

کاربرد مدل‌های تجربی و جنگل تصادفی در تعیین تبخیر-تعرق مرجع نواحی مرطوب

ناصر شیری مشاهیر^{۱*}، محمدحسین کاظمی^۲، جلال شیری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۳۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات؛ پست الکترونیکی: nasershiri75@yahoo.com

چکیده

تخمین دقیق تبخیر-تعرق مرجع یکی از مسائل مهم در مهندسی کشاورزی، برنامه‌ریزی آبیاری، مدیریت منابع آب و غیره می‌باشد. امروزه مدل فیزیکی فائو-پنمن-مانتیت به‌عنوان یک مدل استاندارد برای تعیین تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) و نیز واسنجی سایر مدل‌ها بکار گرفته می‌شود. با این وجود، نیاز به طیف وسیعی از داده‌های هیدروکلیماتولوژی، کاربرد این مدل را بویژه در مناطق فاقد داده‌های هواشناسی کافی محدود می‌سازد. تحقیق حاضر به بررسی و تحلیل مدل‌های دما پایه و تابش پایه در تعیین ET_0 در مناطق مرطوب پرداخته و در ادامه، مدل جنگل تصادفی نیز با متغیرهای ورودی مشابه مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل جنگل تصادفی نسبت به مدل‌های تجربی واسنجی نشده و واسنجی شده با متغیرهای ورودی مشابه دقت بیشتری با میانگین قدر مطلق خطای برابر با $0/4$ میلی‌متر بر روز و شاخص پراکندگی $0/08$ ارائه داد. همچنین واسنجی مدل‌های تجربی در برخی موارد نه تنها در بهبود دقت مدل‌ها مؤثر واقع نشده بلکه سبب کاهش دقت مدل‌های تجربی نیز شد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق مرجع، جنگل تصادفی، مدل‌های تجربی

Application of Empirical and Random Forest Models for Estimating Reference Evapotranspiration of Humid Regions

N Shiri^{1*}, M.H Kazemi², J Shiri³

Received: November 26, 2018 Accepted: July 5, 2020

¹M.Sc student of Civil Environmental Engineering, Faculty of Civil Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

²M.Sc student of Irrigation and Drainage, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Assoc. Prof. Water Engineering Dept., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

Corresponding author; Email: nasershiri75@yahoo.com

Abstract

Accurate estimation of reference evapotranspiration (ET_o) is an important issue in agricultural engineering, irrigation scheduling, water resources management, etc. Nowadays, the physics-based Penman-FAO-Monteith model is a standard method for determining ET_o as well as calibrating other ET_o equations. However, the need for large amount of hydro climatologic data has restricted its application, especially in regions without sufficient necessary weather data. The present study aimed at assessing the performance accuracy of empirical temperature/radiation-based ET_o models in humid regions and comparing the results with random forest (RF)-based models relying on the same input variables. The obtained results showed that the RF models gave the most accurate results when compared to the commonly used original and calibrated empirical equations (with similar input variables) with global MAE and SI values of 0.4 mm day⁻¹ and 0.008. Nonetheless, the calibration procedure could not improve the performance accuracy of the equations in some cases.

Keywords: Empirical models, Random Forest, Reference evapotranspiration

آب در یک سطح گیاهی کنترل شده فراهم می‌آورد (آلن و همکاران ۱۹۹۸). به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌های مربوط به روش‌های یاد شده، می‌توان از مدل‌های ریاضی استفاده نمود که از متغیرهای هواشناسی اندازه‌گیری شده، به‌عنوان متغیرهای مستقل استفاده می‌کنند. مدل‌های ریاضی یاد شده مشتمل بر مدل‌های تجربی و فیزیکی می‌باشند که مدل‌های تجربی بر مبنای توابع آماری تقریب بین مقادیر تبخیر-تعرق و متغیرهای هواشناسی استوار هستند (هارگریوز و سامانی ۱۹۸۵). مدل‌های فیزیکی نیز اصول فیزیکی موجود و مربوط به سه عامل مهم تأثیرگذار در تبخیر-تعرق را به‌کار می‌گیرند که این عوامل عبارتند از: ۱- مقدار انرژی لازم برای

مقدمه

تبخیر-تعرق به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن آب از سطح خاک و گیاه به اتمسفر منتقل می‌شود که این امر از تأثیر توأم تبخیر از سطح خاک و تعرق از روزه‌های گیاه صورت می‌پذیرد. تعیین مقدار تبخیر-تعرق گیاه یک مؤلفه مهم در تعیین بیلان آب و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد. از طریق مستقیم و با استفاده از روش‌های پرهزینه هواشناسی که بر پایه بیلان انرژی و نیز انتقال جریان جرم بخار می‌باشند (روش آیرودینامیک و نسبت باون) می‌توان نیاز آبی گیاه را محاسبه نمود. بکارگیری لایسیترا امکان تعیین تبخیر-تعرق را بر اساس اندازه‌گیری برخی از مؤلفه‌های بیلان

