

## مقایسه روش‌های تجربی محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل در اقلیم نیمه مرطوب معتدل سرد

(مطالعه موردی: شهرهای بروجن، شهرکرد، کوهرنگ و لردگان)

کبری خیری شلمزاری\*<sup>۱</sup> و امیر سلطانی محمدی<sup>۲</sup>

(۱) گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

(۲) گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\* نویسنده مسئول: k.kheiry@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۱۰

### چکیده

روش پیشنهاد شده برای محاسبه تبخیر تعرق پتانسیل روش فائو پنمن - مانیتیت است اما روش‌های دیگری نیز وجود دارند که نیاز به داده‌های هواشناسی کمتر اما برآورد نزدیک به روش فائو پنمن مانیتیت در شرایط اقلیمی مختلف را دارند. بررسی عملکرد این روش‌ها لازمه انتخاب آن‌ها به عنوان روش جایگزین با توجه به داده‌های موجود می‌باشد. در این تحقیق مقادیر روزانه تبخیر تعرق پتانسیل در دوره زمانی ۲۱ ساله (۲۰۱۵-۱۹۹۴ میلادی) با استفاده از روش‌های تجربی کوپایس، تورگ، هارگریوز، هارگریوز سامانی، ریتچی، ایرمک و سه شکل معادله والیانز برای چهار ایستگاه بروجن، شهرکرد، کوهرنگ و لردگان محاسبه و با مقادیر محاسبه شده با روش فائو پنمن مانیتیت مقایسه شد. برای مقایسه نتایج از ریشه میانگین مربعات خطا، خطای قدر مطلق و ضریب تبیین استفاده شد. نتایج نشان داد که معادله‌های ایرمک و والیانز (RS, T, RH, U) بهتر از دیگر معادله‌های تجربی در هر چهار ایستگاه تبخیر- تعرق پتانسیل را برآورد کرد و معادله هارگریوز با ۹۵/۲۵ درصد خطای نسبی نسبت به معادله فائو پنمن - مانیتیت تخمین بسیار ضعیفی از تبخیر- تعرق پتانسیل را نشان داد. همچنین مقایسه مجموع تخمین‌های ET<sub>0</sub> حاصله از معادلات تجربی مشخص کرد که روش‌های ایرمک و والیانز (RS, T, RH, U) به ترتیب برای همه ایستگاه‌ها کارآمدترین روش بودند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر- تعرق پتانسیل، روش‌های تجربی، اقلیم نیمه مرطوب و والیانز.

## مقدمه

تبخیر- تعرق یک پارامتر حیاتی برای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری است، به‌علاوه این پارامتر برای مطالعات هیدرولوژی و کیلیماتولوژی هم مهم است. در طول نیم قرن گذشته، معادلات پایه‌ای تجربی یا فیزیکی برای تخمین تبخیر- تعرق پتانسیل در رژیم‌های اقلیمی متفاوت گسترش یافته است (Kisi, 2013) روش معمول برای تخمین تبخیر- تعرق در هر زمان و برای هر نوع گیاه این است که ابتدا تبخیر- تعرق مرجع را برآورد نموده و سپس با استفاده از یک ضریب گیاهی تجربی مقدار تبخیر- تعرق محاسبه گردد. تبخیر- تعرق یک پدیده پیچیده است، چرا که تابعی از چندین عوامل اقلیمی نظیر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی است. روش مستقیم اندازه‌گیری تبخیر- تعرق، استفاده از لایسی متر است، با این حال اندازه‌گیری تبخیر تعرق با لایسی متر به دلیل این که روش پرهزینه‌ای است و نیاز به دقت و تجربه زیادی دارد همواره ممکن نیست. از این‌رو از روش‌های غیر مستقیم تخمین تبخیر- تعرق استفاده می‌شود. این روش‌ها از مدل‌های ساده تجربی تا روش‌های پیچیده ترکیبی مانند معادله پنمن- مانتیث که بر قوانین فیزیکی استوار هستند تغییر می‌کنند. مطالعاتی که تاکنون انجام شده است نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی گوناگون، دقت روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق یکسان نیست (تفضلی، ۱۳۸۵). اغلب این روش‌ها تحت واسنجی محلی به دست آمده‌اند و اعتبار جهانی محدودی دارند (Allen and Pruitt, 1991). در دهه‌های اخیر، قابلیت اجرایی چندین مدل برای محاسبه تبخیر- تعرق مورد بررسی قرار گرفته است. در همین راستا سلطانی و همکاران (۱۳۹۱) دقت معادله فائو پنمن مانتیث برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف، در شرایطی که داده‌های هواشناسی محدود باشند را در دو حالت داده کامل و کاهش داده در مقایسه با معادلات تورک، هارگریوز سامانی و شبکه عصبی مصنوعی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از عملکرد بهتر معادله فائو پنمن مانتیث در حالت کاهش داده نسبت به دیگر معادلات بود. زارع ابیانه و همکاران (۱۳۸۹) به ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که روش‌های با پایه پنمن در اکثر مناطق ایران مناسب‌ترین روش برای برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل به شمار می‌آیند. موسوی بایگی و همکاران (۱۳۸۹) با هدف انتخاب بهترین مدل تابش، چهار مدل تبخیر- تعرق گیاه مرجع را در یک اقلیم نیمه خشک در ایران مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل فائو پنمن مانتیث با مدل تابش آنگستروم مناسب‌ترین مدل جهت محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع بود. روش استاندارد و پیشنهاد شده برای محاسبه تبخیر تعرق پتانسیل در مناطق خشک و نیمه خشک روش فائو پنمن- مانتیث است اما روش‌های دیگری نیز برای محاسبه تبخیر تعرق پتانسیل وجود دارند که نیاز به داده‌های هواشناسی کمتر اما برآورد نزدیک به روش پنمن مانتیث در شرایط اقلیمی مختلف را دارند و بررسی عملکرد این روش‌ها لازمه انتخاب آنها به عنوان روش جایگزین با توجه به داده‌های موجود می‌باشد. در همین راستا

(Valiantzas, 2013) شکل های ساده سازی شده ای از معادله فائو پنمن مانیتث یعنی والیانتر (RS, T, RH, U)، والیانتر (RS, T, RH) و والیانتر (RS, T) را با استفاده از داده های محدوده آب و هوایی ارائه داد. (Valiantzas, 2015) فرمول های تبخیر- تعرق پتانسیل با داده های محدود و ساده شده را برای موقعیت های مرطوب تایید و اعلام نمود که عملکرد فرمول های پیشنهادی نسبت به روش های تجربی که نیاز به سرعت باد و یا رطوبت نسبی ندارند بهتر بود (Kisi, 2013) مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل مرجع محاسبه شده با استفاده از روش فائو پنمن مانیتث را با نتایج سایر معادلات تجربی شامل کوپایس، تورگ، هارگریوز، هارگریوز- سامانی، ریتچی، ایرمک و والیانتر برای نواحی مدیترانه ای مورد مقایسه قرار داد. نتایج حاکی از تطابق مناسب مقادیر حاصله از معادله والیانتر با مدل فائو پنمن- مانیتث بود. در ناحیه شمال شرقی هند Pandey و همکاران (۲۰۱۶) به دنبال ارزیابی روش های تبخیر- تعرق مرجع با بررسی معادله های گوناگون توانستند انطباق نتایج حاصل از مدل های با پایه ی تابش خورشید و دمای هوا را با نتایج حاصل از مدل فائو- پنمن مانیتث بدست آورند. Djaman و همکاران (۲۰۱۵) در مقایسه عملکرد ۱۶ معادله تبخیر- تعرق مرجع با معادله فائو- پنمن مانیتث به این نتیجه رسیدند که خروجی معادلات بر پایه دمای هوا در مقایسه با خروجی معادله فائو- پنمن مانیتث کمترین درصد خطا را نشان داد (Valipour, 2015) کارایی معادله های والیانتر را برای تخمین تبخیر تعرق پتانسیل در استان های مختلف کشور بررسی و اعلام کرد که این معادله ها برای تخمین تبخیر تعرق در ایران مناسب هستند. در این تحقیق که بر اساس داده های ماهانه انجام گرفته است برای استان چهار محال و بختیاری معادله والیانتر (RS) از دقت بالاتری برخوردار بوده است.

