

پایش زمانی و مکانی روش‌های تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع (مطالعه موردی: استان خوزستان)

الهه ذرتی پور^۱، امیر سلطانی محمدی^{۲*}، امین ذرتی پور^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. دانشیار، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۹/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۲/۱۰)

چکیده

برآورد صحیح تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET₀)، به منظور پایش دقیق نیاز آبی گیاهان و بیلان آب حوضه‌ها در برنامه‌ریزی‌های کلان آبیاری و زهکشی، ضروری است. تحقیق حاضر با هدف، پایش تغییرات زمانی و مکانی ۲۴ روش تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع بر مبنای سه روش کلی دمای هوا، تابش خورشید و انتقال جرم، به صورت فصلی و سالانه (طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵)، در ۱۱ ایستگاه هواشناسی استان خوزستان در ایران انجام شد. روش‌های یادشده با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R²)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برحسب (mm/day) و درصد انحراف (PBIAS) با نتایج روش فائو پنمن مانیت (PMF-56) مقایسه شد. همچنین، نقشه بهترین روش از هر دسته در محیط ArcGIS تهیه شد. نتایج نشان داد روش‌ها در فصول مختلف عملکردی متفاوت دارند، اما در بیشتر روش‌ها، نتایج رضایت‌بخش بود که دلیل آن می‌تواند نوع اقلیم یکسان و موقعیت جغرافیایی مشابه باشد. با توجه به نتایج سالانه، از بین روش‌های مبتنی بر دما، بلانی کریدل با R²=۰/۹۲ و RMSE=۲/۹ mm/day و هارگریوز سامانی با R²=۰/۹۱ و RMSE=۲/۲ mm/day، از بین روش‌های تابشی، دورنباس و پروت با R²=۰/۹۳ و RMSE=۳ mm/day و از بین روش‌های انتقال جرم، روش سازمان هواشناسی جهانی (WMO) با R²=۰/۹۷ و RMSE=۵ mm/day بهترین برآورد ET₀ را در استان خوزستان نشان دادند. به‌طور کلی، از بین سه دسته روش، روش‌های دمایی در تخمین ET₀ دقت بیشتری را در استان خوزستان نشان دادند. درخور یادآوری است، به‌لحاظ زمانی فصل تابستان نیز در کلیه روش‌های دمایی، تابشی و انتقال جرم کمترین دقت و صحت را نشان داد.

کلیدواژگان: انتقال جرم، تابش خورشید، تبخیر و تعرق گیاه مرجع، فائو پنمن مانیت.

مقدمه

برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع کارکردی کلیدی در تعیین نیاز آبی واقعی گیاهان و در نهایت، طراحی صحیح سیستم‌های آبیاری آنها دارد [۱]. روش‌های مختلفی برای برآورد صحیح ETO وجود دارد که دقت آنها به شرایط آب و هوایی منطقه مطالعاتی بستگی دارد [۲]. برای اندازه‌گیری مستقیم مقدار تبخیر و تعرق واقعی، می‌توان از روش‌های لایسیمتری و تغییرات آب خاک (روش بیلان آب) استفاده کرد. اگرچه اغلب این روش‌ها گران و پیچیده هستند، ابزاری مؤثر برای اعتبارسنجی و واسنجی مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق محسوب می‌شوند. روش‌های غیرمستقیم نظیر مدل‌های ریاضی برآورد تبخیر و تعرق می‌توانند به سهولت استفاده شوند، ولی در زمانی که روش‌های اندازه‌گیری دشوار است، به کار می‌روند [۳]. براساس مطالعات صورت گرفته، روش‌های متداول برآورد ETO، به سه دسته اصلی تقسیم شده است که شامل روش‌های مبتنی بر دما، روش‌های مبتنی بر تابش و روش‌های مبتنی بر انتقال جرم هستند [۴]. در روش فائو پنمن مانیت، پارامترهای آب و هوایی مرتبط با این سه دسته در نظر گرفته شده است [۵]. در بیشتر مناطق، داده‌های آب و هوایی محدودند و امکان استفاده از روش فائو پنمن مانیت نیست. بنابراین، باید از دیگر روش‌های تجربی برای محاسبه ETO استفاده کرد [۶]. مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی روش‌های مختلف ETO صورت گرفته است. ایکس‌یو و سینگ (۲۰۰۲) به بررسی تخمین ETO با استفاده از سه روش مبتنی بر دما، تابش و انتقال جرم، در سوئیس پرداختند، نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده برتری روش‌های بلانی کریدل، هارگریوز، مک‌کینگ، پرستلی تیلور و رور، در مقایسه با روش PMF-56 است [۴]. آلمورکس و همکارانش (۲۰۱۵) با ارزیابی ۱۱ روش مبتنی بر دما، به تخمین ETO در ۴۳۶۲ ایستگاه هواشناسی در سراسر جهان پرداختند و نتیجه گرفتند که این روش‌ها خطای زیاد و به طور میانگین همبستگی کمی نسبت به روش فائو پنمن مانیت در آب و هوای گرمسیری دارد [۷]. دامانا و همکارانش (۲۰۱۵) ۱۶ روش ETO تحت شرایط ساحلی، در دلتای رودخانه سنغال را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده عملکرد خوب روش‌های ماهرینگر و ترابرت است [۱]. لانگ و