ادامه، با معرفی فاکتور مقاومت شبیه‌ساز مقاومت آیرودینامیکی، امکان استفاده از این معادله برای تعیین تبخیر-تعرق از سطح گیاه فراهم شد (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

وجود داده‌های لایسی‌متری در یک منطقه، مدل فائو-پنمن-مونتیت (آلن و همکاران ۱۹۹۸) به‌عنوان مدل استاندارد برای محاسبه میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع و نیز واسنجی سایر مدل‌های تجربی به‌کار گرفته می‌شود (ایرماک و همکاران ۲۰۰۳، شیری و همکاران ۲۰۱۴ a, b). مدل یاد شده دارای دو مزیت عمده می‌باشد (لندراس و همکاران ۲۰۰۸): ۱) از آنجا که این معادله اساس فیزیکی دارد لذا می‌توان از آن در شرایط مختلف اقلیمی و اکولوژیکی (و بدون نیاز به واسنجی منطقه‌ای) استفاده نمود. ۲) دقت و اعتبار نتایج حاصل از این معادله در شرایط مختلف اقلیمی با استفاده از آزمایش‌های لایسی-متری به اثبات رسیده است. از سوی دیگر از جمله مهم-ترین معایب این مدل، نیاز به داده‌های اقلیمی وسیع (شامل دمای هوا، رطوبت، سرعت باد و تابش خورشیدی) می‌باشد (شیری و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، استفاده از مدل‌هایی که نیاز به داده‌های اقلیمی کمتری دارد می‌تواند یک راهکار برای حل چنین مشکلی باشد. البته بایستی به این نکته نیز توجه نمود که هرچند برخی مدل‌ها به داده‌های اقلیمی کمتری نیاز دارند، ولی حذف برخی پارامترهای اساسی هواشناسی در چنین مدل‌هایی، سبب نادیده گرفته شدن سهم آن پارامترها در تبخیر-تعرق گشته و لذا از دقت نهایی مدل خواهد کاست. هدف از تحقیق حاضر بررسی توانایی مدل جنگل

گرمای نهان تبخیر، ۲- جریان بخار آب در خارج از سطح تبخیر و ۳- تأمین بخار آب در سطح تبخیر. پنمن (۱۹۴۸) روش‌های توازن انرژی و انتقال جرم را ترکیب نموده و به معادله‌ای برای تخمین تبخیر از سطح آزاد آب دست یافت. در ادامه، مفهوم تبخیر-تعرق مرجع توسط محققان بسط و توسعه داده شد. طبق تعریف، شدت تبخیر-تعرق از یک سطح مرجع، که با هیچ‌گونه تنش آبی مواجه نباشد، به‌عنوان تبخیر-تعرق گیاه مرجع یا تبخیر-تعرق مرجع نامیده شده و با علامت اختصاری ET_0 نشان داده می‌شود (آلن و همکاران ۱۹۹۸). سطح مرجع یاد شده یک سطح گیاه فرضی (با ارتفاع ۰/۱۲ متر، ضریب آلبدو ۰/۲۳ و مقاومت ثابت سطح سایه انداز معادل ۷۰ ثانیه بر متر) می‌باشد (دروگرز و آلن ۲۰۰۲). در این مفهوم، فرض بر آن است که مقاومت یاد شده تابعی از زیست-محیط غالب بر گیاه نبوده و در شرایط اقلیمی متفاوت، مقدار ثابتی دارد. تنها مؤلفه‌های مؤثر بر تبخیر-تعرق مرجع، پارامترهای هواشناسی می‌باشد و لذا می‌توان اظهار داشت که تبخیر-تعرق مرجع برآیندی از پارامترهای اقلیمی بوده و با معلوم بودن آمار و اطلاعات هواشناسی، می‌توان مقدار آن را محاسبه نمود. تبخیر-تعرق مرجع چمن (ET_0) به‌طور گسترده‌ای در تخمین تبخیر-تعرق گیاهان با استفاده از ضرایب گیاهی مناسب (Kc) مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجود اطلاعات دقیق درباره ET_0 در موارد متعددی نظیر طراحی سامانه‌های آبیاری و مدیریت منابع آب بسیار ضروری به‌شمار می‌رود. در دهه‌های اخیر، مدل‌های مختلفی برای تخمین ET_0 ارائه شده است که صرف‌نظر از گستردگی آن‌ها، انتخاب یک مدل مناسب برای تخمین دقیق این مؤلفه در یک منطقه امری بسیار دشوار محسوب می‌شود (کریمی و همکاران ۲۰۱۳). امروزه در صورت عدم