هدف از پژوهش حاضر محاسبه مقادیر روزانه تبخیر تعرق پتانسیل در دوره زمانی ۲۱ ساله (از سال ۱۹۹۴-۲۰۱۵ میلادی) با استفاده از معادلات تجربی کوپایس، تورگ، هارگریوز، هارگریوز سامانی، ریتچی، ایرمک و والیانتر (RS, T, RH, U) و (RS, T, RH) و (RS, T) برای چهار ایستگاه بروجن، شهرکرد، کوهرنگ و لردگان و مقایسه آنها با مقادیر تبخیر تعرق پتانسیل محاسبه شده با روش فائو پنمن مانیتث و در نتیجه تعیین مناسب ترین روش جهت برآورد تبخیر- تعرق مناطق مذکور در صورت نبود پارامتر های هواشناسی کافی می باشد.

### مواد و روش ها

برای انجام این تحقیق، آمار و داده های روزانه مورد نیاز چهار ایستگاه بروجن، شهرکرد، کوهرنگ و لردگان از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۵ تهیه شد. مختصات و موقعیت جغرافیایی ایستگاه های بروجن، شهرکرد، کوهرنگ و لردگان به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مختصات جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریای ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
بروجن	51°18'	31°59'	۲۲۶۰
شهرکرد	50°51'	32°17'	۲۰۴۹
کوهرنگ	50°07'	32°26'	۲۲۸
لردگان	50°49'	31°31'	۱۵۸۰

اقلیم نیمه مرطوب معتدل سرد استان دارای تابستان‌های گرم و خشک با حداقل دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد زیر صفر و حداکثر دمای ۴۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. داده‌های روزانه شامل داده‌های دمای هوا (T)، تابش خورشیدی (RS)، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ( $U_2$ ) و درصد رطوبت نسبی (RH) است.



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری

پارامترهای آماری مربوط به آمار ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است. در جدول فوق مقادیر میانگین ( $X_{mean}$ )، حداکثر ( $X_{max}$ )، حداقل ( $X_{min}$ )، انحراف معیار ( $S_x$ )، ضریب چولگی ( $C_x$ ) برای هرکدام از داده‌های هواشناسی ارائه شده است. داده‌های مربوط به تابش خورشیدی و دما برای ایستگاه‌های مورد مطالعه کم‌ترین ضریب چولگی و بیشترین همبستگی با تبخیر- تعرق پتانسیل را دارند. در دو ایستگاه لردگان و کوهرنگ داده‌های مربوط به سرعت باد بطور چشم‌گیری بیش‌ترین توزیع چولگی (به ترتیب ۲/۵۳۸ و ۲/۵۱۱) و کم‌ترین همبستگی (به ترتیب ۰/۰۴۴ و ۰/۲۴۷) با تبخیر- تعرق پتانسیل را نشان داد. کاهش اختلاف ارتفاع از کوهرنگ به سمت لردگان بر افزایش توزیع چولگی

و کاهش همبستگی تاثیر دارد. بیشترین همبستگی بین سرعت باد و تبخیر- تعرق پتانسیل (۰/۲۹۹) مربوط به ایستگاه شهرکرد با ارتفاع ۲۰۴۹ متر است. میانگین رطوبت نسبی برای همه ایستگاه‌ها بیش از ۴۴ درصد است و به نظری رسد تابش خورشیدی و دما بیشترین اثر را بر تبخیر- تعرق پتانسیل می گذارند.

جدول ۲: پارامترهای آماری روزانه هر ایستگاه

نام ایستگاه	پارامتر	مقدار میانگین	حداقل مقدار	حداکثر مقدار	انحراف معیار	مقدار چولگی	همبستگی با $ET_0$
بروجن	$R_s(\frac{MJ}{m^2})$	۱۹/۸۲۳	۴/۸	۳۰/۶۰۰	۶/۵۵۶	-۰/۱۲۶	۰/۸۶۵
	T(°C)	۱۱/۰۸۳	-۲۴/۴	۳۶/۶۰۰	۲/۷۱۹	-۰/۶۰۹	۰/۸
	RH(%)	۳۶/۲۶	۸	۹۶/۶۶۰	۱۸/۱۲۶	۰/۸۷۳	-۰/۵۶۷
	$u_2(\frac{m}{s})$	۰/۸۶۵	۰	۱/۱۰۹۰	۰/۲۰۶۳	-۰/۸۷۹	۰/۱۷۶
	$ET_0(mm)$	۳/۲۸۹	۰/۴۴	۶/۱۸۰	۱/۶۶۴	۰/۰۷۳	۱
شهرکرد	$R_s(\frac{MJ}{m^2})$	۲۱/۴۹۳	۷/۱	۲۹/۳	۵/۵۱۷	-۰/۵۴۷	۰/۸۷۰
	T(°C)	۳/۱	-۳۲/۴	۳۸/۶	۸/۱۷۰	-۰/۲۶۰	۰/۷۳۶
	RH(%)	۴۳/۰۳۲	۰	۹۷/۶۷	۱۸/۱۵۵	۰/۷۷۶	-۰/۱۹۲
	$u_2(\frac{m}{s})$	۰/۸۵۶	۰	۱/۱۷۹	۰/۲۳۷	-۰/۰۱۵۶	۰/۲۹۹
	$ET_0(mm)$	۳/۶۳۹	۰/۵۶	۶	۳/۹۱۵	۰/۰۷۷	۱
کوهرنگ	$R_s(\frac{MJ}{m^2})$	۱۸/۰۷۹	۴/۶	۲۹/۹	۷/۱۸۱	-۰/۱۲۳	۰/۷۹۰
	T(°C)	۹/۷۲۷	-۲۸/۸	۳۵	۹/۵۶۵	-۰/۲۳۲	۰/۸۶۲
	RH(%)	۴۸/۰۸۵	۰	۹۷/۳۳	۱۹/۰۲۲	۰/۷۴۹	-۰/۶۶۲
	$u_2(\frac{m}{s})$	۰/۷۸۴	۰	۱/۲۰۶	۱/۰۵۴	۲/۵۱۱	۰/۲۴۷
	$ET_0(mm)$	۲/۹۷۲	۰/۳۵	۵/۹۹	۱/۷۰۰	۰/۲۸۵	۱
لردگان	$R_s(\frac{MJ}{m^2})$	۱۹/۵۱۷	۴/۸	۳۳/۳	۶/۷۱۵	-۰/۲۶۰	۰/۹۲۲
	T(°C)	۱۵/۵۲	-۱۷	۴۱/۶	۸/۶۸۶	۰/۰۴۲	۰/۳۰۶
	RH(%)	۴۱/۶۴	۰	۹۷/۳۳	۱۹/۲۴۳	۰/۷۲۴	-۰/۲۵۶
	$u_2(\frac{m}{s})$	۰/۷۸۵	۰	۱/۱۵۴	۱/۰۴۴	۲/۵۳۸	۰/۰۴۴
	$ET_0(mm)$	۳/۴۸۰	۰/۵۶	۶/۹۶	۱/۷۸۸	۰/۰۳۵	۱