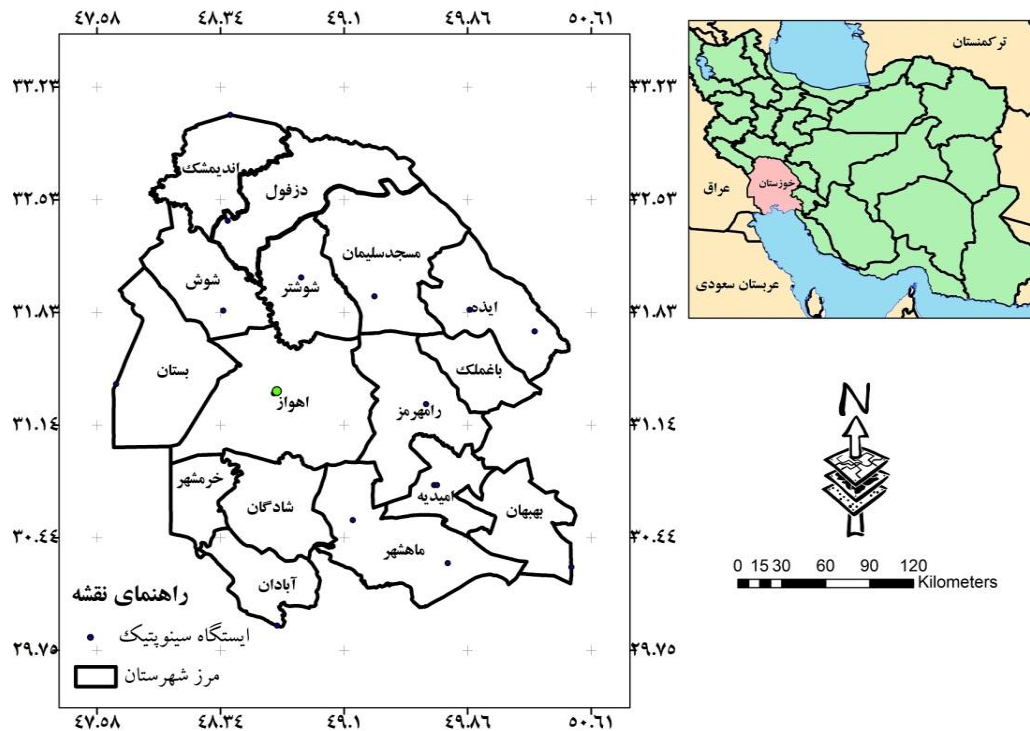
همکارانش (۲۰۱۷) هشت روش تخمین ETO را با روش فائو پنمن مانیت، در جنوب غرب چین مقایسه کردند. به این منظور، آنها از سه روش تابشی مک‌کینگ، آبتیو و پرستلی تیلور و پنج روش دمایی هارگریوز سامانی، بلانی کریدل، هامن، لیناکر و تورنت وایت استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد عملکرد روش‌ها در هر منطقه متناسب با نوع اقلیم آن متنوع است، ولی از گروه روش‌های تابشی، روش مک‌کینگ و از گروه روش‌های دمایی، روش هارگریوز سامانی بهترین عملکرد را داشتند. همچنین، روش‌های تابشی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های دمایی از خود نشان دادند [۸]. ولی‌پور (۲۰۱۷) روش‌های مبتنی بر انتقال جرم به منظور تعیین بهترین روش در شرایط مختلف آب و هوایی ایران برای پیش‌بینی ETO را مقایسه کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد روش پنمن بهتر از سایر روش‌ها به تخمین ETO در بیشتر استان‌های ایران پرداخته است [۶]. بابامیری و همکارانش (۲۰۱۳) هفت روش مختلف تخمین ETO مبتنی بر تابش خورشیدی در مقیاس ماهانه در حوضه دریاچه ارومیه را مقایسه و واسنجی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بعد از واسنجی، روش دورنباس و پروت به‌عنوان بهترین روش در حوضه مطالعه شده شناخته شد. همچنین، دومین روش مناسب در حوضه یادشده، روش پرستلی تیلور معرفی شد [۹]. بابامیری و دین‌پژوه (۲۰۱۴) چهار روش تخمین ETO مبتنی بر دما را در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده برتری روش هارگریوز سامانی در قبل و بعد از واسنجی (در حالتی که یک ضریب واسنجی برای ایستگاه‌ها تخمین زده شد) بود و پس از آن، روش‌های لیناکر و بلانی کریدل به ترتیب به‌عنوان روش‌های مناسب تخمین ETO تشخیص داده شدند [۱۰]. همچنین، بابامیری و دین‌پژوه (۲۰۱۵) به مقایسه و واسنجی نه روش مختلف تخمین ETO مبتنی بر انتقال جرم در مقیاس ماهانه در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد قبل و بعد از واسنجی، روش میر و پس از آن، روش دالتون به‌عنوان بهترین روش‌ها در حوضه مطالعه شده شناخته شدند [۱۱]. بابامیری و دین‌پژوه (۲۰۱۶) ۲۰ روش مختلف تخمین ETO مبتنی بر سه دسته کلی دمای هوا، تابش خورشید و انتقال جرم را در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه ارزیابی

هدف پایش زمانی و مکانی ۲۴ روش مبتنی بر دما، تابش خورشیدی و انتقال جرم، برای تخمین ET₀ در ۱۱ شهرستان استان خوزستان و تعیین بهترین روش در شرایط آب و هوایی هر ایستگاه در مقیاس سالیانه، فصلی و همچنین تولید نقشه مکانی بهترین روش‌های انتخابی در هر ایستگاه با استفاده از نرم‌افزار Arc Gis انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

استان خوزستان با مساحتی حدود ۶۴۰۵۷ کیلومترمربع، بین ۴۷ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۲۹ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی از خط استوا، در جنوب غربی ایران واقع شده است. این استان از جنوب با خلیج فارس و از غرب با کشور عراق هم‌مرز است. در مطالعه حاضر اطلاعات آب و هوایی (طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵) مربوط به ۱۱ ایستگاه واقع در استان خوزستان در ایران جمع‌آوری شده است. موقعیت استان و ایستگاه‌های مطالعه شده در شکل ۱ مشخص شده‌اند. جدول ۱ نیز مشخصات ایستگاه‌های مطالعه شده را ارائه می‌دهد.

