

مقاله علمی-پژوهشی

کاربرد الگوریتم هوشمند جهش قورباغه جهت واسنجی چند مدل تابش با هدف ارتقای دقت برآورد تبخیرتعرق مرجع در دو نمونه اقلیمی ایران

سیده نفیسه بنی‌هاشمی دهکردی^۱، بهرام بختیاری^{۲*}، کورش قادری^۲، محمدمهدی احمدی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۳

چکیده

معادله پنمن مانتیث فائو ۵۶ (FAO-56 PM) به‌عنوان یک روش استاندارد برای برآورد تبخیر تعرق مرجع (ET_0) در اقلیم‌های مختلف پیشنهاد شده است. برای برآورد تابش کلی خورشید (R_s)، به‌عنوان یکی از ورودی‌های ضروری این معادله، از مدل‌های متفاوتی استفاده می‌شود. این مطالعه به منظور واسنجی و اعتبارسنجی ۴ مدل برآورد R_s (آنگستروم-پریسکات، هارگریوز-سامانی، موبیرو و همکاران و چن و لی) در ایستگاه‌های اهواز (با اقلیم خشک) و همدان (با اقلیم نیمه‌خشک) در دوره اقلیمی ۱۹۹۲-۲۰۲۰ و تأثیر آن‌ها بر برآورد ET_0 انجام شد. ضرایب این مدل‌ها توسط الگوریتم هوشمند جهش قورباغه (SFLA) واسنجی شدند. برای بررسی عملکرد این مدل‌ها، مقادیر R_s برآورد شده با اندازه‌گیری شده مقایسه شد. بر اساس آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب نش-سانکلیف (NS)، در ایستگاه اهواز مدل آنگستروم-پریسکات با داشتن کمترین خطا $RMSE=0.929$ ، $R^2=0.918$ و $NS=0.896$ و در ایستگاه همدان مدل موبیرو و همکاران با داشتن $R^2=0.875$ و $R^2=0.925$ و $RMSE=0.860$ و $NS=0.860$ بهترین عملکرد را در برآورد تابش خورشیدی داشته‌اند. درصد اختلاف ET_0 محاسبه شده توسط R_s برآورد شده در مقایسه با R_s اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه در همه مدل‌ها، کاهش در حدود ۲۰٪ نشان داد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، پنمن مانتیث فائو، تابش خورشید، واسنجی، SFLA

مقدمه

که با وجود اهمیت آن، به دلیل محدودیت‌های فنی و مالی جهت تهیه، نگهداری و واسنجی ابزارهای تابش‌سنجی، نسبت به سایر متغیرهای هواشناسی به‌صورت گسترده اندازه‌گیری نمی‌شود (سلطانی و مرید، ۱۳۸۴). همین امر باعث ارائه مدل‌های مختلف تابش توسط محققان شده است. مدل‌های تجربی یک روش نسبتاً ساده برای برآورد تابش کلی خورشید (R_s) ارائه می‌دهند. به‌طور کلی چهار دسته از مدل‌های تجربی بر اساس ابرناکی، دما، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سایر متغیرهای هواشناسی تعریف شده‌اند (Besharat et al., 2013). مدل آنگستروم-پریسکات که R_s را با استفاده از تعداد ساعات آفتابی برآورد می‌کند، از پرکاربردترین آن‌ها است (Zhao et al., 2013). با وجود این که عملکرد بهتر در واسنجی مدل‌های مبتنی بر ساعت آفتابی برای برآورد R_s تأیید شده است، عدم وجود یا ناکافی بودن داده‌های ثبت‌شده ساعت آفتابی، منجر به عدم کاربرد مدل آنگستروم-پریسکات در برخی از مناطق شده است؛ بنابراین، توسعه مدل‌هایی که تنها مبتنی بر ساعات آفتابی نباشد ضروری به نظر می‌رسد. به‌طور مثال با توجه به اینکه دمای هوا یکی از در دسترس‌ترین متغیرهای هواشناسی است، لذا توسعه مدل‌های مبتنی

بیشتر مناطق ایران را اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند (Khanmohammadi et al., 2017). با توجه به هدر رفت منابع آب از طریق تبخیر تعرق در این مناطق، ضروری است تا مقدار این مؤلفه هیدرولوژیک (تبخیر تعرق) در مناطق مختلف برآورد گردد (Li et al., 2003). کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان خوار و بار جهانی، معادله پنمن مانتیث فائو ۵۶ (FAO-56 PM) را به‌عنوان یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع (ET_0) معرفی کرده‌اند (Xing et al., 2008; Pereira et al., 2002). یکی از پارامترهای مهم در تعیین مقدار تبخیر تعرق، تابش خورشیدی است

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

*- ایمیل نویسنده مسئول: (Email: drbakhtiari@uk.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.2.1.0

ارائه شده در مدل‌ها، منجر به ارائه نتایج واقعی و همخوان با اقلیم مناطق مختلف آن نمی‌شود. لذا ضروری است تا این ضرایب با استفاده از داده‌ها و خصوصیات اقلیمی مناطق مختلف کشور واسنجی شوند (سبزی پرور و همکاران، ۱۳۸۷). برخی مطالعات برای شبیه‌سازی R_s در ماتریس پیشینه تحقیقات جدول ۱ ارائه شده است.

بر دما نیز ضروری است (Besharat et al, 2013). همه مدل‌های تجربی تابش دارای اجزاء و ضرایب ثابتی هستند که با استفاده از فرضیات و داده‌های ایستگاه‌های مناطق دیگر دنیا به دست آمده‌اند و ممکن است شرایط اقلیمی آن‌ها با کشور ایران همخوانی و مشابهت نداشته باشد. از آن‌جا که دقت مدل‌های تابش تا حد زیادی به ضرایب ثابت آن‌ها وابسته است، استفاده از ضرایب ثابت