جدول ۱- مشخصات کلی ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ایستگاه	عرض جغرافیایی (°N)	طول جغرافیایی (°E)	ارتفاع از سطح دریا (m)
گرگان	۳۶/۵۱	۵۴/۱۶	۱۳/۳
رشت	۳۷/۱۲	۴۹/۳۹	۸/۶
ساری	۳۶/۳۳	۵۳	۲۳

واقعی (کیلو پاسکال) می‌باشد. مقدار چگالی شار حرارتی خاک برای دوره‌های روزانه برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود (بر اساس طبیعت سامانه اقلیمی).

مدل هارگریوز-سامانی

مدل تجربی هارگریوز-سامانی از جمله ساده‌ترین مدل‌های تعیین میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های مربوط به دمای هوا و تابش فرازمینی (به‌عنوان نمایه‌ای از کل تابش خورشیدی دریافت شده توسط زمین) می‌باشد. مدل هارگریوز-سامانی به فرم رابطه زیر قابل بیان است (هارگریوز و سامانی ۱۹۸۵):

$$ET_0 = 0.0023 \frac{R_a}{\lambda} \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right) \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \quad [2]$$

در رابطه اخیر، R_a تابش فرا زمینی (مگاژول بر متر مربع در روز) بوده و سایر مؤلفه‌ها قبلاً معرفی شده‌اند. بر اساس پیشنهاد آلن و همکاران (۱۹۹۸) در شرایطی که آمار هواشناسی موجود در ایستگاه‌ها محدود به مقادیر اندازه‌گیری شده دمای هوا باشد، استفاده از این مدل برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع مفید خواهد بود. دقت این مدل در نواحی مختلف بستگی به شرایط اقلیمی آن منطقه دارد و در حالت کلی، نتایج حاصل از این مدل در مناطق مرطوب، به‌صورت بیش برآورد و در نواحی خشک به‌صورت کم برآورد می‌باشد (شیری ۲۰۱۴).

تصادفی و برخی مدل‌های تجربی متداول در تعیین تبخیر-تعرق مرجع در مناطق شمالی مرطوب ایران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه

در این تحقیق داده‌های مربوط به سه ایستگاه هواشناسی در شمال ایران (شامل ایستگاه‌های گرگان، ساری و رشت) از سازمان هواشناسی کشور دریافت و به‌کار گرفته شد. داده‌های هواشناسی موجود شامل پارامترهای دمای بیشینه هوا، دمای کمینه هوا، تابش فرازمینی، تابش کل خورشیدی و سرعت باد در مقیاس روزانه می‌باشد. طول دوره آماری داده‌های موجود شامل ده سال [از اول ژانویه ۲۰۰۸ میلادی تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۷ میلادی] می‌باشد. جدول ۱ مشخصات کلی ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیت (FAO56-PM)

فرم اصلاح شده مدل پنمن-مونتیت که توسط فائو ارائه گردیده است به‌صورت زیر می‌باشد (آلن و همکاران ۱۹۹۸):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad [1]$$

در رابطه اخیر، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، Δ شیب تابع فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال بر (درجه سلسیوس))، U_2 متوسط سرعت باد در یک شبانه روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال) و e_a نیز فشار بخار

مدل پریستلی- تیلور

این مدل بر این فرض استوار است که تأثیر تلاطم هوا در پدیده تبخیر - تعرق کمتر از تأثیر تابش بوده و می‌توان از این مدل در مناطقی با وسعت‌های زیاد و یا کم و پوشش گیاهی مناسب و نیز با پوشش‌های ناهمگن (با وسعت حدود چند کیلومتر مربع) بهره برد (پریستلی و تیلور ۱۹۷۲). بنابراین با حذف مؤلفه آیرودینامیکی مدل پنمن، مؤلفه بیلان انرژی در یک ضریب ثابت (α) ضرب می‌شود که حاصل امر، معادله ریاضی زیر خواهد بود:

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta R_n}{(\Delta + \gamma)\lambda} \quad [3]$$

در شرایطی که ضریب ثابت α برابر با یک در نظر گرفته شود مقدار تبخیر - تعرق محاسبه شده توسط مدل برابر با تبخیر - تعرق حالت تعادل (شرایطی که مقدار فشار بخار واقعی بسیار نزدیک به مقدار فشار بخار اشباع باشد) خواهد بود که البته در شرایط واقعی حصول چنین امری نادر است و لذا همواره تفاضل فشار بخار هرچند به مقدار اندک وجود خواهد داشت (شیری ۲۰۱۴). مقدار ضریب ثابت یاد شده در مطالعات در حالت اولیه عموماً برابر با ۱/۲۶ در نظر گرفته می‌شود.