کردند. نتایج روش‌های یادشده با خروجی روش فائو پنمن مانیتیت مقایسه شد و واسنجی روش‌ها برای یکایک ایستگاه‌ها و تمام ماه‌ها طی دوره انجام شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد از بین روش‌های مبتنی بر دما، روش هارگریوز، از بین روش‌های کلی تابش، روش دورنباس و پروت و از بین روش‌های بر مبنای انتقال جرم، روش میر به عنوان بهترین روش‌ها شناخته شدند [۱۲]. قمرنیا و نیازی (۲۰۱۸) با ارزیابی و پهنه‌بندی ET₀ براساس روش‌های مبتنی بر انتقال جرم در اقلیم‌های مختلف ایران و ارائه آن در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از GIS، به این نتیجه رسیدند که برای اقلیم‌های خشک، روش‌های سازمان هواشناسی جهانی و آلبرت؛ نیمه‌خشک، روش‌های مییر و رومانکو؛ مدیترانه‌ای، روش‌های سازمان هواشناسی جهانی و آلبرت؛ نیمه‌مرطوب و مرطوب، روش‌های بروکمب و ونر و پنمن، به ترتیب به‌عنوان مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین روش‌ها انتخاب شدند [۱۳]. ارزیابی ET₀ در هر منطقه و انتخاب بهترین روش‌ها متناسب با هر اقلیم و نوع آب و هوا و توجه به موقعیت جغرافیایی محل، کمک شایانی در بررسی‌ها و تخمین صحیح ET₀ به منظور استفاده بهینه منابع آب می‌کند. بنابراین، مطالعه حاضر با



شکل ۱. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مطالعه شده در استان خوزستان

استفاده شد. با توجه به اینکه تعداد اندکی از داده‌های یادشده ناقص بودند (داده‌های گمشده)، برای تخمین آنها روش‌های مناسب بازسازی به کار برده شده و قبل از استفاده از نظر کیفیت کنترل شدند. سپس، از روش فائو پنمن مانیتیت (PMF-56) به عنوان روش مبنای مقایسه نتایج استفاده شد تا بهترین روش برای هر ایستگاه تعیین شود. شش روش تخمین ETO مبتنی بر دمای هوا در جدول ۲ ارائه شده است.

داده‌های استفاده شده در تحقیق حاضر شامل حداکثر، حداقل و میانگین دما، دمای نقطه شبنم، میانگین، ماکزیمم و مینیمم رطوبت نسبی، سرعت باد، تعداد و حداکثر ساعت‌های آفتابی و بارش، در مقیاس ماهانه است که از اداره کل هواشناسی استان خوزستان دریافت شده و برای ارزیابی ۲۴ روش متداول تخمین ETO شامل شش روش مبتنی بر دما، نه روش مبتنی بر تابش و نه روش مبتنی بر انتقال جرم

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مطالعه شده واقع در استان خوزستان

نام ایستگاه	طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی		ارتفاع از سطح دریا (متر)	میانگین بارش سالانه (میلی‌متر)	ضریب دومارتن	دوره آماری
	درجه	دقیقه	درجه	دقیقه				
آبادان	۴۸	۱۵	۳۰	۲۲	۶/۶	۱۶۹/۸	۴/۶	۲۰۰۵-۱۹۹۶
اهواز	۴۸	۴۰	۳۱	۲۰	۲۲/۵	۲۴۶/۹	۵/۶	۲۰۰۵-۱۹۹۶
امیدیه	۴۹	۳۹	۳۰	۴۶	۳۴/۹	۲۶۳/۱	۷/۳	۲۰۰۵-۱۹۹۶
ایذه	۴۹	۵۲	۳۱	۵۱	۷۶۷	۶۸۶/۳	۲۲	۲۰۰۵-۱۹۹۶
بستان	۴۸	۰	۳۱	۴۳	۷/۸	۲۰۵/۶	۵/۹	۲۰۰۵-۱۹۹۶
بندر ماهشهر	۴۹	۹	۳۰	۳۳	۶/۲	۲۱۳/۲	۵/۹	۲۰۰۵-۱۹۹۶
بهبهان	۵۰	۱۴	۳۰	۳۶	۳۱۳	۳۵۸/۴	۱۰/۳	۲۰۰۵-۱۹۹۶
دزفول	۴۸	۲۳	۳۲	۲۴	۱۴۳	۴۴۷/۱	۱۲/۹	۲۰۰۵-۱۹۹۶
رامهرمز	۴۹	۳۶	۳۱	۱۶	۱۵۰/۵	۳۳۴/۵	۹/۲	۲۰۰۵-۱۹۹۶
شوشتر	۴۸	۵۰	۳۲	۳	۶۷	۳۱۲/۱	۸/۵	۲۰۰۵-۱۹۹۶
مسجدسلیمان	۴۹	۱۷	۳۱	۵۶	۳۲۰/۵	۴۳۳/۴	۱۲/۱۷	۲۰۰۵-۱۹۹۶