جدول ۱- ماتریس پیشینه تحقیقات

منابع	منطقه / سال	مدل‌ها و معادلات مورد بررسی	مدل‌های پیشنهادی برای مناطق مورد مطالعه
سبزی پرور و همکاران (۱۳۸۷)	همدان (نیمه‌خشک) ۱۳۷۲-۱۳۷۳	۴ معادله ET_0 (جنسن هیز اصلاح‌شده، جنسن هیز، پنمن مانیتث فائو (FAO-56 PM)، FAO-56 PM با تابش ایرماک)، ۵ مدل تابش کلی خورشید (آنگستروم-پریسکات، پاتریج، دانشیار، صباغ، ایرماک)	معادله جنسن هیز با تابش دانشیار، معادله FAO-56 PM با تابش پاتریج و معادله FAO-56 PM با تابش ایرماک
موسوی بایگی و همکاران (۱۳۸۹)	مشهد (نیمه‌خشک) ۲۰۰۵	۴ معادله ET_0 (FAO-56 PM، فائو پنمن مانیتث با تابش ایرماک، جنسن-هیز ۱، جنسن-هیز ۲) مدل‌های تابش کلی خورشید (آنگستروم-پریسکات، صباغ، گلور، مک-کالور، بلک)	معادله FAO-56 PM با مدل تابش آنگستروم-پریسکات
بابامیری و همکاران (۱۳۹۲)	ارومیه (نیمه‌خشک) ۱۹۸۶-۲۰۱۰	۷ معادله ET_0 (دورنبوس-پرویت، پریستلی-تیلور، مکینگ، جنسن-هیز، تورک، آبتیو، مکینگز-بوردن)	معادله دورنبوس-پرویت- معادله پریستلی تیلور
مهدی زاده و بهمنش (۱۳۹۵)	ارومیه، تکاب، مهاباد، سلماس (نیمه‌خشک) ۱۳۷۷-۱۳۸۷	برآورد ضرایب مدل آنگستروم-پریسکات (مدل‌های ریتولد، فرر و همکاران-ساموئل، گوپیناتان a، گوپیناتان b، چین و همکاران، لئو و همکاران)، معادله FAO-56 PM	مدل ریتولد
بهمنش و همکاران (۱۳۹۶)	ارومیه، تکاب، مهاباد، سلماس (نیمه‌خشک) ۱۳۷۷-۱۳۸۷	مدل هارگریوز-سامانی، آلن، سامانی، آناندال و همکاران، بریستف-کمپیل، آنگستروم-پریسکات، معادله FAO-56 PM	مدل آنگستروم-پریسکات
قمرنیا و یوسفوند (۱۳۹۷)	۱۵۴ ایستگاه در ایران (خشک) (نیمه‌خشک) (مرطوب، نیمه مرطوب و بسیار مرطوب) (مدیترانه‌ای) ۲۰۱۳-۱۹۹۹	تورک و تورک اصلاح‌شده، هارگریوز، مک کینگ، پریستلی-تیلور، جنسن-هیز، امسی گاینس و بوردن، جانز و ریچ، ایرماک، هانسن، دورنباس و پرویت، آبتیو، طبری و همکاران، معادله FAO-56 PM	مدل هانسن، مدل آبتیو (خشک) مدل ایرماک، مدل هانسن (نیمه‌خشک) مدل پریستلی-تیلور، مدل ایرماک (مرطوب، نیمه مرطوب و بسیار مرطوب) مدل تورک اصلاح‌شده، مدل مک کینگ (مدیترانه‌ای)
Sabziparvar et al. (2013)	۱۵ ایستگاه در ایران (خشک- نیمه‌خشک) ۲۰۰۷-۱۹۸۰	مدل آنگستروم-پریسکات (ضرایب پیشنهادی توسط فائو، ضرایب واسنجی شده FAO-56 PM محلی)، معادله	مدل آنگستروم-پریسکات با ضرایب واسنجی شده محلی
Tabari et al. (2016)	تبریز و اصفهان (خشک- نیمه‌خشک) ۲۰۰۵-۲۰۰۰	۱۲ مدل تابش کلی خورشید (هارگریوز-سامانی، آلن، سامانی، آناندال، چن، ال-سبائی، ارتکین-یالدیز، توگرول-اونات، آلموروکس و هانتوریا، اوگلمن، FAO-56 PM دوگنیوکس-لموئین، گلور-مک کولوچ)، معادله	مدل آلن (نیمه‌خشک) دوگنیوکس-لموئین (خشک)

ادامه جدول ۱- ماتریس پیشینه تحقیقات

منابع	منطقه / سال	مدل‌ها و معادلات مورد بررسی	مدل‌های پیشنهادی برای مناطق مورد مطالعه
Maroufpoor et al. (2020)	۳۱ ایستگاه در ایران (خشک- نیمه خشک) ۲۰۱۲-۲۰۱۷	۷ سناریو مدل شبکه عصبی مصنوعی، ۷ سناریو مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی-الگوریتم گرگ خاکستری	مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی-الگوریتم گرگ خاکستری
Aladenola and Madramootoo (2013)	۸ ایستگاه در کانادا (نیمه خشک تا مرطوب) ۱۹۹۸-۲۰۰۴	مدل‌های آنگستروم-پریسکات، هارگریوز-سامانی، آناندل و همکاران، آلن، سامانی، خودکالیبراسیون FAO-56 PM آلن، محمود و هابارد، بریستف-کمپیل، معادله	مدل آنگستروم-پریسکات و مدل هارگریوز-سامانی
Ndulue et al. (2019)	۳ ایستگاه در نیجریه (آبکالیکی، نسوگا، اوک) (مرطوب) ۱۹۸۳-۲۰۱۵	هارگریوز-سامانی، بریستف-کمپیل، سوارتمن-اوگونلاد، چن ۱، ال-۱۵ مدل تابش کلی خورشید (سبایی، آلوروکس و هانتوریا، اوکلن، دوگنیوکس و لموتین، گلوور-مک کولوج، مدل الایب و FAO-56 PM مانسل، چن ۲، آدالا، حسن، آنگستروم-پریسکات، از کوه و ایزیفو) معادله	مدل سوارتمن-اوگونلاد، مدل چن ۲ (آبکالیکی) مدل سوارتمن-اوگونلاد، مدل آدالا (نسوگا) مدل سوارتمن-اوگونلاد، مدل چن ۲ (اوکا)
Cunha et al. (2021)	۵۱ ایستگاه در برزیل (نیمه خشک) ۲۰۰۳-۲۰۱۸	۱۵ مدل تابش کلی خورشید (آبراهام لینکلن و سویج، آبراه و سویج-ویس و همکاران، آلوروکس و همکاران، آناندل و همکاران، بریستف و کمپیل، چن و همکاران، دجونگ و استوارت، دونالدلی و کمپیل، گودین و همکارانش، هارگریوز، هانت و همکاران ۱، محمود و هابارد، مزا و وارس، هانت و FAO-56 PM همکاران ۲، تورتون و راینینگ)، معادله	مدل تورتون و راینینگ

به‌طور کلی اهداف این مطالعه شامل واسنجی ضرایب ۴ مدل تجربی برآورد R_s (آنگستروم-پریسکات، هارگریوز-سامانی، مویبرو و همکاران و چن و لی) توسط الگوریتم SFLA و اعمال آن در معادله FAO-56 PM جهت برآورد ET_0 در دو نمونه اقلیمی خشک و نیمه خشک، مقایسه مدل‌های برآورد R_s واسنجی شده برای مناطق مطالعاتی و پیشنهاد مناسب‌ترین مدل از بین مدل‌های برآورد R_s مورد استفاده در این مطالعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، دو ایستگاه سینوپتیک اهواز و همدان به‌عنوان نمونه‌های اقلیمی خشک و نیمه خشک (بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن) انتخاب شدند (شکل ۱) (De Martonne, 1926). داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، متغیرهای بیشینه دما (T_{max})، کمینه دما (T_{min})، میانگین دما (T_{mean})، میانگین رطوبت نسبی (RH_{mean})، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (U_2)، ساعت آفتابی (n) به‌عنوان ورودی و R_s به‌عنوان خروجی مدل‌ها، در مقیاس زمانی روزانه طی دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۲ (۲۸ سال) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردیدند. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

در یک جمع‌بندی از پیشینه تحقیقات جدول ۱ مشخص می‌شود که برای واسنجی ضرایب R_s سه روش مورد استفاده قرار گرفته است؛ این سه روش شامل روش‌های تجربی، الگوریتم‌های فرایتکاری و روش‌های هوش مصنوعی می‌باشند. اکثر مطالعات انجام شده در زمینه واسنجی ضرایب R_s از روش‌های تجربی و روش‌های هوش مصنوعی استفاده نموده‌اند. از معایب روش‌های تجربی، زیاد بودن تعداد پارامترهای به‌کاررفته در معادلات و دقت پایین این روش‌ها می‌باشد (Zhao et al, 2013). مطالعات قبلی در جهت واسنجی ضرایب R_s و برآورد ET_0 در ایران توانایی روش‌های هوش مصنوعی را تحت شرایط اقلیم‌های مختلف ثابت کرده است؛ بنابراین در این مطالعه روش الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری مورد توجه قرار گرفته است. البته کاربردهای کمی از این روش‌ها برای حل مشکلات انرژی خورشیدی گزارش شده‌اند که الگوریتم ژنتیک (GA) و جستجوی هارمونی (HS) از این روش‌ها هستند (Rahimi et al. 2012). در این مطالعه نوع دیگری از این روش‌ها به نام الگوریتم جهش قورباغه (SFLA) به کار برده شده است. این الگوریتم جزو الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که اولین بار توسط یوسف و لانسلی پیشنهاد شد (Eusuf and Lansley, 2003). الگوریتم SFLA به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری، نیاز نداشتن به مشتق‌گیری و توازن بین مبادله جستجوی سراسری و محلی مورد توجه قرار گرفته است.