مدل تورک

مدل تورک (تورک ۱۹۶۱) یکی از مدل‌های دقیق در تخمین تبخیر- تعرق مرجع در مناطق مرطوب به‌شمار می‌رود و به‌صورت رابطه ریاضی زیر قابل بیان است:

$$ET_0 = a_T 0.013 \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \frac{23.8856 R_s + 50}{\lambda}$$

[۴]

$$RH \geq 50 \rightarrow a_T = 1$$

$$RH < 50 \rightarrow a_T = 1 + \frac{50 - RH}{70}$$

در رابطه اخیر RH نشانگر رطوبت نسبی بوده و سایر مؤلفه‌ها قبلاً معرفی شده‌اند.

روش جنگل تصادفی

در الگوریتم جنگل تصادفی (RF) برای تشکیل هر درخت، دسته متفاوتی از الگوهای موجود با در نظر گرفتن جایگزینی دوباره‌ی هر الگوی منتخب، انتخاب می‌شوند. اندازه این دسته انتخاب‌شده، برابر تعداد کل الگوهای موجود خواهد بود. الگوریتم جنگل تصادفی توسط برایمن (۲۰۰۱) به‌عنوان یک روشی از توسعه جدید درخت‌های تصمیم‌گیری، ارائه شد که پیش‌بینی چندین الگوریتم منفرد را باهم و با استفاده از قوانین مبتنی ترکیب می‌کند. اصول کلی فن‌های آموزش گروهی بر پایه این فرض است که دقت آن‌ها از دیگر الگوریتم‌های آموزشی بالاتر است. درخت رگرسیونی (RT) مجموعه‌ای از شرایط یا محدودیت‌ها را بیان می‌کند که به‌صورت سلسله مراتبی سازمان‌یافته‌اند و به حالت متوالی از گره ریشه به سمت پایین رشد می‌کنند و به گره‌های پایانی یا گره‌های برگ می‌رسند (کریمی ۲۰۱۹؛ برایمن و همکاران ۱۹۸۴).

روش تحقیق

داده‌های موجود در این مطالعه به سه قسمت شامل داده‌های آموزش (۵ سال اول)، آزمون (۲/۵ سال میانی) و اعتبارسنجی نهایی (۲/۵ سال انتهایی دوره) تقسیم شدند. مدل‌های تجربی یاد شده ابتدا به‌صورت واسنجی نشده مورد ارزیابی قرار گرفته و در ادامه توسط رابطه خطی زیر مورد واسنجی قرار گرفتند (شیری و همکاران ۲۰۱۵):

$$ET_0^{target} = aET_0^{model} + b$$

مدل‌های جنگل تصادفی نیز با استفاده از سه ترکیب ورودی به شرح زیر و در مشابَهت با پارامترهای ورودی مدل‌های تجربی به‌کار بسته شده در این تحقیق، بسط و مورد ارزیابی قرار گرفتند:

جدول ۲- ترکیب‌های ورودی بکار بسته شده در این تحقیق.

مدل	پارامترهای ورودی
RF1	T_{\max}, T_{\min}, R_a
RF2	T_{\max}, T_{\min}, R_s
RF3	T_{\max}, T_{\min}, U_2

تحلیل آماری

در تحقیق حاضر از شاخص‌های آماری نمایه پراکندگی (SI)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای تحلیل عملکرد مدل‌های بکار بسته شده استفاده به عمل آمد:

۱. میانگین مطلق خطاها:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_i^M - ET_i^{PM}|}{n} \quad [5]$$

۲. نمایه پراکندگی:

$$SI = \frac{RMSE}{ET_{0mean}} \quad [6]$$

۳. ضریب نش-ساتکلیف

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{io}^{model} - ET_{io}^{target})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{io}^{target} - ET_o^{target})^2} \quad [7]$$

در روابط اخیر، ET_i^M و ET_i^{PM} به ترتیب مقادیر تبخیر-تعرق مرجع (در گام زمانی i ام) مربوط به مدل فائو-پنمن-مونتیث و سایر مدل‌های بکار گرفته شده بوده و n نیز تعداد گام‌های زمانی است.