### روش‌های تخمین تبخیر-تعرق

ابتدا مقادیر  $ET_0$  برای ایستگاه‌های بروجن، شهرکرد، کوهرنگ و لردگان با استفاده از مدل فائو پنمن مانیتیت محاسبه گردید، سپس از نتایج این روش برای ارزیابی دقت معادله های والیانتر (والیانتر (RS, T,RH,U)، والیانتر (RS, T,RH))، والیانتر (RS, T) و کوپایس، تورک، هارگریوز-سامانی، هارگریوز، ریتیچی و ایرمک استفاده شد. تشریح هر یک از روش های تجربی محاسبه تبخیر و تعرق در این پژوهش به صورت زیر می باشد:

#### الف) روش فائو پنمن مانیتیت

کمیسیون بین المللی آبیاری و زهکشی و سازمان خوار و بار جهانی روش پنمن-مانیتیت را به عنوان یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل و همچنین برای ارزیابی سایر روش های برآورد تبخیر تعرق پیشنهاد نموده است (Allen et al., 1998). در این روش فرض می شود که کل سطح پوشش گیاهی، یک برگ بزرگ با روزنه های موجود در آن است، به همین دلیل این روش پنمن-مانیتیت را روش برگ بزرگ می گویند. رابطه آن به صورت زیر می باشد:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad \text{رابطه ۱}$$

که  $ET_0$ : تبخیر-تعرق پتانسیل (مرجع) (میلی متر بر روز)،  $\Delta$ : شیب فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال بر درجه سانتی گراد)،  $R_n$  = تابش خالص (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $G$ : شار گرما به داخل خاک (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $\gamma$ : ضریب نهان تبخیر (کیلوپاسکال بر درجه سانتی گراد)،  $T$ : میانگین دمای هوا (درجه سانتی گراد)،  $U_2$ : میانگین ۲۴ ساعته سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)،  $e_a$ : فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال) و  $e_d$ : فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال) می باشد.

#### ب) والیانتر (RS, T,RH,U)

(Valiantzas, 2013) معادله ساده شده ی زیر را برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از یک مجموعه کامل

داده آب و های بکار برد:

$$ET_0 = 0.0393R_s \sqrt{T + 9.5} - 0.19R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.048(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) u^{0.7} \quad \text{رابطه ۲}$$

که  $R_s$ : تابش خورشیدی (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $T$ : میانگین دمای هوا (درجه سانتی گراد)،  $RH$ : رطوبت نسبی (درصد)،  $\varphi$ : عرض جغرافیایی (رادبان) و  $U_2$ : میانگین ۲۴ ساعته سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه) است. (Kisi, 2013) در مقاله خود بیان کرد که این معادله برای  $T < -9.5c^0$  معتبر نیست و پیشنهاد داد که از مقدار  $(T + 9.5)$  قبل از جذر گرفتن، قدر مطلق گرفته شود. بنابراین (رابطه ۳) در این تحقیق به جای (رابطه ۲) بکار برده شد:

$$ET_0 = 0.0393R_s\sqrt{|T + 9.5|} - 0.19R_s^{0.6}\varphi^{0.15} + 0.048(T + 20)\left(1 - \frac{RH}{100}\right)u^{0.7} \quad \text{رابطه ۳:}$$

(ب) والیانز (RS, T)

(Valiantzas, 2013) معادله های ساده سازی شده ای را برای محاسبه  $ET_0$  در شرایطی که داده های مربوط به باد و رطوبت نسبی در دسترس نباشند ارائه داد:

$$ET_0 = 0.0393R_s\sqrt{T + 9.5} - 0.19R_s^{0.6}\varphi^{0.15} + 0.0061(T + 20)(1.12T - T_{\min} - 2)^{0.7} \quad \text{رابطه ۴:}$$

(ج) والیانز (RS, T, RH)

همچنین (Valiantzas, 2013) معادله های ساده سازی شده ای را برای محاسبه  $ET_0$  در شرایطی که داده های مربوط به باد در دسترس نباشند ارائه داد:

$$ET_0 = 0.0393R_s\sqrt{T + 9.5} - 0.19R_s^{0.6}\varphi^{0.15} + 0.078(T + 20)\left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad \text{رابطه ۵:}$$

(Kisi, 2013) بیان کرد که (رابطه ۴) برای مقادیر دمای کمتر از ۹/۵ درجه سانتی گراد معتبر نیست. همچنین برای عبارت  $(1.12T - T_{\min}) < 2$  معادله صحت ندارد و برای رفع این مشکل، قدر مطلق عبارت فوق در معادله جایگزین شود لذا (رابطه ۴) به شکل (رابطه ۶) اصلاح شد:

$$ET_0 = 0.0393R_s\sqrt{|T + 9.5|} - 0.19R_s^{0.6}\varphi^{0.15} + 0.0061(T + 20)(|1.12T - T_{\min} - 2|)^{0.7} \quad \text{رابطه ۶:}$$

(د) معادله کوپایس

فرم معادله کوپایس با وابستگی به سه پارامتر هواشناسی بصورت زیر است (Alexandris *et al.*, 2006)

$$ET_0 = m_1 + m_2C_2 + m_3C_1 + m_4C_1 \quad \text{رابطه ۷:}$$

که  $ET_0$ : تبخیر-تعرق مرجع (میلی متر بر روز)،  $m_1 = 0.057$ ،  $m_2 = 0.227$ ،  $m_3 = 0.643$ ،  $m_4 = 0.0124$  است.

$$C_1 = 0.6416 - 0.00784RH + 0.372R_s - 0.00264R_sRH \quad \text{رابطه ۸:}$$

$$C_2 = -0.0033 + 0.00812T + 0.101R_s + 0.00584R_sT \quad \text{رابطه ۹:}$$

(ه) معادله تورک

معادله تورک هم با حذف پارامتر باد یک روش رایج برای محاسبه  $ET_0$  است (Kisi, 2013):

$$ET_0 = (23.89R_s + 50) \frac{0.013T}{T + 15} \left[ 1 + W_{RH} \left( 0.71 - 1.43 \frac{RH}{100} \right) \right] \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

که  $W_{RH} = 1$  وقتی که  $RH < 50\%$  و  $W_{RH} = 0$  وقتی که  $RH > 50\%$  است.

### و) معادله هارگریوز و سامانی

معادله هارگریوز و سامانی با ترکیبی از دما و تابش خارج از جو عبارت است از (Hargreaves, Samani, 1985):

$$ET_0 = 0.408 \times 0.0023R_a \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17.8 \right) (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

که  $ET_0$ : تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)،  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به ترتیب دمای حداکثر و حداقل (درجه سانتی‌گراد) و  $R_a$ : تابش خارج از جو (مگاژول بر مترمربع در روز) است.