مدل‌سازی و ادامه مطالعه انتخاب شدند. روش کنترل کیفیت توسط مرادی به این صورت است که اگر R_s/R_a یا n/N بیشتر از یک باشد، داده‌های آن روز از مجموعه داده حذف می‌شوند. اگر $R_s < 0.78$ ، داده‌های آن روز از مجموعه داده حذف می‌شوند و اگر $R_s < 0.3 R_a$ ، داده‌های آن روز حذف می‌شوند.

ناپوستگی و عدم کیفیت داده‌ها مسئله‌ای است که ممکن است طی یک دوره در سری زمانی داده‌های مورد استفاده وجود داشته باشد؛ بنابراین به منظور کنترل کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده، از الگوریتم کنترل کیفیت ارائه شده توسط مرادی استفاده شد (Moradi, 2009). بر اساس الگوریتم ارائه شده، داده‌های R_s با سه شرط مقایسه گردیدند و تنها داده‌هایی که در هر سه مرحله صحت آن‌ها تأیید گردید برای

جدول ۲- ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی مناطق مطالعاتی طی سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۲۰

ایستگاه سینوپتیک	طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)	ارتفاع (m)	دمای بیشینه (°C)	دمای کمینه (°C)	ساعت آفتابی (hr)	میانگین روزانه			اقلیم	
							تابش کلی خورشید (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	رطوبت نسبی (%)	تبخیر تعرق (mm.d ⁻¹)		
اهواز	۴۸/۷	۳۱/۳	۲۰	۳۴	۱۹	۹	۱۷	۲۰/۲	۸/۵	۱۹۹۲-۲۰۱۴	خشک
همدان	۴۸/۵	۳۴/۹	۱۳۷۴	۲۰/۲	۴/۴	۸/۶	۲۰	۴۸/۸	۷/۶	۱۹۹۲-۲۰۱۴	نیمه‌خشک

مدل‌های برآورد تابش کلی خورشید (R_s)

برای برآورد مقدار R_s رسیده به سطح زمین، تاکنون مطالعات و مدل‌های بسیاری ارائه شده است. در این پژوهش ۴ مدل برآورد R_s شامل آنگستروم-پریسکات (Prescott, 1940)، هارگریوز-سامانی (Hargreaves and Samani, 1982)، مویبرو و همکاران (Mubiru et al., 2007) و چن و لی (Chen and Li, 2012) مورد استفاده قرار گرفت.

معادله پنمن مانیتث فائو (FAO-56 PM)

در این پژوهش از معادله مبنای FAO-56 PM برای برآورد ET_0 استفاده شد (Allen et al., 1998). متغیرها، مدل‌های مورد استفاده و معادلات به کار رفته در این پژوهش به ترتیب در جداول ۳ تا ۵ آورده شده‌اند. در جدول ۳ متغیرها در محاسبه تبخیر تعرق معادله FAO-56 PM و مدل‌های تابش به کار رفته‌اند. تمام متغیرهای نام‌برده در جدول ۳ در معادلات جدول ۵ استفاده شده‌اند.

جدول ۳- متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه و واحدهای آن‌ها

نماد	متغیر (واحد)	نماد	متغیر (واحد)
ET_0	تبخیر تعرق گیاه مرجع (mm.d ⁻¹)	α	آبیدوی سطح = ۰/۲۳
Δ	شیب منحنی فشار بخار اشباع بر حسب دما (kpa.°C ⁻²)	U_2	متوسط سرعت باد روزانه در ارتفاع ۲ متری (m.s ⁻¹)
γ	ثابت سایکرومتری (kpa.°C ⁻²)	a to j	ضرایب واسنجی شده مدل‌های تجربی
R_s	شدت تابش کلی روزانه خورشید (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	R_a	شدت تابش برون زمینی روزانه (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)
λ	گرمای نهان تبخیر (2.45 MJ.kg ⁻¹)	T_{mean}	متوسط دمای هوای روزانه (°C)
RH	رطوبت نسبی (%)	N	بیشینه ساعت آفتابی روزانه (hr)
h	ارتفاع (m)	n	ساعت آفتابی واقعی (hr)
T_{max}	دمای بیشینه روزانه (°C)	P	فشار جو (kpa)
T_{min}	دمای کمینه روزانه (°C)	e_s	فشار بخار اشباع (kpa)
R_n	شدت تابش خالص خورشیدی (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	e_a	فشار بخار واقعی (kpa)
G	شار حرارتی خاک در سطح زمین (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	ϕ	عرض جغرافیایی (rad)
d_r	فاصله نسبی زمین تا خورشید	J_s	شماره روز ژولیس از اول ژانویه
ω_s	زاویه ساعتی غروب آفتاب (rad)	δ	زاویه میل خورشیدی (rad)
M	شماره ماه سال	D	شماره روز از ماه

جدول ۴- مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه

پارامترها	مدل‌ها	منبع
R_s, R_a, n, N	$R_s = [a + b \times (n/N)] \times R_a$	(Prescott, 1940)
$R_s, R_a, T_{max}, T_{min}$	$R_s = [c \times (T_{max} - T_{min})^{0.5}] \times R_a$	(Hargreaves and Samani, 1982)
R_s, R_a, RH_{mean}	$R_s = [d + eRH_{mean}] \times R_a$	(Mubiru et al., 2007)
$R_s, R_a, n, N, T_{max}, T_{min}, RH_{mean}$	$R_s = [f + g(n/N) + hT_{min} + iT_{max} + jRH_{mean}] \times R_a$	(Chen and Li, 2012)

جدول ۵- معادلات به کار رفته در برآورد مدل‌های تابش کلی خورشید و برآورد تبخیر تعرق

