiation models: a comparative case study in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 175(1):251–277.
- 27-Sozne, A., Arcaklioglu, E., Ozalp, M. and E. G. Kanit. 2005. Solar energy potential in Turkey. *Applied Energy*, 80(4):367-381.
- 28-Stöckle, C. O., Donatelli, M. and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4):289–307.
- 29-Supit, I. 1994. 15745-Global radiation. Luxembourg: Office for official publication of the European communities. Agricultural series, Cat. No.:CL-NA-15745-EN-C, pp. 194.
- 30-Trnka, M., Žalud, Z., Eitzinger, J. and M. Dubrovský. 2005. Global solar radiation in central european lowlands estimated by various empirical formulae. *Agricultural and Forest Meteorology*, 131:54–76.
- 31-Wan, K. K. W., Tang, H. L., Yang, L. and J. C. Lam. 2008. An analysis of thermal and solar zone radiation models using an Angstrom–Prescott equation and artificial neural networks. *Energy*, 33(7):1115 -1127.
- 32-Woli, P. and J. O. Paz. 2012. Evaluation of various methods for estimating global solar radiation in the southeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5):972–985.
- 33-Yang, K., Koike, T. and B. Ye. 2006. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137(1-2):43–55.