### ز) معادله هارگریوز

معادله هارگریوز تنها به داده‌های دمای حداکثر و حداقل و تابش خورشیدی نیازمند است (Hargreaves, 1975):

$$ET_0 = 0.0135 \times 0.408R_s(T + 17.8) \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

پارامترهای  $T$  و  $R_s$  در (رابطه ۲) تعریف شده‌اند.

### ح) معادله ریتچی

این معادله توسط (Jones and Ritchie, 1990) بصورت زیر ارائه شد:

$$ET_0 = \alpha_1 [3.87 \times 10^{-3} \cdot R_s \cdot (0.6T_{max} + 0.4T_{min} + 29)] \quad \text{رابطه ۱۳:}$$

که پارامترهای  $R_s$ : تابش خورشید (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به ترتیب دمای حداکثر و حداقل روزانه است. هنگامی که

$$5 < T_{max} < 35^0c$$

$$\alpha_1 = 1.1$$

$$T_{max} > 35^0c$$

$$\alpha_1 = 1.1 + 0.05(T_{max} - 35)$$

رابطه ۱۴:

$$T_{max} < 5^0c$$

$$\alpha_1 = 0.01 \cdot \exp(0.18(T_{max} + 20))$$

### و) معادله ایرمک

معادله گسترش یافته بوسیله (Irmak et al., 2003) به صورت عبارت زیر است:



$$ET_0 = -0.611 + 0.149.R_s + 0.079T \quad \text{رابطه ۱۵:}$$

در این تحقیق، برای مقایسه مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل محاسبه شده از معادله های والیانتر، هارگریوز- سامانی، هارگریوز، کوپایس، تورک، ریتچی و ایرمک با مقادیر بدست آمده از معادله فائو پنمن مانیتث از آماره های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad \text{رابطه ۱۶:}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad \text{رابطه ۱۷:}$$

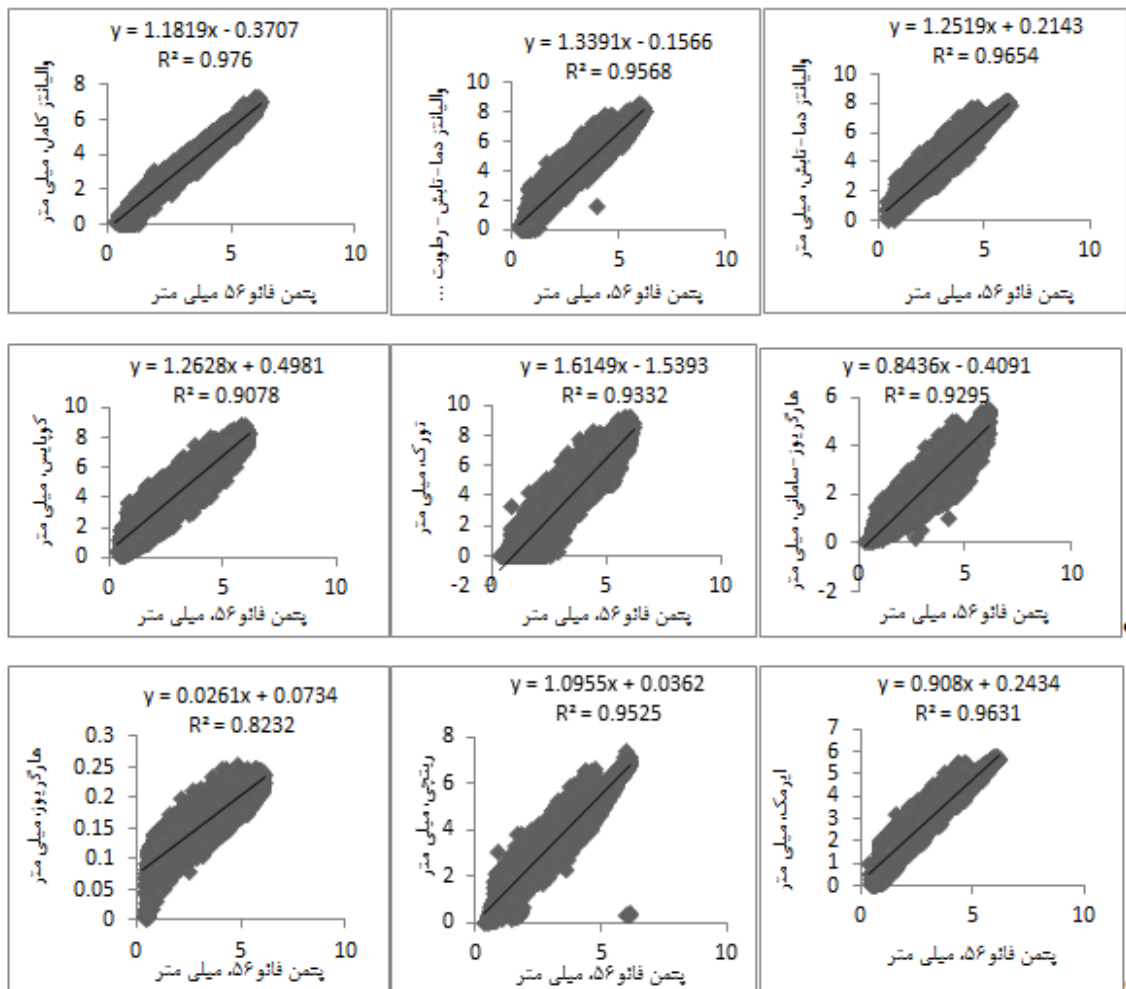
$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه ۱۸:}$$

N: تعداد داده ها،  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$ : مقادیر و متوسط مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل پیش بینی شده با معادلات مختلف،  $y$  و  $\bar{y}$ : مقادیر و متوسط مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل پیش بینی شده با روش فائو پنمن مانیتث می باشد.

### نتایج و بحث

در جدول ۳ نتیجه مقایسه مقادیر تبخیر تعرق پتانسیل پیش بینی شده با معادلات تجربی مختلف ارائه شده است. بر اساس جدول ۳، در ایستگاه بروجن، به وضوح مشاهده می شود که معادله ی ایرمک با توجه به شاخص های RMSE و MAE نسبت به دیگر مدل های تجربی عملکرد بهتری در برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل داشته است. در بین معادلات سه پارامتری معادله والیانتر (T, RH, Rs) نسبت به معادلات کوپایس و تورک، صحت و کارآمدی بهتری را نشان داده است. با مقایسه مدل های دو پارامتری، مدل های والیانتر (T, Rs) و هارگریوز عملکرد ضعیفی داشتند، در حالیکه مدل ایرمک بهترین عملکرد را داشته است. بدون در نظر گرفتن تعداد پارامترهای کاربردی در روش ها، مدل ریتچی نسبت به مدل های تورک، کوپایس و هارگریوز سامانی برتری در برآورد را بهتر نشان داده است. بر اساس مقایسه انجام شده در جدول ۲، ترتیب صحت و کارآمدی روش ها عبارت است از: ایرمک، والیانتر (Rs, T, RH, U)، ریتچی، هارگریوز- سامانی، والیانتر (Rs, T, RH, T)، تورک، کوپایس، والیانتر (T, Rs) و هارگریوز. در شکل ۲ با در نظر گرفتن ضریب تبیین برای مقایسه مدل ها، مقادیر حاصل از تبخیر- تعرق پتانسیل از روش والیانتر (Rs, T, RH, U) با مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل محاسبه شده از