معادلات	منبع
$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) \times T_{mean}$	علیزاده (۱۳۸۶)
$\Delta = \frac{2.504 \times \exp [17.27 \times \frac{T_{mean}}{T_{mean} - 273.3}]}{(T_{mean} + 273.3)^2}$	علیزاده (۱۳۸۶)
$P = 101.3 \times ((293 - 0.0065 \times h)/293)^{5.26}$	علیزاده (۱۳۸۶)
$\gamma = 0.00163 \times P/\lambda$	علیزاده (۱۳۸۶)
$e_a = 0.611 \times \exp((17.27 \times T_{mean})/(T_{mean} + 273.3))$	علیزاده (۱۳۸۶)
$e_d = RH_{mean}/((50/e_a - T_{max}) + (50/e_a - T_{min}))$	علیزاده (۱۳۸۶)
$R_a = 37.6 \times d_r (W_s \times \sin\phi \times \sin\delta + \cos\phi \times \cos\delta \times \sin W_s)$	علیزاده (۱۳۸۶)
$J = \text{integer} ((275 \times M/9) - 30 + D) - 2$	(Duffie and Beckman, 1980)
$W_s = \text{arc cos} (-\tan\phi \times \tan\delta)$	(Duffie and Beckman, 1980)
$d_r = 1 + 0.33 \times \cos(0.0172 \times J)$	(Duffie and Beckman, 1980)
$\delta = 0.409 \times \sin(0.0172 \times J - 1.39)$	(Duffie and Beckman, 1980)
$N = 7.64 \times W_s$	(Duffie and Beckman, 1980)
$R_n \text{ calibrated} = (0.462 \times R_s \text{ calibrated} - (0.09 \times T_{max}) + (0.203 \times T_{min}) - (0.101 \times RH_{mean})) + 3.97$	(Irmak et al., 2003)
$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34U_2)}$	(Allen et al., 1998)

ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش- ساتکلیف (NS) استفاده شد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{Ocalib} - \mu_{calib})(ET_{Ocomp} - \mu_{comp})}{\left[\sum_{i=1}^n (ET_{Ocalib} - \mu_{calib})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (ET_{Ocomp} - \mu_{comp})^2 \right]^{0.5}} \right]^2 \quad (۱)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (ET_{Ocalib} - ET_{Ocomp})^2 \right]^{1/2} \quad (۲)$$

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{Ocalib} - ET_{Ocomp})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{Ocalib} - \mu_{calib})^2} \right] \quad (۳)$$

که در آن‌ها ET_{Ocalib} و ET_{Ocomp} به ترتیب مقدار تبخیر تعرق مرجع واسنجی شده و محاسبه شده (مگا ژول بر مترمربع بر روز)، μ_{cal} و μ_{comp} به ترتیب میانگین تبخیر تعرق مرجع واسنجی شده و محاسبه شده (مگا ژول بر مترمربع بر روز) و M تعداد مشاهدات می‌باشند.

الگوریتم جهش قورباغه

الگوریتم جهش قورباغه^۱ (SFLA)، یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری است که از رفتار اجتماعی قورباغه‌ها الهام گرفته شده است و از نظر طبقه‌بندی، در میان الگوریتم‌های رفتاری یا الگوریتم‌های رفتاری^۲ قرار می‌گیرد. این الگوریتم، نسخه توسعه یافته الگوریتم تکامل رقابتی جوامع^۳ است که یکی از الگوریتم‌های نسبتاً با سابقه در حوزه بهینه‌سازی هوشمند است. کد الگوریتم SFLA در جدول ۶ نشان داده شده است. برای تشکیل جمعیت اولیه ابتدا تعداد دسته‌های مورد نظر و تعداد قورباغه‌هایی که می‌بایست در هر دسته قرار گیرند مشخص می‌شوند. سپس تابع هدف برای تمام نمونه‌های تولید شده محاسبه می‌گردد. مرتب‌سازی و توزیع تعداد کل قورباغه‌های انتخابی بر اساس تابع هدف محاسبه شده، مرتب می‌شوند به گونه‌ای که نمونه با کمترین تابع هدف و بهترین موقعیت در اولین مکان قرار گیرد.

معیار ارزیابی عملکرد مدل‌ها

برای ارزیابی دقت برآورد مدل‌های R_s و معادله FAO-56 PM از

- 1- Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA)
- 2- Memetic Algorithms
- 3- Shuffled Complex Evolution (SCE)

جدول ۶- کد الگوریتم SFLA (Eusuff et al., 2006)

```

Begin;
CF=@(x)ang(x);
n=2;          VarSize=[1 n];
VarMin=0;
VarMax=1;      IT=1000;
nMemplex=1;
nPopMemplex=100;
nPopMemplex=max(nPopMemplex, n+1);
nPop=nMemplex*nPopMemplex;
fla.q=max(round(0.5*nPopMemplex),2);
fla.alpha=1;
fla.beta=5;
fla.CostFunction=CF;
fla.VarMin=VarMin;
fla.VarMax=VarMax;
empty_individual.P=[];
empty_individual.Cost=[];
pop= repmat(empty_individual, nPop,1);
for i=1:nPop
    pop(i).P=unifrnd(VarMin,VarMax, VarSize);
    pop(i).Cost=CF(pop(i).P);
end
pop= SORTT(pop);
I=reshape(1:nPop,nMemplex,[]);
BestSol=pop(1);
BestCost=nan(IT,1);
for it=1:IT
    fla.BestSol=BestSol;
    Memplex =cell(nMemplex, 1);
    for j=1:nMemplex
        Memplex{j}=pop(I(j,:));
        Memplex{j}=fla(Memplex{j},fla)
        pop(I(j,:))=Memplex{j};
    end
    pop= SORTT(pop);
    BestSol=pop(1);
    BestCost(it)=BestSol.Cost;
    disp(['It=' num2str(it) ' Best=' num2str(BestCost(it))])
end
    
```

نتایج و بحث

بیشینه و دمای کمینه) می‌باشد ولی در مدل آنگستروم-پریسکات تنها پارامتر به کاررفته ساعت آفتابی می‌باشد. در ایستگاه همدان همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است مدل مویبرو و همکاران نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.

در شکل ۱ نتایج نشان می‌دهد در ایستگاه اهواز بیشترین مقدار R^2 در مدل آنگستروم-پریسکات و کمترین آن در مدل هارگریوز-سامانی می‌باشد و با انجام اعتبارسنجی، صحت این موارد اثبات شد. این نتایج نشان می‌دهد که پارامتر ساعت آفتابی مؤثرتر از بقیه پارامترها در ایستگاه اهواز عمل می‌کند. همچنین مشخص شد که مدل آنگستروم-پریسکات نسبت به مدل چن و لی حدود ۱۰ درصد عملکرد بهتری داشته است. ولی در ایستگاه همدان نتایج نشان می‌دهد که مدل مویبرو و همکاران عملکرد بهتری نسبت به سایر