جدول ۲. شش روش انتخاب شده برای تخمین ETO بر مبنای دمای هوا

مدل	معادله	منبع	پارامتر وابسته
تورنت وایت	$ET0 = 16 \left(10 \frac{T_a}{I} \right)^i$ $I = \sum_{n=1}^{12} (0.2 T_a)^{1.514}$ $i = 6.75 * 10^{-7} I^3 - 7.71 * 10^{-5} I^2 + 1.7912 * 10^{-2} I + 0.49239$	[۱۶] تورنت وایت (۱۹۴۸)	T, ϕ
اسچندل	$ET0 = 16 * \frac{T_a}{RH}$	[۱۷] اسچندل (۱۹۶۷)	T, RH
هارگریوز سامانی	$ET0 = 0.408 * 0.0025 * (T_a + 16.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} * R_a$	[۱۸] هارگریوز و سامانی (۱۹۸۵)	T, u, Tmin, Tmax, RH, n, ϕ
بلانی کریدل	$ET0 = a + b [P(0.46 T_a + 8.13)]$	[۱۹] بلانی و کریدل (۱۹۵۰)	T, n, RHmin, ϕ , u
تراجکویک	$ET0 = 0.408 * 0.0023 * (T_a + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.424} * R_a$	[۲۰] تراجکویک (۲۰۰۷)	T, u, Tmin, Tmax, RH, n, ϕ
لیناکر	$ET0 = \frac{500(T_a + 0.006z) + 15(T_a - T_d)}{80 - T_a}$	[۲۱] لیناکر (۱۹۷۷)	T, Td, Z, L

معادله مک گینس بودن، برحسب (cm/day) است. T_d, T_a ، T_{min} و T_{max} به ترتیب دمای میانگین ماهانه، دمای نقطه شبنم، دمای حداکثر و دمای حداقل (°C)، RH، میانگین رطوبت نسبی (%)، R_s تابش خورشیدی (MJ/m²/day) ارتفاع از سطح دریا (m)، L عرض جغرافیایی برحسب درجه، $K \cdot a \cdot \alpha \cdot b$ ضرایب تجربی، u سرعت باد در ارتفاع دومتری (m/s)، n ساعات‌های واقعی آفتاب (hr)، φ عرض جغرافیایی (rad) R_n تابش خالص خورشیدی (MJ/m²/day) G جریان حرارتی خاک (MJ/m²/day) γ ثابت سایکرومتری (kPa/°C) e_{smax} و e_{smin} به ترتیب حداکثر و حداقل فشار بخار اشباع (kPa) Δ شیب فشار بخار اشباع (kPa/°C) λ ضریب گرمای نهان تبخیر (MJ/Kg) P فشار بخار (kPa) هستند، R_{ns} و R_{nl} به ترتیب تابش خالص خورشیدی با طول موج بلند و طول موج کوتاه (MJ/m²/day) هستند.

در جدول ۲، ET₀ تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب (mm/day)، در همه معادله‌ها به جز معادله تورنت وایت، برحسب (mm/month) است. $T_{min}, T_{max}, T_d, T_a$ ، به ترتیب دمای میانگین ماهانه، دمای نقطه شبنم، دمای حداکثر و دمای حداقل (°C)، RH، میانگین رطوبت نسبی (%)، R_a تابش برون زمینی (MJ/m²/day) Z ارتفاع محل (m)، L عرض جغرافیایی برحسب درجه، $b \cdot a \cdot \alpha \cdot I$ ضرایب تجربی است. درخور یادآوری است که a و b معادلاتی دارند که توسط دورنباس و پروت (۱۹۷۷) ارائه شد [۳۰]، P ضریب مربوط به طول روز، u سرعت باد در ارتفاع دومتری (m/s)، n ساعات‌های واقعی آفتاب (hr)، φ عرض جغرافیایی (rad) هستند. در جدول ۳ نه روش تخمین ET₀ مبتنی بر تابش خورشید ارائه شده است و نیز ET₀ تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب (mm/day) در همه معادله‌ها غیر از

جدول ۳. نه روش انتخاب شده برای تخمین ET₀ بر مبنای تابش خورشیدی

مدل	معادله	منبع	پارامتر وابسته
تورک	$ET_0 = 0.013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50)$ for RH \geq 50 $ET_0 = 0.013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50) \left(1 + \frac{50-RH}{70} \right)$ for RH < 50	[۲۲] تورک (۱۹۶۱)	T, u, T _{min} , T _{max} , RH, n, φ
پریستلی تیلور	$ET_0 = \frac{\alpha}{\lambda} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$	[۲۳] پریستلی و تیلور (۱۹۷۲)	RH, T, P, h, u, R _{nl} , R _{ns}
مک کینگ	$ET_0 = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{58.5} - 0.012$	[۲۴] مک کینگ (۱۹۵۷)	T, P, h, u, T _{min} , T _{max} , n, φ
جنسن هیز	$ET_0 = C_T (T - T_x) R_s$ $C_T = \frac{1}{45 - \left(\frac{h}{137} \right) + \left(\frac{365}{e_{s,max} - e_{s,min}} \right)}$ $T_x = -2.5 - 0.14(e_{s,max} - e_{s,min}) - \frac{h}{500}$	[۲۵] جنسن هیز (۱۹۶۳)	T, u, T _{min} , T _{max} , n, φ , h
مک گینس بودن	$ET_0 = \{ (0.0082T - 0.19) (R_s / 1500) \} 2.54$	[۲۶] مک گینس و بودن (۱۹۷۲)	T, u, T _{min} , T _{max} , n, φ
جونز و ریچ	$ET_0 = \alpha [3.87 * 10^{-3} * R_s (0.6T_{max} + 0.4T_{min} + 29)]$ 5 < T _{max} < 35 °C $\alpha = 1.1$ T _{max} > 35 °C $\alpha = 1.1 + 0.05 * (T_{max} - 35)$ T _{max} < 5 °C $\alpha = 0.1 \exp[0.18(T_{max} + 20)]$	[۲۷] جونز و ریچ (۱۹۹۰)	u, T _{min} , T _{max} , n, φ
ایرماک	$ET_0 = -0.611 + 0.149 * R_s + 0.079 * T_a$	[۲۸] ایرماک (۲۰۰۳)	T, u, T _{min} , T _{max} , n, φ
آبتیو	$ET_0 = K \frac{R_s}{\lambda}$	[۲۹] آبتیو (۱۹۹۶)	u, T _{min} , T _{max} , n, φ
دورنباس و پروت	$ET_0 = a \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right) + b$	[۳۰] دورنباس و پروت (۱۹۷۷)	RH, U, T, P, h, u, T _{min} , T _{max} , n, φ