روش فائو پنمن مانیتث همخوانی داشته و ضمن پراکندگی کمتر تطابق بیشتری را دارد. برای ایستگاه شهرکرد، مدل ایرمک بر اساس RMSE و MAE نزدیک‌ترین تخمین از مقادیر  $ET_0$  را به معادله فائو پنمن مانیتث دارد. سپس معادله والیانتر (Rs,T, RH,U) با اندکی اختلاف نسبت به ایرمک برآورد مناسب‌تری را نشان داده است. معادله ریتچی در مقایسه با معادلات هارگریوز، کوپایس، تورک و والیانتر (Rs,T) تخمین بسیار بهتری را داراست. بر اساس مقایسه‌ها در (جدول ۳)، نظم کارآمدی مدل‌ها بر اساس RMSE و MAE به ترتیب شامل: ایرمک، والیانتر (Rs,T, RH,U)، ریتچی، هارگریوز- سامانی، والیانتر (Rs,T, RH)، تورک، والیانتر (Rs,T)، کوپایس و هارگریوز است. (شکل ۳) نیز تخمین‌های  $ET_0$  برای هر یک از معادلات تجربی در ایستگاه شهرکرد را نشان می‌دهد. در شکل با در نظر گرفتن مقدار ضریب تبیین واضح است که معادله والیانتر (Rs,T, RH,U) نزدیک‌ترین تخمین را به مقادیر  $ET_0$  فائو پنمن مانیتث با پراکندگی کمتری ارائه می‌دهد. معادله هارگریوز بدترین تخمین را نشان داده است.



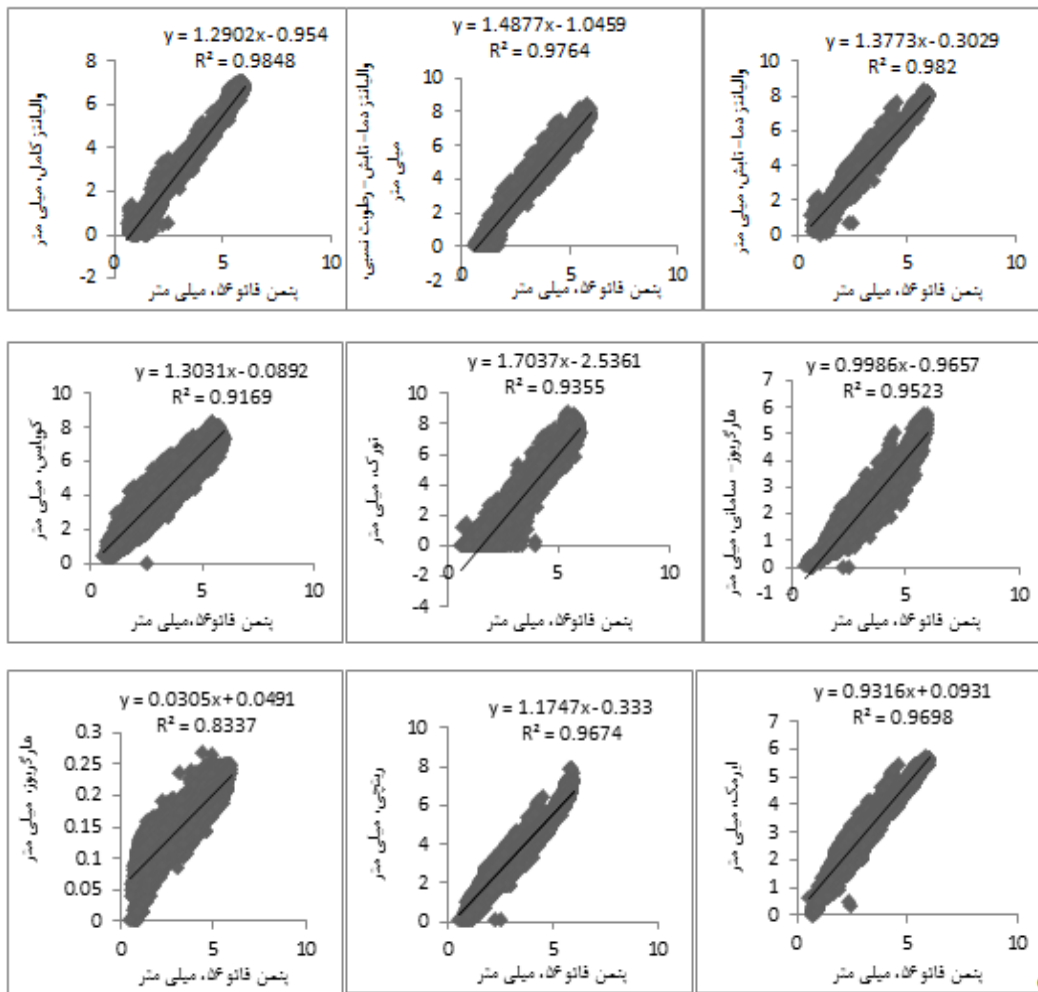
شکل ۲: مقایسه معادلات تجربی در تخمین  $ET_0$  با معادله فائو پنمن مانیتث، ایستگاه بروجن

جدول ۳: عملکرد آماره‌های مدل‌های تجربی

R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	ورودی مدل	مدل	نام ایستگاه
۰/۹۷۶۰	۰/۴۰۴	۰/۴۸۸	(Rs,T, RH,U)	والیانتز	
۰/۹۵۶۶	۰/۰۱۰	۱/۲۰۶	(Rs,T, RH)	والیانتز	
۰/۹۶۵	۱/۰۵۳	۱/۱۹۱	(Rs,T)	والیانتز	
۰/۹۰۷۹	۱/۴۰۸	۱/۵۸۰	(Rs,T, RH)	کوپایس	
۰/۹۳۳۲	۱/۰۹۵	۱/۳۴۱	(Rs,T, RH)	تورک	بروجن
۰/۹۲۹۵	۰/۹۳۷	۱/۰۳۴	(Rs,T)	هارگریوز- سامانی	
۰/۸۲۳۲	۳/۱۳۱	۳/۵۲۶	(Rs,T)	هارگریوز	
۰/۹۵۲۴	۱/۴۷۴	۰/۵۶۰	(Rs,T)	ریتیچی	
۰/۹۶۳۰	۰/۲۷۷	۰/۳۳۸	(Rs,T)	ایرمک	
۰/۹۸۴۶	۰/۳۸۵	۰/۴۷۹	(Rs,T, RH,U)	والیانتز	
۰/۹۷۶۳	۰/۸۱۸	۱/۰۴۲	(Rs,T, RH)	والیانتز	
۰/۹۸۱۹	۱/۰۲۶	۱/۱۹۵	(Rs,T)	والیانتز	
۰/۹۱۷۲	۱/۰۳۴	۱/۲۱۳	(Rs,T, RH)	کوپایس	
۰/۹۳۵۵	۰/۹۷۷	۱/۱۷۹	(Rs,T, RH)	تورک	
۰/۹۵۲۰	۰/۹۱۹	۰/۹۹۵	(Rs,T)	هارگریوز- سامانی	شهرکرد
۰/۸۳۵۴	۳/۲۹۷	۳/۶۵۴	(Rs,T)	هارگریوز	
۰/۹۶۷۳	۰/۴۰۶	۰/۴۸۷	(Rs,T)	ریتیچی	
۰/۹۶۹۵	۰/۲۴۳	۰/۲۹۷	(Rs,T)	ایرمک	
۰/۹۷۹۹	۰/۳۵۷	۰/۴۲۹	(Rs,T, RH,U)	والیانتز	
۰/۹۵۴۹	۰/۸۲۰	۱/۰۴۱	(Rs,T, RH)	والیانتز	
۰/۹۶۶۱	۰/۸۲۷	۱/۰۲۴	(Rs,T)	والیانتز	
۰/۹۲۸۹	۱/۰۳۷	۱/۲۳۴	(Rs,T, RH)	کوپایس	کوهرنگ
۰/۹۳۱۴	۰/۹۱۳۹	۱/۱۱۰	(Rs,T, RH)	تورک	
۰/۹۲۷۱	۰/۹۵۶۵	۱/۱۰۱	(Rs,T)	هارگریوز- سامانی	
۰/۸۰۹۶	۲/۷۶۳۳	۳/۱۸۵	(Rs,T)	هارگریوز	
۰/۹۶۶۴	۰/۳۹۲	۰/۴۸۰	(Rs,T)	ریتیچی	
۰/۹۶۳۸	۰/۲۶۱	۰/۳۳۳	(Rs,T)	ایرمک	