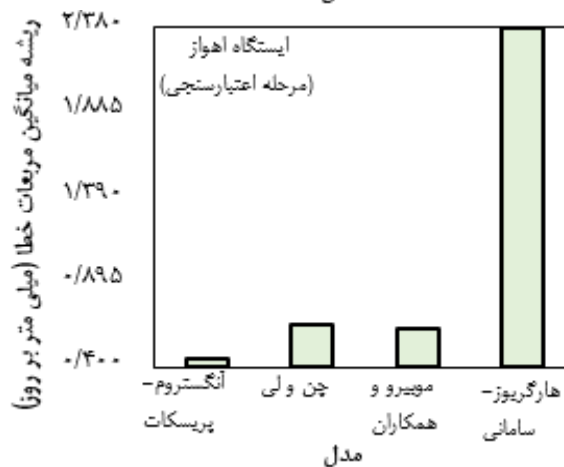
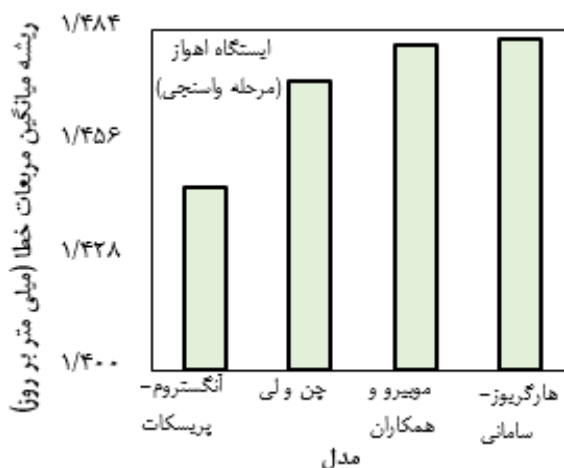
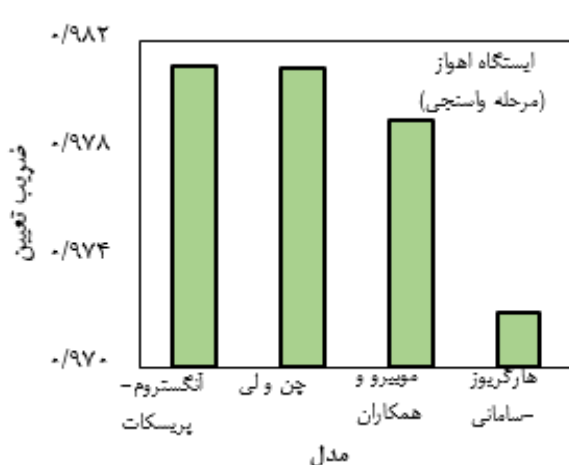
نتایج مربوط به شاخص‌های RMSE و R^2 در جهت ارزیابی دقت معادله برآورد ET_0 برای ایستگاه‌های مطالعاتی در شکل ۱ ارائه شده است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مقادیر دو شاخص RMSE و R^2 در دو ایستگاه سینوپتیک اهواز و همدان برای هر دو مدل آنگستروم-پریسکات و چن و لی با هم یکسان می‌باشند. همچنین دو مدل چن و لی و آنگستروم-پریسکات در ایستگاه اهواز نسبت به دو مدل دیگر عملکرد بهتری دارند ولی عملکرد مدل آنگستروم-پریسکات در برآورد R_s در جهت محاسبه ET_0 بهینه در ایستگاه اهواز مناسب‌تر است. علت این انتخاب در این است که مدل چن و لی دارای تعداد پارامترهای بیشتر از جمله (رطوبت نسبی، دمای

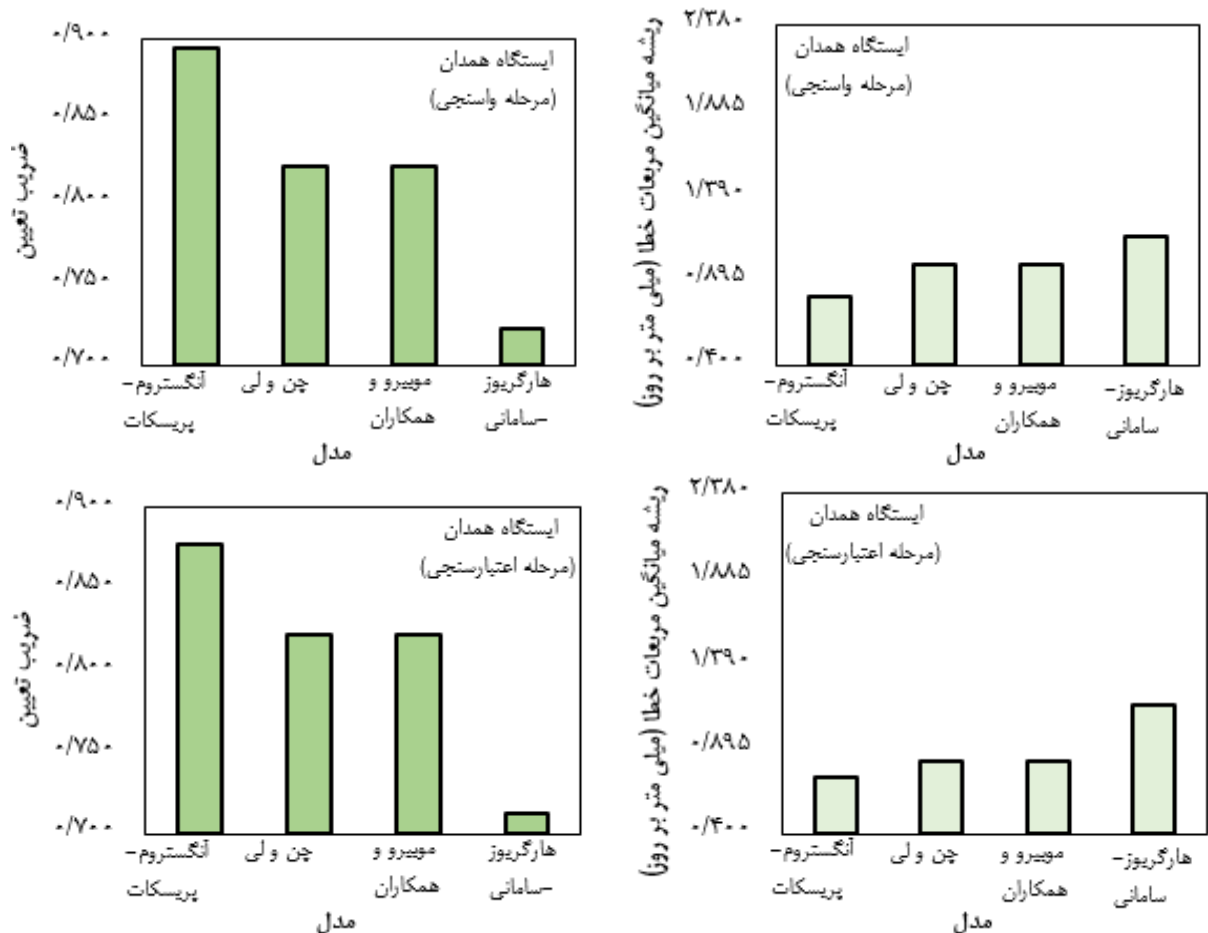
ایستگاه همدان نسبت به سایر مدل‌ها نشان می‌دهد که مؤثرترین پارامتر در برآورد تابش خورشیدی، رطوبت نسبی می‌باشد. مدل مناسب برای دو اقلیم مطالعاتی در جدول ۷ نشان داده شده است.