جدول ۴. نه روش انتخاب شده برای تخمین ET0 بر مبنای انتقال جرم

مدل	معادله	منبع	پارامتر
دالتون	$ET_0=(0.3648+0.07223u)(e_s - e_a)$	[۳۱] دالتون (۱۸۰۲)	T, Tmin, Tmax, RH, u
ترابرت	$ET_0=0.3075\sqrt{u}(e_s - e_a)$	[۳۲] ترابرت (۱۸۹۶)	T, Tmin, Tmax, RH, u
میر	$ET_0=(0.375+0.05026u)(e_s - e_a)$	[۳۳] میر (۱۹۲۶)	T, Tmin, Tmax, RH, u
روهور	$ET_0=0.44(1+0.27u)(e_s - e_a)$	[۳۴] روهور (۱۹۳۱)	T, Tmin, Tmax, RH, u
پنمن	$ET_0=0.35(1+0.98/100u)(e_s - e_a)$	[۳۵] پنمن (۱۹۴۸)	T, Tmin, Tmax, RH, u
آلبرتج	$ET_0=(0.1005+0.297u)(e_s - e_a)$	[۳۶] آلبرتج (۱۹۵۰)	T, Tmin, Tmax, RH, u
ماهرینگر	$ET_0=0.15072\sqrt{3.6u}(e_s - e_a)$	[۳۷] ماهرینگر (۱۹۷۰)	T, Tmin, Tmax, RH, u
بروکمپ وینر	$ET_0=0.543u^{0.456}(e_s - e_a)$	[۳۸] بروکمپ وینر (۱۹۶۳)	T, Tmin, Tmax, RH, u
سازمان هواشناسی جهانی (WMO) ^۱	$ET_0=(0.1298+0.0934u)(e_s - e_a)$	[۳۹] WMO (۱۹۶۶)	T, Tmin, Tmax, RH, u

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (4)$$

همچنین، در جدول ۴ ET0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب (mm/day) است. T_{min} و T_{max} به ترتیب دمای میانگین ماهانه، دمای حداکثر و دمای حداقل ($^{\circ}C$)، RH میانگین رطوبت نسبی (u ، /)، سرعت باد در ارتفاع دومتری در همه معادلات بر حسب (m/s) غیر از معادله پنمن که برحسب (miles/day) بوده و e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی بر حسب (kPa)، به جز معادلات روهور و پنمن که برحسب mmHg هستند. در صورتی که سرعت باد در ارتفاع دیگری به غیر از دو متر اندازه گیری شده باشد، برای استفاده در فرمول PMF-56 باید آن را به سرعت در ارتفاع دو متر تبدیل کرد، که معادله کلی آن به صورت رابطه ۱ است:

در معادله یادشده U_{2m} معادل سرعت باد در ارتفاع دومتری، U_z سرعت باد در ارتفاع Z متری و Z ارتفاعی است که سرعت باد در آن اندازه گیری می شود [۴۰]. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر از داده های ایستگاه های هواشناسی استفاده شد و در ایستگاه های هواشناسی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری اندازه گیری می شود، بنابراین برای تبدیل سرعت به ارتفاع دومتری، از معادله ۱ استفاده شد. در تحقیق حاضر بهترین روش برای منطقه مطالعه شده با استفاده از شاخص های آماری ضریب تعیین (R^2)، ضریب میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) بر حسب mm/day و درصد انحراف (PBIAS) معین شد (روابط ۲-۴):

$$U_{2m} = U_z \left[\frac{2}{Z} \right]^{0.2} \quad (1)$$

نتایج و بحث

اقليم بیشتر ایستگاه های مطالعاتی براساس تقسیم بندی دومارتن خشک و متوسط بارندگی در این ایستگاه ها ۳۳۳ میلی متر است، بنابراین برای تأمین نیاز آبی گیاه باید آبیاری صورت گیرد و مشخص کردن بهترین روش محاسبه

1. World Meteorology Organization

روش تورنت وایت که تنها فاکتور ورودی آن دماست. از آنجا که دو روش هارگریوز سامانی و بلانی کریدل برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه شده‌اند و ایستگاه‌های مطالعاتی نیز دارای اقلیمی خشک هستند، بنابراین دقت زیادی داشتند. همچنین، این دو روش وابسته به پارامترهای بیشتری، شامل سرعت باد، رطوبت نسبی، ساعت‌های واقعی آفتاب، عرض جغرافیایی و پارامترهای دمایی، نسبت به سایر روش‌ها هستند. با توجه به شاخص آماری درصد انحراف (PBIAS)، روش‌های اسپندل و لیناکر بیش‌برآوردی و سایر روش‌ها در مقایسه با روش فائو پنمن مانیتیت کم‌برآوردی داشتند.