نتایج و بحث

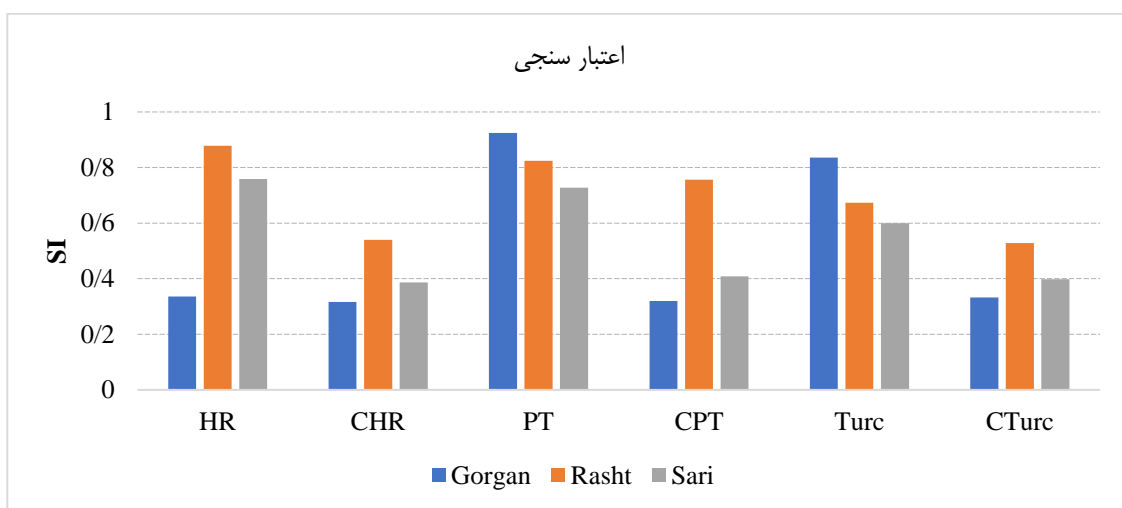
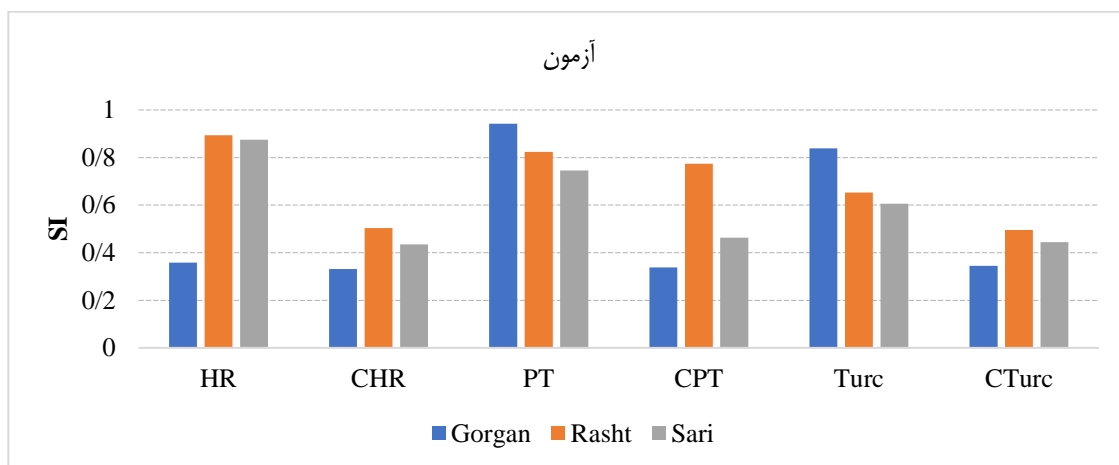
شکل ۱ مقادیر SI مربوط به مدل‌های تجربی و نسخه‌های واسنجی شده آن‌ها را در دوره‌های آزمون و اعتبارسنجی نشان می‌دهند. با توجه به شکل مشخص می‌شود که در دوره آزمون (بین سال ۲۰۱۳ تا اواسط سال ۲۰۱۵) مدل تورک واسنجی نشده کمترین مقدار SI را نشان داده و مدل‌های هارگریوز و پرستیلی تیلور نیز از این نظر در رده‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند. لیکن در دوره اعتبارسنجی (اواسط سال ۲۰۱۵ تا آخر سال ۲۰۱۷)، بیشترین دقت در بین مدل‌های واسنجی نشده به ترتیب مربوط به مدل هارگریوز، تورک و پرستیلی تیلور می‌باشد. در مورد مدل‌های واسنجی شده، مدل هارگریوز در هر دو دوره آزمون و اعتبارسنجی بیشترین دقت را به خود اختصاص داده و مدل‌های تورک و پرستیلی تیلور واسنجی نشده نیز در دوره‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند. بررسی مقادیر کلی r -MAE (متوسط سه ایستگاه مورد مطالعه) نیز نشان داد که بیشترین بهبود در دقت مدل‌های تجربی مربوط به مدل هارگریوز و کمترین بهبود دقت نیز مربوط به مدل پرستیلی تیلور می‌باشد. تحلیل مقادیر شاخص یاد شده در هر ایستگاه (شکل ۱) نیز مؤید این امر است به نحوی که مقدار r -MAE در ایستگاه رشت، منفی بوده و این امر حاکی از تأثیر معکوس واسنجی بر دقت مدل و افزایش خطای مدل شده