مدل‌ها داشته است. با انجام اعتبارسنجی مشخص گردید که مدل موبیرو و همکاران حدود ۱۵ درصد نسبت به مدل آنگستروم-پریسکات و چن و لی و حدود ۱۸ درصد نسبت به مدل هارگریوز-سامانی بهتر عمل کرده است. برتری مدل موبیرو و همکاران در

جدول ۷- انتخاب مدل مناسب در دو اقلیم مطالعاتی توسط الگوریتم SFLA

اقلیم	بهترین مدل	بدترین مدل
خشک	مدل آنگستروم-پریسکات	هارگریوز-سامانی
نیمه‌خشک	موبیرو و همکاران	هارگریوز-سامانی



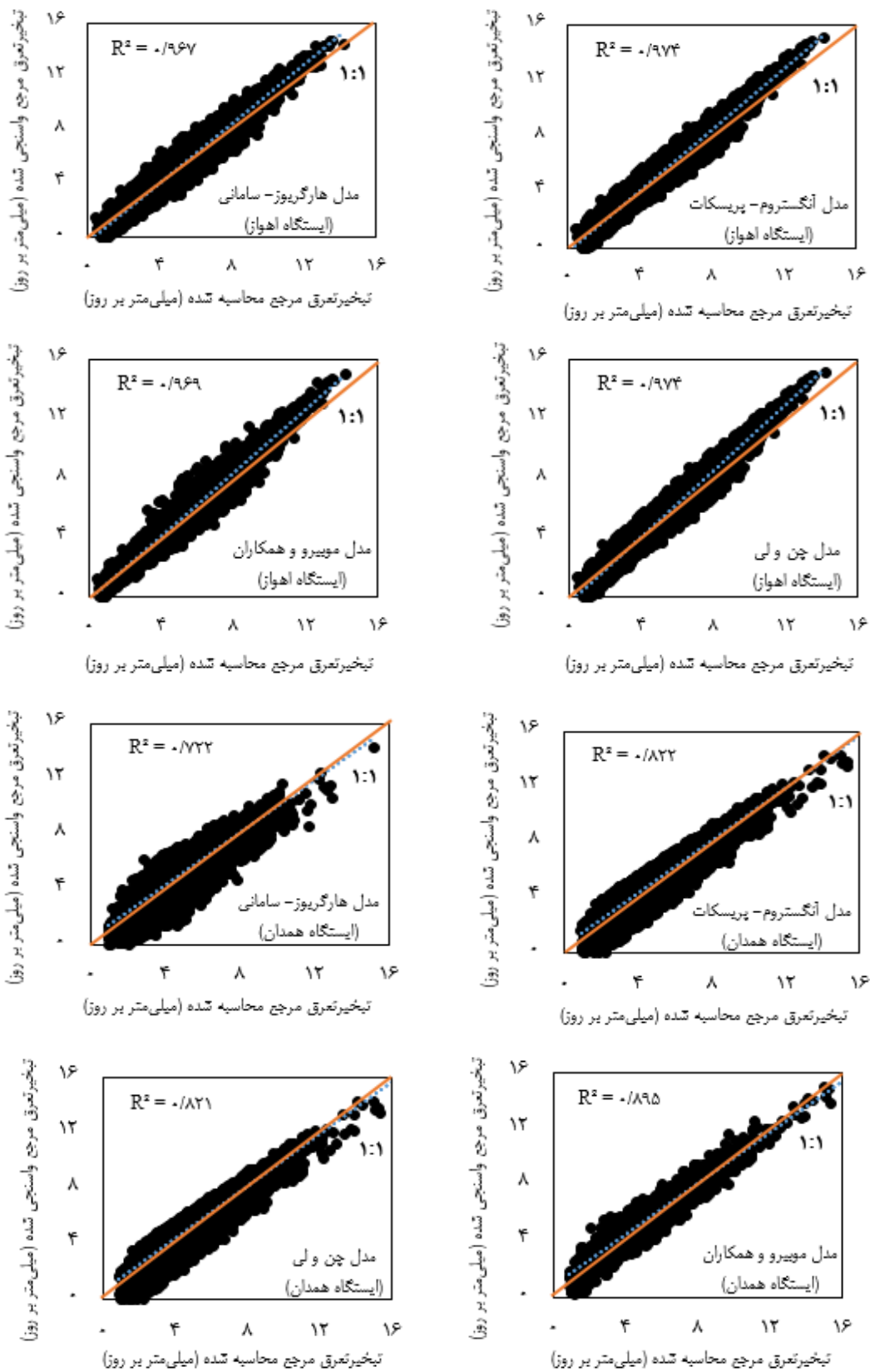


شکل ۱- مقایسه ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا بین مرحله واسنجی و اعتبار سنجی مقدار FAO-56 PM با الگوریتم بهینه‌سازی SFLA برای ایستگاه اهواز و همدان

اهواز نمی‌باشد.

در جدول ۸ نتایج مربوط به شاخص‌های $RMSE$ و R^2 در جهت ارزیابی دقت مدل برآورد R_s برای ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه شده است. برای مشخص نمودن برتری مدل‌ها در برآورد ET_0 تنها نمودارهای ET_0 کافی نیست و قبل از برآورد مقدار ET_0 باید R_s بهینه گردد. در جهت بهینه‌سازی از الگوریتم SFLA برای کالیبره کردن ضرایب مدل‌های R_s استفاده گردید و نتایج به صورت جدول ۸ آورده شده است. چنانچه در جدول ۸ مشخص است، در ایستگاه اهواز مدل آنگستروم-پریسکات با داشتن کمترین خطا و بالاترین مقدار ضریب NS بهترین عملکرد را در برآورد تابش خورشیدی داشته است. برتری این مدل نشان می‌دهد که پارامتر ساعت آفتابی نسبت به پارامترهای دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است. مطابق جدول ۸ در ایستگاه همدان مدل مویرو و همکاران با داشتن R^2 بالاتر و کمترین مقدار خطای $RMSE$ و بالاترین مقدار ضریب NS بهترین عملکرد را در برآورد تابش خورشیدی داشته است و طبق این جدول می‌توان مدل‌های برتر در جهت برآورد ET_0 را مشخص کرد.

مقادیر R^2 با استفاده از ضرایب تعیین خط برازش داده شده به مقدار محاسبه شده و مقدار واسنجی شده حاصل شده‌اند. خط برازش داده شده بین مقادیر تبخیر-تغرق واسنجی شده و تبخیر-تغرق محاسبه شده با استفاده از الگوریتم SFLA، در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. مشخص است بیشترین نقاط در امتداد خط ۱:۱ هم‌تراز شده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که در ایستگاه اهواز در مدل چن و لی و آنگستروم-پریسکات مقادیر تبخیر-تغرق محاسبه شده و واسنجی شده تطابق بیشتری با هم داشته‌اند همچنین مشخص شد که مدل آنگستروم-پریسکات حدود ۱۰ درصد نسبت به مدل چن و لی و حدود ۱۱ درصد نسبت به مدل مویرو و همکاران و ۱۱ درصد نسبت به مدل هارگریوز-سامانی عملکرد بهتری داشته است. ولی در ایستگاه همدان مدل چن و لی و آنگستروم-پریسکات عملکرد شبیه به هم داشته‌اند ولی مدل مویرو و همکاران نسبت به این دو مدل عملکرد بهتری را در این ایستگاه نشان می‌دهد. دلیل بهتر بودن مدل مویرو و همکاران در ایستگاه همدان این است که رطوبت نسبی پارامتر مهم‌تری نسبت به ساعت آفتابی و دما می‌باشد. در شکل ۲ مدل هارگریوز-سامانی، مدل مناسبی در برآورد ET_0 در ایستگاه همدان و



شکل ۲- مقدار واسنجی شده و محاسبه شده ET_0 معادله FAO-56 PM با استفاده از ϵ مدل تابش

جدول ۸- شاخص‌های RMSE و R² در جهت ارزیابی دقت مدل برآورد R_s در ایستگاه اهواز و همدان