جدول ۷ نتایج مقایسه روش‌های تخمین ETO مبتنی بر روش‌های دمایی به صورت فصلی در ایستگاه‌های یادشده را نشان می‌دهد. با توجه به شاخص‌های آماری نتایج در فصول مختلف، متفاوت بود. روش‌های تخمین میزان ETO برای فصول بهار و پاییز عملکرد بیشتری داشتند، در فصل بهار روش اسپندل با $R^2 = 0.94$ و در فصل پاییز روش تورنت وایت با $R^2 = 0.90$ عملکرد بهتری داشتند، در حالی که دقت روش‌های بررسی‌شده در فصل تابستان کمتر از سایر فصول بود، به‌طوری که روش‌های لیناکر و تراجکویک، کمترین میزان ضریب تعیین، ($R^2 = 0.09$) را نشان دادند. با توجه به معیار میانگین مجذور مربعات خطا، کمترین مقادیر RMSE مربوط به فصل زمستان و روش تراجکویک برابر با 0.5 میلی‌متر بر روز و بیشترین آن مربوط به فصل تابستان و روش هارگریوز سامانی برابر $15/2$ میلی‌متر بر روز است. نتایج در هر فصل با توجه به شرایط آب و هوایی و دمای هر فصل متفاوت بود. با توجه به شاخص آماری درصد انحراف (PBIAS)، روش‌های اسپندل و لیناکر در همه فصول بیش‌برآوردی و سایر روش‌ها در مقایسه با روش فائو پنمن مانیتیت کم‌برآوردی داشتند. درخور یادآوری است روش‌های تورنت وایت و هارگریوز سامانی به ترتیب با مقادیر -0.4 و -0.2 در فصل زمستان نیز بیش‌برآوردی داشتند.

ETO در هر ایستگاه می‌تواند کمک شایانی به این امر کند. جدول ۵، مجموع مقادیر ETO به‌دست‌آمده از روش فائو پنمن مانیتیت را به طور سالانه و فصلی نشان می‌دهد. بیشترین ETO مربوط به فصل تابستان، به مقدار $1047/4$ میلی‌متر و کمترین مقدار مربوط به فصل زمستان به میزان $170/9$ میلی‌متر است که در این باره می‌توان به اختلاف متوسط دمای هوا در این دو فصل، به‌خصوص دمای زیاد منطقه مطالعاتی در تابستان اشاره کرد.

جدول ۵. مجموع ETO سالانه و فصلی محاسبه‌شده با روش فائو پنمن مانیتیت در منطقه مطالعه‌شده

ETO(mm)				
زمستان	پاییز	تابستان	بهار	سالانه
۱۷۱	۵۱۶	۱۰۴۷	۵۸۷	۲۳۲۲

نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه روش‌های مبتنی بر دمای هوا جدول ۶ نتایج مقایسه روش‌های تخمین ETO مبتنی بر روش‌های دمایی در ایستگاه‌های مطالعاتی استان خوزستان را با روش فائو پنمن مانیتیت در مقیاس سالانه نشان می‌دهد. با توجه به شاخص‌های آماری، نتایج در تمامی شهرستان‌ها بسیار نزدیک به روش فائو پنمن مانیتیت است. بر این اساس، روش‌های بلانی کریدل با $R^2 = 0.92$ و $RMSE = 2/9$ mm/day و هارگریوز سامانی با $R^2 = 0.91$ و $RMSE = 2/2$ mm/day بهترین برآورد ETO را نشان دادند. ضمن اینکه روش‌های تراجکویک و لیناکر نیز با توجه به ضریب تبیین بیش از 0.9 عملکرد زیادی در برآورد ETO داشتند و در رتبه‌های بعد قرار گرفتند. یکسان بودن نوع اقلیم و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها دلیلی بر عملکرد خوب روش‌های استفاده‌شده است. روش‌های تورنت وایت و اسپندل، به‌ترتیب با داشتن $R^2 = 0.81$ و $RMSE = 3/2$ mm/day و $R^2 = 0.86$ و $RMSE = 9/1$ mm/day کمترین میزان دقت را در برآورد ETO داشتند. از دلایل این امر به کمبود پارامترهای مرتبط به این دو روش در تخمین ETO می‌توان اشاره کرد، به‌ویژه

جدول ۶. معیارهای آماری تخمین سالیانه ETO مبتنی بر دمای هوا

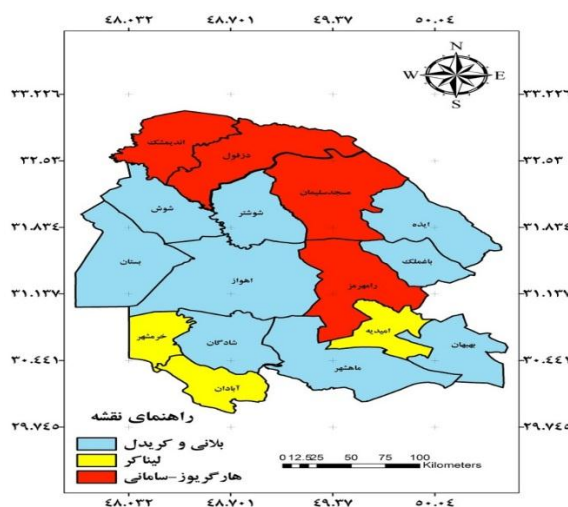
شاخص‌های آماری	تورنت وایت	اسپندل	تراجکویک	لیناکر	هارگریوز سامانی	بلانی کریدل
RMSE (mm/day)	۳/۲	۹/۱	۴	۳	۲/۲	۲/۹
R^2	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۹	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۲
PBIAS	۰/۲۹	-۱/۰۳	۰/۳۵	-۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۰۹