ادامه جدول ۳: عملکرد آماره‌های مدل‌های تجربی

نام ایستگاه	مدل	ورودی مدل	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
لردگان	والیانتز	(Rs,T, RH,U)	۰/۵۷۱	۰/۴۶۲	۰/۹۷۷۶
	والیانتز	(Rs,T, RH)	۱/۴۴۰	۱/۱۹۷	۰/۹۴۵۱
	والیانتز	(Rs,T)	۱/۴۹۵	۱/۳۴۵	۰/۹۵۲۲
	کوپایس	(Rs,T, RH)	۱/۳۲۴	۱/۱۴۴	۰/۹۱۷۴
	تورک	(Rs,T, RH)	۱/۳۶۴	۱/۰۲۵	۰/۹۲۹۴
	هارگریوز - سامانی	(Rs,T)	۰/۸۴۹	۰/۷۴۱	۰/۹۲۷۵
	هارگریوز	(Rs,T)	۳/۶۸۶	۳/۲۲۴	۰/۸۳۵۶
	ریتچی	(Rs,T)	۰/۸۸۹	۰/۷۰۹	۰/۹۳۶۷
	ایرمنک	(Rs,T)	۰/۴۱۸	۰/۳۳۰	۰/۹۵۳۵

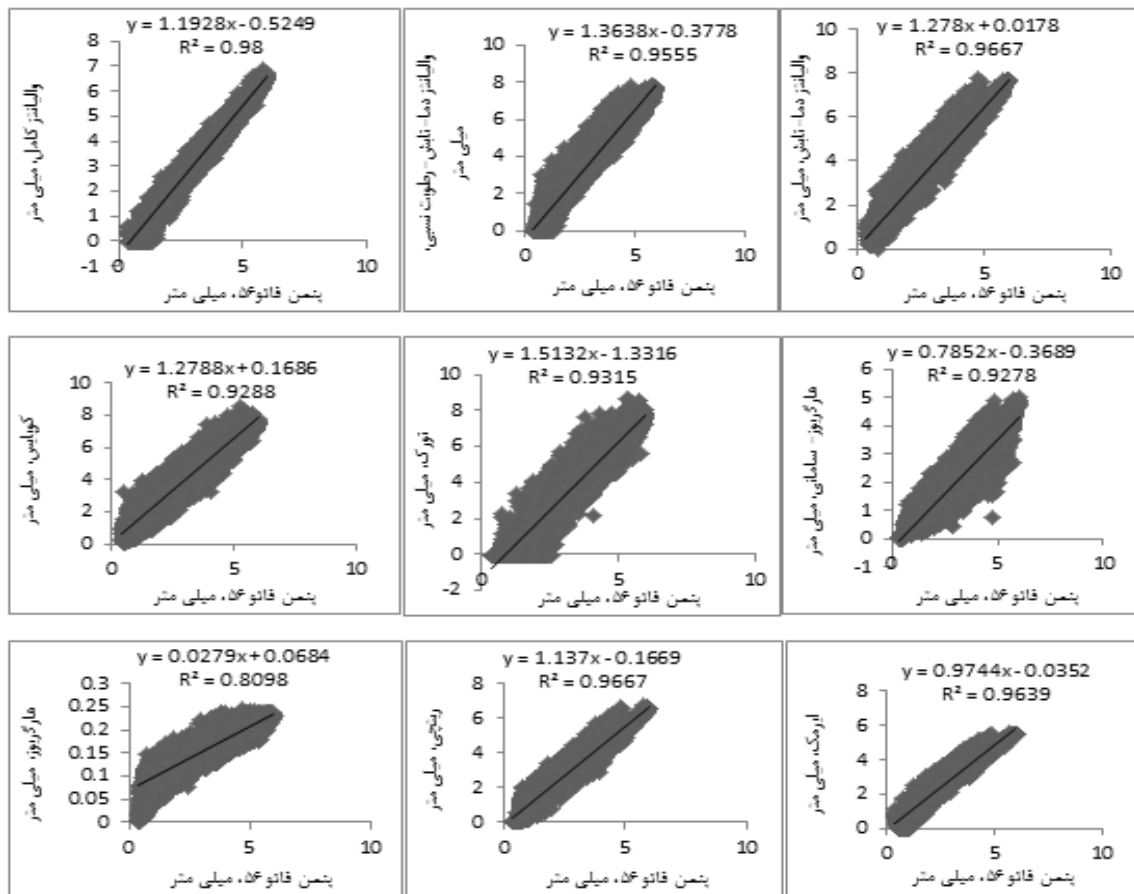


شکل ۳: مقایسه معادلات تجربی در تخمین ET<sub>0</sub> با روش فائو پنمن مانیتث، ایستگاه شهرکرد

در ایستگاه لردگان، بر اساس آماره‌های  $RMSE$  و  $MAE$  معادله ایرمک با اختلاف اندکی نسبت به معادله والیانتر  $(RS, T, RH, U)$  در برآورد  $ET_0$  عملکرد مناسب‌تری را نشان داده است. هم چنین معادلات هارگریوز- سامانی، ریتچی و کوپایس در این ایستگاه نسبت به معادلات والیانتر  $(RS, T)$  و والیانتر  $(RS, T, RH)$  صحت و دقت بیش‌تری را دارند. با توجه به (جدول ۳) عملکرد معادلات در تخمین  $ET_0$  به‌ترتیب شامل، ایرمک، والیانتر  $(RS, T, RH, U)$ ، هارگریوز- سامانی، ریتچی، کوپایس، تورک، والیانتر  $(RS, T, RH)$ ، والیانتر  $(RS, T)$  و هارگریوز است. با بررسی بهترین معادله خطی برازش یافته، ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  از معادله هارگریوز- سامانی نسبت به معادلات والیانتر  $(RS, T, RH)$  و والیانتر  $(RS, T)$  به‌ترتیب به ۱ و صفر نزدیکتر بوده و مطابق با واقعیت است (شکل ۵) نیز تخمین‌های  $ET_0$  برای هر یک از معادلات تجربی در ایستگاه لردگان را نشان می‌دهد. در این شکل با در نظر گرفتن ضریب تبیین، معادله والیانتر  $(RS, T, RH, U)$ ، پراکندگی کمتری را در تخمین  $ET_0$  نسبت به مقادیر فائو پنمن مانیتث نشان می‌دهد.