مدل				
چن و لی	مویبرو و همکاران	هارگریوز-سامانی	پریسکات	آنگستروم-پریسکات
۰/۹۱۷	۰/۷۸۶	۰/۷۸۳	۰/۹۱۸	R ²
۱/۹۵۱	۲/۷۶۰	۳/۰۸۳	۱/۹۲۹	RMSE اهواز
۰/۸۹۴	۰/۷۵۵	۰/۷۳۶	۰/۸۹۶	NS
۰/۸۶۲	۰/۸۷۵	۰/۷۱۶	۰/۸۶۳	R ²
۳/۰۷۰	۲/۹۵۹	۴/۵۵۴	۳/۰۶۶	RMSE همدان
۰/۸۴۵	۰/۸۴۸	۰/۶۸۹	۰/۸۴۶	NS

جدول ۹- ضرایب واسنجی شده برای مدل‌های برآورد تابش توسط الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند SFLA

مدل											
چن و لی			مویبرو و همکاران		هارگریوز-سامانی		پریسکات		آنگستروم-پریسکات		ایستگاه
f	g	h	i	j	d	e	c	a	b		
۰/۲۴	۰/۴۱	۲/۸ × ۱۰ ^{-۱۰}	۸/۱ × ۱۰ ^{-۱۰}	۲/۸ × ۱۰ ^{-۱۰}	۰/۵۷	۱/۹ × ۱۰ ^{-۱۰}	۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۴۲	اهواز	
۰/۲۶	۰/۵۴	۲/۰ × ۱۰ ^{-۱۰}	۲/۱ × ۱۰ ^{-۱۰}	۱/۷ × ۱۰ ^{-۱۰}	۰/۶۶	۶/۴ × ۱۰ ^{-۱۰}	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۵۴	همدان	

روش سبزی پرور و همکاران برای ایستگاه اهواز، ۰/۸۹۸ و برای ایستگاه همدان ۰/۸۱ برآورد کردند ولی در این مطالعه از روش بهینه‌سازی SFLA در جهت واسنجی ضرایب مدل آنگستروم-پریسکات استفاده گردید و مقدار ضریب تعیین برای ایستگاه اهواز و همدان به ترتیب ۰/۹۸۱ و ۰/۸۶۲ برآورد گردید. این نشان‌دهنده کارایی و دقت بالای الگوریتم SFLA در برآورد R_s می‌باشد؛ و با برآورد مقدار دقیق R_s، ET_O بهینه محاسبه می‌گردد.

همچنین در جداول ۹ و ۱۰ به ترتیب مقدار ضرایب واسنجی شده برای مدل‌ها توسط الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند SFLA و مقایسه مطالعات دیگران با مطالعه حاضر آورده شده است. در مقایسه با پژوهش‌های دیگر تفاوت‌هایی در نتایج به دست آمده است که در جدول ۱۰ نشان داده شده است. در مطالعات سبزی پرور و همکاران از روش رگرسیون خطی در جهت واسنجی ضرایب مدل آنگستروم-پریسکات استفاده گردید. مقدار ضریب تعیین در

جدول ۱۰- نتایج مطالعات دیگران و مطالعه حاضر و روش‌های واسنجی و بهینه‌سازی در مدل A-P در جهت برآورد تبخیر تعرق

منابع	دوره آماری	روش واسنجی	ایستگاه	a	b	R ²	RMSE
خلیلی و رضایی صدر (۱۳۷۶)	۱۹۸۰-۲۰۰۷	رگرسیون خطی	همدان	۰/۵۱	۰/۳۷	۰/۸۵۱	۲/۵۱۴
(Sabziparvar et al., 2013)	۱۹۸۰-۲۰۰۷	رگرسیون خطی	اهواز	۰/۱۵۷	۰/۵۲۴	۰/۸۹۸	۲/۲۵۲
(Jamei et al., 2013)	۲۰۰۹-۲۰۱۷	یادگیری ماشین	اهواز	۰/۲۸۲	۰/۴۷۴	۰/۸۱	۳/۲۲۷
مطالعه حاضر	۱۹۹۲-۲۰۲۰	بهینه‌سازی SFLA	اهواز	۰/۲۶	۰/۴۲	۰/۹۸۱	۱/۴۳۰
			همدان	۰/۲۷	۰/۵۴	۰/۸۶۲	۱/۸۱۳

صورت امکان باید از مدل هارگریوز-سامانی (به دلیل کمترین دقت) اجتناب نمود. همچنین در ایستگاه اهواز مدل‌هایی که مبتنی بر ساعت آفتابی و نسبت ساعات واقعی آفتابی به حداکثر ممکن ساعات آفتابی می‌باشند، دقت تخمینی بالایی در برآورد R_s دارند و در ایستگاه همدان رطوبت نسبی تأثیر بیشتری نسبت به سایر پارامترها در برآورد R_s و به دنبال آن محاسبه ET_O دارد. با توجه به کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی SFLA در جهت برآورد R_s و برآورد بهینه ET_O می‌توان کارایی این روش را در این گونه مسائل اثبات کرد. پیشنهاد می‌شود به جای استفاده از روش‌های قدیمی تر مانند روش رگرسیون گیری و روش‌های

نتیجه‌گیری

مقادیر R² محاسبه شده نشان داد که بالاترین و پایین‌ترین دقت برآورد مقادیر ET_O توسط الگوریتم SFLA در ایستگاه اهواز به ترتیب در مدل آنگستروم-پریسکات و مدل هارگریوز-سامانی و در ایستگاه همدان به ترتیب در مدل مویبرو و همکاران و مدل هارگریوز-سامانی بود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای ایستگاه اهواز، مدل آنگستروم-پریسکات و برای ایستگاه همدان، مدل مویبرو و همکاران برای برآورد مقدار ET_O در اولویت استفاده می‌باشد و در

reference evapotranspiration estimation in Canada Theoretical and Applied Climatology. 118:377- 385.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig Drain Report modeling and application. Journal of Hydrology. 285:19- 40.

Angstrom, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 50: 121-126.

Besharat, F., Dehghan, A.A. and Faghih, A.R. 2013. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 21:798- 821.

Chen, J. L., Li, G. SH. 2012. Estimation of monthly average daily solar radiation from measured meteorological data in Yangtze River Basin in China. International Journal of Climatology.

Cunha, A. C., Filho, L. R. A. G., Tanaka, A. A., Goes, B. C. and Putti, F. F. 2021. Influence of the estimated global solar radiation on the reference evapotranspiration obtained through the Penman-Monteith FAO 56 method. Agricultural Water Management. 243: 106491.

De Martonne, E. 1926. Aerisme, et indices d'aridite. Comptesrendus de L'Academie des Sciences, 182: 1395-1398.

Duffie, J.A. and Beckman, W. A. 1980. Solar Energy of Thermal Processes. John Wiley, New York.1-42.

Eusuff M. M. and Lansey K. E. 2003. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management. 129(3):210- 225.

Eusuff, M., Lansey, K. and Pasha, F. 2006. Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization. Engineering Optimization. 38:129- 154.

Hargreaves, G. and Samani, Z.A. 1982. Estimating Potential Evapotranspiration. Journal of the Irrigation and Drainage Division. 108:225- 230.

Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G. and Jones, J.W. 2003. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 129:336- 347.

Jamei, M., Ahmadianfar, I., Jamei, M., Karbaci, M., Heidari, A. A. and Chen, H. 2021. Forecasting Daily Global Solar Radiation in Hot Semi-Arid Climate Using a Novel Hybrid Machine Learning Paradigm. Research Square. 1-48.

Khanmohammadi, N., Rezaie, H., Montaseri, M. and Behmanesh, J. 2017. The effect of reference-condition-based temperature modification on the trend of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions. Agricultural Water Management. 194:204- 213.