جدول ۷. معیارهای آماری تخمین فصلی ET0 مبتنی بر دمای هوا در منطقه مطالعاتی

فصل	شاخص‌های آماری	بلانی کریدل	هارگریوز سامانی	لیناکر	تراجکویک	اسچندل	تورنت وایت
بهار	RMSE (mm/day)	۳/۴	۶/۸	۱/۷	۲/۶	۲/۲	۱/۸
	R ²	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۲
	PBIAS	۰/۴۷	۰/۱۱	-۰/۷۹	۰/۳۱	-۰/۲۳	۰/۱۰
تابستان	RMSE (mm/day)	۵/۰	۱۵/۲	۳/۵	۵/۱	۴/۸	۳/۵
	R ²	۰/۲۶	۰/۳۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۲۴	۰/۵۵
	PBIAS	۰/۰۱	۰/۲۵	-۱/۲۲	۰/۴۱	-۰/۳	۰/۱۴
پاییز	RMSE (mm/day)	۲/۵	۸/۴	۱/۵	۲/۳	۳/۶	۱/۷
	R ²	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۹
	PBIAS	۰/۲۵	۰/۱۵	-۱/۲۸	۰/۳۴	-۰/۵۸	۰/۰۴
زمستان	RMSE (mm/day)	۱/۶	۱/۸	۰/۵	۰/۵	۱/۳	۰/۵
	R ²	۰/۲۶	۰/۴۹	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۵۸	۰/۸۳
	PBIAS	۰/۷۸	-۰/۲۰	-۰/۷۹	۰/۰۸	-۰/۶۵	-۰/۰۴

براساس نتایج ارزیابی مکانی روش‌های دمایی، نقشه بهترین روش محاسبه ET0 در هر ایستگاه در محیط GIS تهیه شد (شکل ۲). براساس شکل ۲، در نه ایستگاه از ۱۱ ایستگاه استان، روش‌های بلانی کریدل و هارگریوز سامانی که دقت بیشتری داشتند، به‌عنوان بهترین روش‌ها در استان معرفی شدند. برتری روش بلانی کریدل در بیشتر ایستگاه‌ها، شامل شهرستان‌های اهواز، شوشتر، بستان، بندر ماهشهر، بهبهان و ایذه است. روش هارگریوز سامانی در شهرستان‌های دزفول، مسجدسلیمان و رامهرمز و روش لیناکر در شهرستان‌های امیدیه و آبادان برتری درخور توجهی را نشان دادند. همان‌گونه که از شکل پیداست، درصد بیشتری از فضای نقشه را روش‌های بلانی کریدل و هارگریوز سامانی به خود اختصاص داده‌اند، که نشان‌دهنده برتری این روش‌ها در ایستگاه‌های مطالعاتی است.

لانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به این نتیجه رسیدند که از بین روش‌های دمایی، روش تورنت وایت ضعیف‌ترین عملکرد را داشت، همچنین روش هارگریوز سامانی نسبت به روش فائو پنمن مانیتث بیش‌برآوردی و سایر روش‌های دمایی کم‌برآوردی داشته‌اند [۸]. در مطالعه لیو و همکارانش (۲۰۰۵) روش تورنت وایت ضعیف‌ترین عملکرد را از بین روش‌های دمایی در جنوب غرب آمریکا در بر داشت [۱۴]. تبری و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۱ به نتایج مشابهی رسیدند که طبق آن، روش‌های بلانی کریدل و هارگریوز بهترین عملکرد را در مقایسه با روش PMF-56 داشتند [۱۵] و نتایج مربوط به ایکس‌یو و سینگ در سال ۲۰۰۲، بیان‌کننده برتری روش‌های بلانی کریدل و هارگریوز است [۴]، که نتایج همگی این مطالعات، با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد.



شکل ۲. بهترین مدل‌های مربوط به روش‌های مبتنی بر دما در هر ایستگاه

نتایج مقایسه روش‌های مبتنی بر تابش

مقایسه روش‌های تخمین سالانه ET0 مبتنی بر روش‌های تابشی با توجه به رتبه‌بندی شاخص‌های آماری برای استان، در جدول ۸ ارائه شد. نتایج برآوردهای به‌دست‌آمده از روش‌های ET0 در تمامی شهرستان‌ها، به‌دلیل قرارگیری در یک موقعیت مکانی و شرایط آب و هوایی مشابه، همسو با روش فائو پنمن مانیتیت هستند. بر این اساس، روش دورنباس و پروت با $R^2=0/93$ و $RMSE=3$ mm/day در استان بهترین برآورد ET0 را داشت. روش تورک با $R^2=0/82$ و mm/day و $RMSE=2/8$ و روش آبتیو با $R^2=0/83$ و mm/day و $RMSE=3/9$ با اینکه به پارامترهای ورودی درخورد توجهی وابسته‌اند، نتایج رضایت‌بخشی در مقایسه با دیگر روش‌ها نداشتند و کمترین دقت را در برآورد ET0 به خود اختصاص دادند. شاید دلیل این امر مناسب‌بودن عملکرد این روش‌ها در مناطق مرطوب باشد. سایر روش‌ها عملکرد نسبتاً خوبی در تخمین ET0 داشتند. از این نتایج می‌توان پی برد که روش دورنباس و پروت در اقلیم خشک عملکرد بهتری دارد و می‌تواند برای تخمین ET0 در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شود، که دلیل احتمالی عملکرد خوب این روش در ایستگاه‌های مطالعه‌شده است. علاوه بر آن، روش‌های دورنباس و پروت پارامترهای ورودی زیادتری نسبت به بیشتر