تصادفی دارای متغیرهای ورودی مشابه به مدل‌های تجربی بکار گرفته شده در تحقیق حاضر هستند (آن گونه که در بخش مواد و روش‌ها بیان شد)، می‌توان مقایسه منطقی و معقولی بین عملکرد این دو دسته از مدل‌ها به عمل آورد و لذا با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری مندرج در جدول مذکور، مدل‌های جنگل تصادفی در تمام حالت‌ها از دقت بالاتری نسبت به مدل‌های تجربی برخوردارند.

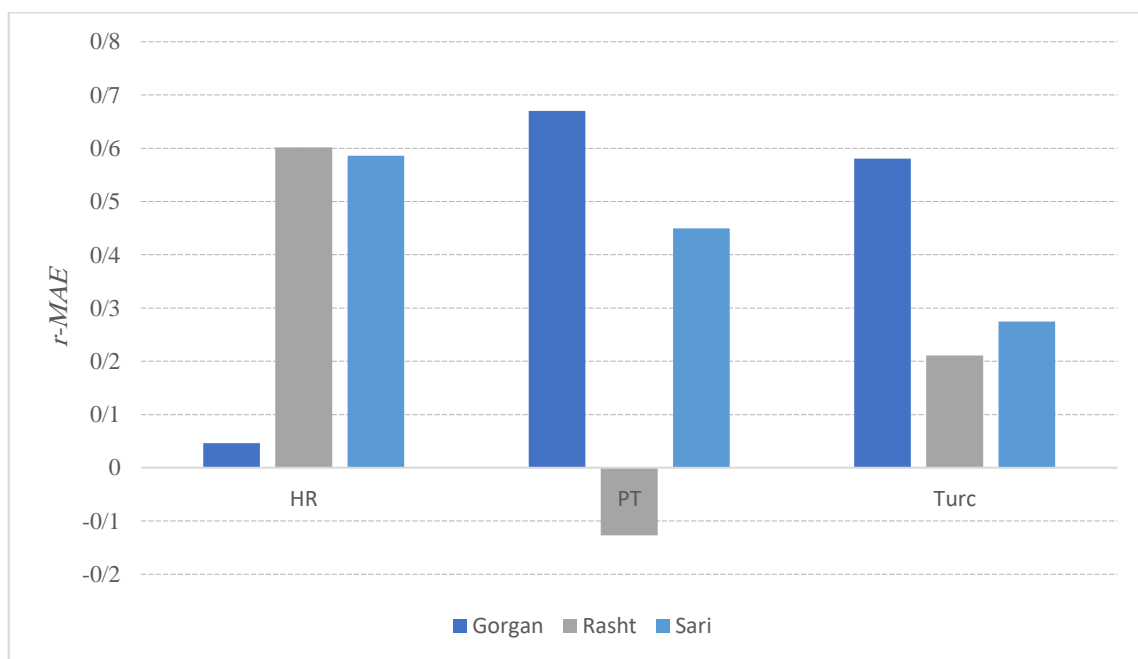
دوم اینکه، در بین مدل‌های جنگل تصادفی، مدل مبتنی بر ترکیب ورودی سوم (RF3) که متشکل از متغیرهای هوا و تابش خورشیدی می‌باشد؛ مقدار خطای کمتری نسبت به دو ترکیب ورودی دیگر (RF1, RF2) از خود نشان می‌دهد. با این وجود، تفاوت بین دقت عملکرد در بین سه مدل جنگل تصادفی در ایستگاه‌ها تقریباً اندک بوده و لذا می‌توان اظهار داشت که مدل جنگل تصادفی عموماً قادر به شبیه‌سازی مقادیر ET_0 با دقت بالایی می‌باشد. اهمیت این امر زمانی بیشتر مشخص می‌شود که توجه شود مدل RF1 مبتنی بر دمای هوا، تنها از دو متغیرهای دمای هوای کمینه و بیشینه برای تخمین ET_0 استفاده به عمل می‌آورد که این مساله می‌تواند گام مهمی در تعیین مقادیر ET_0 در ایستگاه‌های فاقد آماری یا دارای نقصان آمار پارامترهای ضروری هواشناسی باشد. سوم اینکه مدل پریستلی تیلور و نسخه واسنجی شده آن در تمام ایستگاه‌های دارای دقت کمتر نسبت به مدل‌های هارگریوز و تورک می‌باشد. این امر در وهله اول ممکن است در تناقض با برخی مطالعات قبل (نظیر شیری و همکاران ۲۰۱۵) باشد؛