بیش‌ترین پراکندگی در مقایسه برای معادله هارگریوز بدست آمده است. در این ایستگاه بیشترین پراکندگی در برآورد  $ET_0$  نسبت به سایر ایستگاه‌ها مشاهده شده است. این افزایش پراکندگی به دلیل کاهش ارتفاع منطقه بوده که بر کاهش سرعت باد در ارتفاع ۲ متری به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در محاسبه تبخیر- تعرق تأثیر دارد که خود بر کاهش تبخیر- تعرق پتانسیل مؤثر می‌باشد. در (جدول ۴) ترتیب دقت معادلات در برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل برای هر کدام از ایستگاه‌ها نشان داده شده است. بطور کلی نظم کارآمدی روش‌ها عبارت است از، ایرمک، والیانتر  $(RS, T, RH, U)$ ، ریتچی، هارگریوز- سامانی، والیانتر  $(RS, T, RH)$ ، تورک، والیانتر  $(RS, T)$ ، کوپایس و هارگریوز. نتایج تحقیق حاضر با نتایج به دست آمده در تحقیق ولی پور (۲۰۱۵) برای استان چهارمحال و بختیاری همخوانی دارد. بطور کلی پیشنهاد می‌شود که از معادله ایرمک و والیانتر  $(RS, T, RH, U)$  برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل در ناحیه نیمه مرطوب معتدل سرد استفاده شود. با مشاهده جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که در محاسبه مقدار  $ET_0$  معادلات دو پارامتری ریتچی و هارگریوز سامانی کارآمدی بهتری را بعد از ایرمک و والیانتر  $(RS, T, RH, U)$  دارند.

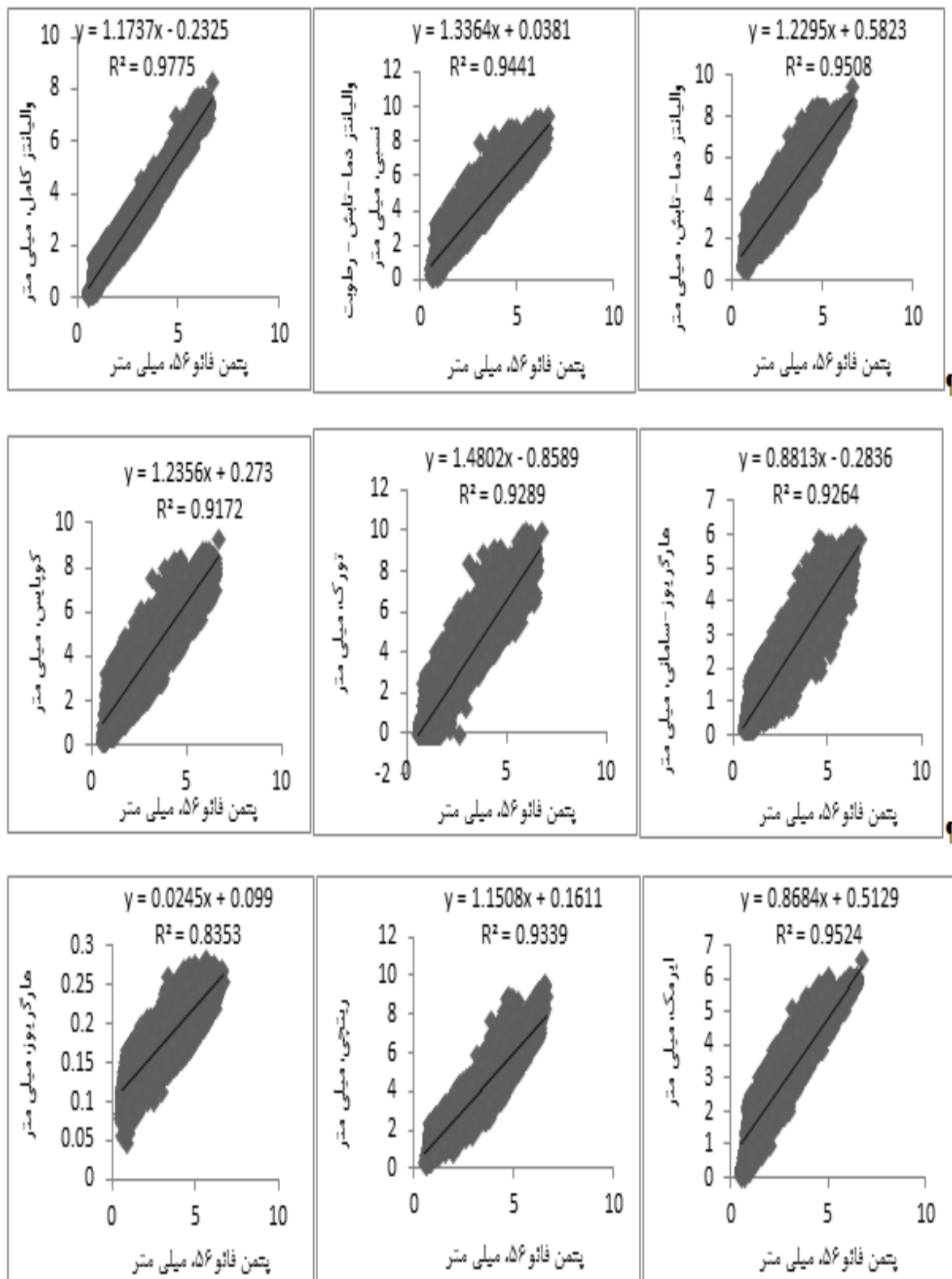
مقایسه‌ی معادلات تجربی برای تخمین مجموع  $ET_0$  با مقادیر حاصله از روش فائو پنمن مانیتث در (جدول ۵) انجام شده است. از (جدول ۵) برای ایستگاه‌های بروجن، شهرکرد، کوهرنگ و لردگان مدل‌های ایرمک، والیانتر  $(RS, T, RH, U)$  و ریتچی نزدیکترین مجموع  $ET_0$  تخمین زده شده به روش فائو پنمن مانیتث را ارائه می‌دهد. بطور کلی مدل‌های دو پارامتری برآورد کمتری از مقادیر  $ET_0$  نسبت به روش فائو پنمن مانیتث دارند. دلیل اصلی برای این حالت این است که در این دسته از معادلات دو پارامتری، میزان رطوبت در نظر گرفته نشده است و رطوبت که به فشار بخار اشباع بسیار زیاد وابسته است، حذف شده است.