Li, Y.L., Cui, J.Y., Zhang, T.H. and Zhao, H.L. 2003. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of

تجربی به دلیل زیاد بودن تعداد پارامترهای به کاررفته در معادلات و دقت پایین، از روش بهینه‌سازی SFLA به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری، نیاز نداشتن به مشتق‌گیری و توازن بین مبادله جستجوی سراسری و محلی استفاده کرد.

منابع

بابامیری، ا.، دین‌پژوه، ی. و اسدی، ا. ۱۳۹۲. واسنجی ضرایب هفت روش تخمین تبخیرتغرق گیاه مرجع مبتنی بر تابش خورشیدی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. نشریه دانش آب و خاک. ۲۳ (۴): ۱۴۳-۱۵۸.

بهمنش، ج.، مهدی زاده، س.، علیقلی نیا، ت. و رسولی مجد، ن. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در تخمین تبخیرتغرق مرجع. مجله علمی-پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰ (۱): ۱۱۹-۱۲۹.

خلیلی، ع. و رضایی صدر، ح. ۱۳۷۶. برآورد تابش کلی خورشید در گستره ایران بر مبنای داده‌های اقلیمی. تحقیقات جغرافیایی. ۴۶: ۱۵-۳۵.

سبزی پرور، ع.، تفضلی، ف.، زارع ابیانه، ح.، با نژاد، ح.، موسوی بایگی، م.، غفوری، م.، محسنی موحد، ا. و مریانجی، ز. ۱۳۸۷. مقایسه چند مدل برآورد تغرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه‌خشک به‌منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۲ (۲): ۳۲۸-۳۴۰.

سلطانی، س. و مرید، س. ۱۳۸۴. مقایسه برآورد تابش خورشید با استفاده از روش هارگریوز-سامانی و شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله دانش کشاورزی. ۱۵ (۱): ۶۹-۷۹.

علیزاده، ا. ۱۳۸۶. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا. ۲۱: ۸۰۸.

قمرنیا، ه. و یوسفوند، م. ۱۳۹۷. مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیرتغرق مرجع بر اساس روش‌های تابش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران. مجله مدیریت آب و آبیاری. ۸ (۲): ۲۳۷-۲۵۰.

موسوی بایگی، م.، اشرف، ب. و میان‌آبادی، آ. ۱۳۸۹. ارزیابی چهار مدل تبخیرتغرق گیاه مرجع در یک اقلیم نیمه‌خشک ایران با هدف انتخاب بهترین مدل تابش. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۷ (۴): ۸۷-۱۰۵.

مهدی زاده، س. و بهمنش، ج. ۱۳۹۵. واسنجی ضرایب معادله آنگستروم-پریسکات در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز دریاچه ارومیه. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۶ (۳): ۷۸-۹۱.

Aladenola, O.O. and Madramootoo, C.A. 2013. Evaluation of solar radiation estimation methods for

- relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*. 64:114- 118.
- Rahimi, I., Bakhtiari, B., Qaderi, K. and Aghababaie, M. 2012. Calibration of Angstrom equation for estimating Solar Radiation using Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm (Case study : Mashhad-East of Iran). *Energy Procedia*. 18:644- 651.
- Sabziparvar, A.A., Mousavi, R., Marofi, S., Ebrahimipak, N.A. and Heidari, M. 2013. An Improved Estimation of the Angstrom-Prescott Radiation Coefficients for the FAO56 Penman-Monteith Evapotranspiration Method. *Water Resources Management*. 27:2839- 2854.
- Tabari, H., Hosseinzadeh Talaei, P., Willems, P. and Martinez, Ch. 2016. Validation and calibration of solar radiation equations for estimating daily reference evapotranspiration at cool semi-arid and arid locations. *Hydrological Sciences Journal*. 61:610- 619.
- Xing, Z., Chow, L., Meng, F.R., Rees, H.W., Stevens, L. and Monteith, J. 2008. Validating evapotranspiration equations using Bowen Ratio in New Brunswick. *Maritime Canada. Sensors*. 8(1): 412- 428.
- Zhao, N., Zeng, X. and Han, S. 2013. Solar radiation estimation using sunshine hour and air pollution index in China. *Energy Conversion and Management*. 76:846- 851.
- north China. *Agricultural Water Management*. 61:1-12.
- Maroufpoor, S., Bozorg-Haddad, O. and Maroufpoor, E. 2020. Reference evapotranspiration estimating based on optimal input combination and hybrid artificial intelligent model: Hybridization of artificial neural network with grey wolf optimizer algorithm. *Journal of Hydrology*. 588:125060.
- Moradi, I. 2009. Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. *Energy*. 34:1- 6.
- Mubiru, J., Banda, E.J.K.B., D'Ujanga, F. and Senyonga, T. 2007. Assessing the performance of global solar radiation empirical formulations in Kumpala, Uganda. *Theoretical and Applied Climatology*. 87:179- 184.
- Ndulue, E., Onyekwelu, I., Nnaemeka Ogbu, K. and Ogwo, V. 2019. Performance evaluation of solar radiation equations for estimating reference evapotranspiration (ET₀) in a humid tropical environment. *Journal of Water and Land Development*. 42:124- 135.
- Pereira, A.R., Sentelhas, P.C., Folegatti, M.V., Villa Nova, N.A., Maggionto, S.R. and Pereira, F.A.C. 2002. Substantiation of the daily FAO-56 reference evapotranspiration with data from automatic and conventional weather stations. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 10:251- 257.
- Prescott, J.A. 1940. Evaporation from water surface in

Application of Shuffled Frog Leaping Algorithm for Calibration of Several Solar Radiation Models with the Aim of Improving the Accuracy of Estimating Reference Evapotranspiration in Two Climatic Samples of Iran

S. N. Banihashemi Dehkordi¹, B. Bakhtiari^{2*}, K. Qaderi², M. M. Ahmadi²

Received: Nov.13, 2021

Accepted: Dec.24, 2021

Abstract

The FAO Penman-Monteith (FAO-56 PM) model is proposed as a standard model to estimate reference evapotranspiration (ET_0) in various climates. Different models are used to estimate the total solar radiation (R_s) as one of the essential inputs of this model. This study aimed to calibrate and validate four R_s estimation models (Ångström-Prescott, Hargreaves-Samani, Mubiru et al., and Chen and Li) in Ahvaz (with arid climate) and Hamedan (with semi-arid climate) stations during the 1992-2020 climate period and the effect of these models on the ET_0 estimation. The coefficients of these models were calibrated by the intelligent shuffled frog leaping algorithm (SFLA). To evaluate the efficiency of these models, the estimated R_s values were compared with measured values. Based on the root mean square error (RMSE), the coefficient of determination (R^2) statistics and Nash-Sutcliffe, the A-P model with $RMSE=1.929$, $R^2=0.918$, $NS=0.896$ and Mobiro et al. model with $RMSE=2.925$, $R^2=0.875$, $NS=0.860$ showed better performance than the other models in Ahvaz and Hamedan stations, respectively. A decrease of about 20% was observed in the percentage of ET_0 difference between, the calculated and the estimated R_s compared to the measured R_s in 2 stations at all of the models.

Keywords: Calibration, FAO Penman-Monteith, SFLA, Total solar radiation, Validation

1- PhD Candidate in Water Structural Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(*Corresponding author Email: drbakhtiari@uk.ac.ir)