است. چنین حالتی در مطالعات قبل (شیری و همکاران، ۲۰۱۵) نیز مورد بررسی و تایید قرار گرفته و لذا نمی‌توان واسنجی مدل تجربی را به‌عنوان یک فرایند کاملاً قابل قبول برای افزایش دقت مدل‌ها عنوان نمود. با این وجود، مقدار r -MAE (شکل ۲) مدل پریستیلی تیلور در ایستگاه گرگان بیشتر از مقادیر این شاخص در دو ایستگاه رشت و ساری و نیز بیشتر از مقادیر شاخص برای دو مدل تورک و هارگریوز می‌باشد. در مورد مدل هارگریوز نیز کمترین تأثیر واسنجی، در ایستگاه گرگان و بیشترین آن در رشت بوده است. برخلاف این حالت، در مورد مدل تورک، کمترین تأثیر واسنجی در ایستگاه رشت و بیشترین تأثیر در گرگان به چشم می‌خورد. البته باید توجه داشت که تحلیل انجام شده مبتنی بر شاخص r -MAE، تنها نشانگر میزان تأثیر واسنجی بر مدل (افزایش یا کاهش دقت مدل) می‌باشد و نمی‌توان از آن به‌عنوان معیاری برای قضاوت کمی بین مدل‌ها و تعیین بهترین مدل یا بهترین ایستگاه استفاده نمود؛ بلکه باید از شاخص‌های آماری دیگر (نظیر آنچه در بخش قبلی معرفی شدند) برای این منظور استفاده نمود.

جدول ۲ مقادیر شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های تجربی و جنگل تصادفی را به تفکیک ایستگاه‌ها در دوره اعتبارسنجی ارائه می‌دهد. با بررسی مقادیر شاخص‌های آماری مندرج در جدول ۲ چندین نکته به شرح زیر قابل طرح است. اول اینکه در هر سه ایستگاه، مدل‌های جنگل تصادفی دقت بیشتری (با مقدار خطای کمتر و شاخص نش-ساتکلیف بیشتر) نسبت به مدل‌های تجربی (نظیر نسخه‌های واسنجی شده و واسنجی نشده) نشان می‌دهند. به بیان دیگر، با توجه به اینکه مدل‌های جنگل



شکل ۱- مقادیر شاخص SI در دوره آزمون و اعتبارسنجی نهایی.



شکل ۲- مقادیر r-MAE مدل‌های واسنجی شده.

جدول ۲- شاخص‌های کلی مدل‌های مورد استفاده در اعتبارسنجی.

مدل	گرگان			رشت			ساری		
	SI	MAE (mm d ⁻¹)	NS	SI	MAE (mm d ⁻¹)	NS	SI	MAE (mm d ⁻¹)	NS
HR	0.3356	0.9199	0.7829	0.8778	1.2686	-0.0634	0.7590	1.2945	-0.1539
PT	0.9248	2.6459	-0.5043	0.8243	0.9388	0.0893	0.7272	1.0550	0.1499
Turc	0.8353	2.2267	-0.1954	0.6736	0.6743	0.4240	0.5995	0.7722	0.4331
CHR	0.3159	0.8775	0.8599	0.5392	0.5053	0.9242	0.3861	0.5357	0.9446
CPT	0.3193	0.8727	0.8568	0.7566	1.0583	0.8508	0.4082	0.5809	0.9381
CTurc	0.3325	0.9341	0.8448	0.5279	0.5320	0.9273	0.3981	0.5603	0.9411
RF1	0.0084	0.6708	0.8891	0.0137	0.4314	0.7682	0.0135	0.4879	0.7435
RF2	0.0082	0.6519	0.8939	0.0140	0.4277	0.7599	0.0129	0.4653	0.7656
RF3	0.0064	0.5074	0.9347	0.0112	0.3694	0.8465	0.0103	0.3314	0.8514

جدول ۳- رده‌بندی نهایی مدل‌ها.

Model	MAE			SI			R ²		
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
1 HR	1.2945	0.9199	1.1610	0.8778	0.3356	0.6575	0.9131	0.7474	0.8288
2 PT	2.6459	0.9388	1.5466	0.9248	0.7272	0.8254	0.9094	0.6919	0.7955
3 Turc	2.2267	0.6743	1.2244	0.8353	0.5995	0.7028	0.8963	0.7512	0.8240
4 CHR	0.8775	0.5053	0.6395	0.5392	0.3159	0.4137	0.9172	0.7740	0.8117
5 CPT	1.0583	0.5809	0.8373	0.7566	0.3193	0.4947	0.9155	0.7161	0.7866
6 CTurc	0.9341	0.5320	0.6755	0.5279	0.3325	0.4195	0.9052	0.7281	0.8064
7 RF1	0.6708	0.4314	0.5300	0.0137	0.0084	0.0119	0.8918	0.7505	0.8083
8 RF2	0.6519	0.4277	0.5300	0.0140	0.0082	0.0111	0.8958	0.7707	0.8333
9 RF3	0.5074	0.3314	0.4027	0.0064	0.0112	0.0088	0.9385	0.8582	0.9032

نقاط به همراه مدل هارگریوز مبتنی بر دمای هوا باشد.