شکل ۴: مقایسه معادلات تجربی در تخمین  $ET_0$  با روش فائو پنمن مانیتث، ایستگاه کوهرنگ

جدول ۴: ترتیب مدل‌های تجربی در برآورد  $ET_0$  در ایستگاه‌های مورد مطالعه

مدل	ایستگاه بروجن	ایستگاه شهرکرد	ایستگاه کوهرنگ	ایستگاه لردگان	مجموع
والیانتر (Rs,T, RH,U)	۲	۲	۲	۲	۸
والیانتر (Rs,T, RH)	۵	۵	۵	۷	۲۲
والیانتر (Rs,T)	۸	۷	۴	۸	۲۷
کوپایس	۷	۸	۸	۵	۲۸
تورک	۶	۶	۷	۶	۲۵
هارگریوز- سامانی	۴	۴	۶	۳	۱۷
هارگریوز	۹	۹	۹	۹	۳۶
ریتچی	۳	۳	۳	۴	۱۳
ایرمنک	۱	۱	۱	۱	۴



شکل ۵: مقایسه معادلات تجربی در تخمین  $ET_0$  با روش فائو پنمن مانیتیت، ایستگاه لردگان

جدول ۵: مجموع تبخیر- تعرق پتانسیل مدل‌های تجربی و درصد خطای نسبی نسبت به روش فائو پنمن مانیتیت

مدل	مجموع تبخیر- تعرق پتانسیل (میلی متر)							
	ایستگاه بروجن	ایستگاه شهرکرد	ایستگاه کوهرنگ	ایستگاه لردگان	ایستگاه بروجن	ایستگاه شهرکرد	ایستگاه کوهرنگ	ایستگاه لردگان
فائو پنمن مانیتیت	۲۳۲۱۰	۲۷۱۰۰	۲۲۱۳۵	۲۷۹۷۱	-	-	-	-
والیانتر (Rs,T, RH,U)	۲۴۸۱۷	۲۷۸۶۰	۲۲۴۹۳	۲۷۶۴۱	۶/۹۲	۲/۸۰	۱/۶۱	-۱/۱۷
والیانتر (Rs,T, RH)	۳۰۰۵۵	۳۲۵۲۶	۲۷۳۷۸	۳۳۶۳۸	۲۹/۴۹	۲۰/۰۲	۲۳/۶۸	۲۰/۲۶
والیانتر (Rs,T)	۳۰۵۶۸	۳۵۰۶۹	۲۸۴۲۱	۳۴۸۷۹	۳۱/۹۶	۲۹/۴۰	۲۸/۳۹	۲۴/۷
کوپایس	۳۲۸۲۳	۳۴۶۴۹	۲۹۵۶۳	۳۲۸۱۲	۴۱/۴۱	۲۷/۸۵	۳۳/۵۵	۱۷/۳
تورک	۲۶۶۳۵	۲۷۲۸۵	۲۳۵۷۸	۳۰۸۰۱	۱۴/۷۵	۰/۶۸۳	۶/۵	۱۰/۱
هارگریوز- سامانی	۱۶۶۹۵	۱۹۸۷۱	۱۴۶۳۳	۱۹۹۸۸	-۲۸/۰۷	-۲۶/۶۷	-۳۳/۸۹	-۲۸/۵۴
هارگریوز	۱۱۲۲	۱۱۹۳	۱۱۲۶	۱۳۳۲	-۹۵/۱۶	-۹۵/۵۹	-۹۴/۹۱	-۹۵/۲۷
ریتچی	۲۵۶۸۱	۲۹۳۵۵	۲۳۹۲۵	۲۹۸۹۳	۱۰/۶۴۴	۸/۳۲۱	۸/۰۸	۶/۸۷
ایرکم	۲۲۷۹۲	۲۵۹۳۵	۲۱۳۰۵	۲۵۳۶۵	-۱/۸۰۲	-۴/۲۹	-۳/۷۴	-۹/۳

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، قابلیت اجرایی مدل‌های متفاوت برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل در مقایسه با روش فائو پنمن مانیتیت در یک اقلیم نیمه مرطوب معتدل سرد مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل‌های تجربی جدید با استفاده از داده‌های روزانه آب و هوایی ایستگاه‌های بروجن، شهرکرد، کوهرنگ و لردگان سنجیده شد. نتایج نشان داد که دقت معادله‌های ایرکم و والیانتر (Rs,T, RH,U) برای چهار ایستگاه فوق، بهتر از دیگر معادلات تجربی بود. در تخمین تبخیر- تعرق پتانسیل، مدل هارگریوز بدترین تخمین را نشان داد. هم چنین مجموع تخمین‌های  $ET_0$  حاصله از معادلات تجربی با هم مقایسه شدند. مشخص شد که روش‌های ایرکم و والیانتر (Rs,T, RH,U) به ترتیب برای همه ایستگاه‌ها بهترین مدل‌های کارآمد بودند.



## منابع

- تفضلی، ف. (۱۳۸۵). ارزیابی حساسیت مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق به تابش ورودی روزانه در شرایط اقلیمی همدان. پایان نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
- زارع ابیانه، ح.، بیات‌ورکشی، م.، سبزی‌پرور، ع.، معروفی، ص.، قاسمی، ع. (۱۳۸۹). ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، (۷۴): ۹۵-۱۱۰.
- سلطانی، ا.، میر لطیفی، س. م.، دهقانی سانجج، ح. (۱۳۹۱). برآورد تبخیر- تعرق کرجع با استفاده از داده‌های محدود هواشناسی در شرایط اقلیمی مختلف. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶ (۱): ۱۳۹-۱۴۹.
- موسوی بایگی، م.، اشرف، ب.، میان آبادی، آ. (۱۳۸۹). ارزیابی چهار مدل تبخیر- تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم نیمه خشک ایران با هدف انتخاب بهترین مدل تابش. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۷ (۴): ۱۰۵-۸۷.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O. (1991).** FAO-24 Reference evapotranspiration factors. *Journal of Irrig. Drain. Eng.*, 117,5 , pp: 758-773.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998).** Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, pp:19- 5.
- Alexandris, S., Kerkides, P., Liakatas, A. (2006).** Daily reference evapotranspiration estimates by the Copais approach. *Agric. Water Manage.*, 82, pp: 371–386.
- Djaman, k., Balde, A., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M., Manneh, B., D.Moukoubi, Y., Futakuchi, K., Saito, K. (2015).** Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valey. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 3, pp:139-159
- Hargreaves, G.H. 1975.** Moisture availability and crop production, *Trans. Am. Soc. Agric.Eng.*, 18, 5, pp: 980-984.
- Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985).** Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.*, 1, 2, pp: 96–99.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G., Jones, J. W. (2003).** Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrig. Drain. Eng.*, ASCE ,129, 5, pp: 336–347.
- Jones, J. W., Ritchie, J.T. (1990).** Crop growth models. *Management of farm irrigation system*, G.J. Hoffman, T.A. Howel, and K.H. Solomon, eds., ASAE Monograph No.9, ASAE, St. Joseph, Mich. pp: 63-89.

- Kisi, O. (2013).** Comparison of different empirical methods for estimating daily reference evapotranspiration in Mediterranean climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140,1 pp: 1-24.
- Pandey, P., P.Dabral, P., Pandey, V.(2016).** Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *International Soil and Water Conservation Research* 4. pp: 52-63.
- Valipour, m. (2015).** Investigation of Valiantzas' evapotranspiration equation in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 121, 1-2, pp: 267-278.
- Valiantzas, J. (2013).** Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman- Monteith reference evapotranspiration using limited weather data. *Journal of Hydro.*, 505, pp: 13-23.
- Valiantzas, J. (2015).** Simplified limited data Penman  $ET_0$  formulas adapted for humid Locations. *Journal of Hydro*, pp: 701-707.