جدول ۳ رده‌بندی کلی مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق را بر اساس آمارهای دوره اعتبارسنجی و با

لیکن توجه به اقلیم منطقه که عموماً مرطوب و دارای بارش‌های فراوان می‌باشد مشخص می‌نماید که مدل تورک (که برای اقلیم‌های مرطوب توسعه داده شده است) می‌تواند گزینه مناسبی در تعیین ET₀ در این

داده‌های اقلیمی سه ایستگاه مرطوب کشور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که می‌توان از این روش محاسباتی در تخمین میزان تبخیر-تعرق استفاده نمود. مدل RF3 که در آن از پارامترهای اقلیمی دمای هوا و سرعت باد به عنوان ورودی‌های مدل استفاده می‌شود، در هر دو ایستگاه از بالاترین دقت در تخمین میزان تبخیر - تعرق محاسبه شده توسط معادله FAO56-PM (معادله مرجع) برخوردار است که این امر نشان از غلبه تأثیر سرعت باد بر مؤلفه توازن انرژی در این ایستگاه‌ها دارد.

توجه به مقادیر شاخص‌های آماری نشان می‌دهد. بر این اساس مدل RF3 که مشتمل بر متغیرهای دمای هوا و تابش خورشیدی می‌باشد دارای بیشترین دقت بوده و پس از آن مدل‌های RF2 و RF1 در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. در ادامه نیز مدل‌های واسنجی شده (شامل هارگریوز، تورک، پریستیلی تیلور واسنجی شده) و مدل‌های واسنجی نشده قرار می‌گیرند.

نتیجه گیری کلی

در تحقیق حاضر توانایی روش جنگل تصادفی در تخمین میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از

منابع مورد استفاده

- Allen, RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guide lines for computing crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56, Rome, Italy.
- Breiman L, 2001. Random Forests. Machine Learning, 45(1): 5-32.
- Breiman L, Friedman JH, Olshen RA and Stone CJ, 1984. Classification and Regression Trees. Chapman & Hall/CRC, New York.
- Droogers P and Allen RG, 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and Drainage Systems 16(1): 33-45.
- Hargreaves GH and Samani, ZA, 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering Agriculture 1(2): 96-99.
- Irmak S, Allen RG and Whitty EB, 2003. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 129(5): 360-370.
- Karimi S, 2019. Estimation of leaf area index using climatic data. Ph.D thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
- Karimi S, Shiri J and Nazemi AH, 2013. Estimating daily reference crop evapotranspiration using artificial intelligences-based ANFIS and ANN techniques and empirical models. Soil and Water Science (University of Tabriz) 23(2): 139-158.
- Landeras G, Ortiz-Barredo A and Lopez JJ, 2008. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). Agricultural Water Management 95: 553-565.
- Penman HC, 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceeding of the Royal Society, London Series A, 193: 120-145.
- Priestley CHB and Taylor RJ, 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Reviews 100(2): 81-92.

- Shiri J, 2014. Estimating reference evapotranspiration with climatic data: Comparison of empirical and artificial intelligence methods. Ph.D thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
- Shiri J, Nazemi AH, Sadraddini AA, Landaras G, Kisi O, Fakheri Fard A and Marti P, 2014a. Comparison of heuristic and empirical approaches for estimating reference evapotranspiration from limited inputs in Iran. *Computers and Electronics in Agriculture* 108: 230-241.
- Shiri J, Sadraddini AA, Nazemi AH, Kisi O, Landaras G, Fakheri Fard A and Marti P, 2014b. Generalizability of gene expression programming-based approaches for estimating daily reference evapotranspiration in coastal stations of Iran. *Journal of Hydrology* 508: 1-11.
- Shiri J, Dinpashoh Y, Sadraddini AA and Nazemi AH, 2016. Estimating daily alfalfa to grass reference evapotranspiration ratios and determining the aerodynamic and energy balance components contribution in evapotranspiration (Case study: East Azerbaijan Province). *Soil and Water Science (University of Tabriz)* 26(1/4): 25-37.
- Turc L, 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation evapotranspiration potentielle. *Annals of Agronomy* 12(1): 13-49.