روش‌ها داشت که این موضوع را می‌توان در بهبود کارایی روش یادشده عنوان کرد. درخورد یادآوری است، فقط روش جنسن‌هیز نسبت به روش فائو پنمن مانیتیت بیش‌برآوردی داشت و سایر روش‌های تابشی کم‌برآوردی نشان دادند. نتایج ارزیابی فصلی ET0 روش‌های تابشی در منطقه مطالعاتی نیز در جدول ۹ ارائه شده است. براساس نتایج جدول ۹ برآورد روش‌های ET0 در فصول بهار و پاییز دقت زیادی داشتند، در فصل زمستان نتایج درخورد توجه داشتند، ولی در فصل تابستان برآوردها دقت بسیار کمی را نشان دادند. نتایج تغییرات فصلی نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل پرستلی تیلور با ضریب تعیین $0/90$ در بهار، $0/43$ در تابستان، $0/90$ در پاییز و $0/80$ در زمستان بوده است، پس این روش در نتایج فصلی برآورد بهتری داشته است. براساس شاخص $RMSE$ بهترین و بدترین روش‌های تخمین ET0 به‌ترتیب، روش‌های مک‌گینس بورن، جنسن‌هیز، جونز و ریتچ و آبتیو با مقدار $0/6$ میلی‌متر بر روز مربوط به فصل زمستان و روش جونز و ریتچ به میزان $7/8$ میلی‌متر بر روز در فصل تابستان معرفی شدند. ضمن اینکه در همه فصول کمترین مقدار $RMSE$ مربوط به روش مک‌گینس بورن است.

جدول ۸. معیارهای آماری تخمین سالانه ET0 مبتنی بر تابش در منطقه مطالعاتی

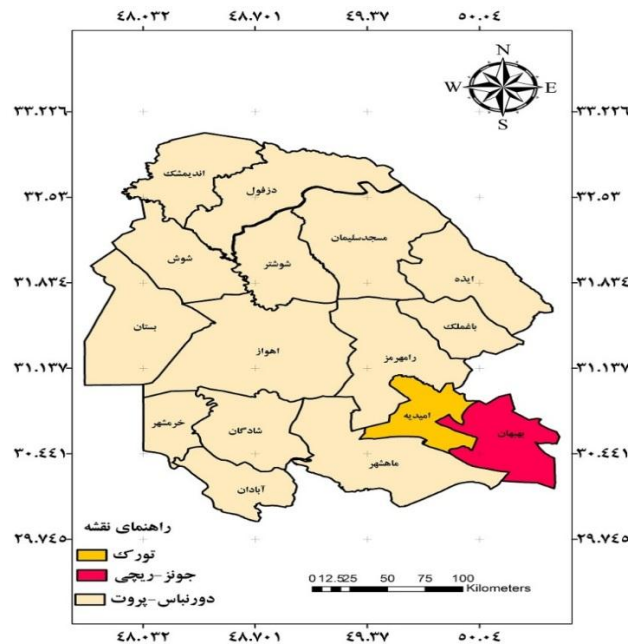
شاخص‌های آماری	دورنباس و پروت	ایرماک	مک‌گینس بورن	جنسن‌هیز	پرستلی تیلور	مک‌کینگ	جونز و ریتچ	آبتیو	تورک
RMSE(mm/day)	۳/۰	۳/۶	۴/۱	۵/۳	۴/۲	۴/۵	۲/۲	۳/۹	۲/۸
R ²	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۸۲
PBIAS	۰/۱۲	۰/۴	۰/۴۹	-۰/۴۴	۰/۵۳	۰/۶۱	۰/۲۲	۰/۴۱	۰/۳

جدول ۹. معیارهای آماری تخمین فصلی ET0 مبتنی بر تابش در منطقه مطالعاتی

فصل	شاخص‌های آماری	دورنباس و پروت	ایرماک	مک‌گینس بورن	جونز و ریتچ	پرستلی تیلور	مک‌کینگ	جونز و ریتچ	آبتیو	تورک
بهار	RMSE (mm/day)	۳/۹	۳/۶	۲/۴	۳/۲	۲/۶	۳/۹	۴/۴	۲/۵	۳/۳
	R ²	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۹۰	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۸۷	۰/۷۰
	PBIAS	-۰/۳۴	۰/۴۸	۰/۲۶	۰/۳۷	۰/۳۶	۰/۱۰	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۲۷
تابستان	RMSE (mm/day)	۶/۷	۵/۹	۳/۱	۶/۲	۴/۵	۶/۷	۷/۸	۴/۸	۶/۷
	R ²	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۴۳	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۳۱	۰/۱۴
	PBIAS	-۰/۵۶	۰/۵۱	۰/۱۹	۰/۵۱	۰/۵۶	۰/۱۹	۰/۵۶	۰/۶۷	۰/۳۷
پاییز	RMSE (mm/day)	۴/۵	۳/۰	۱/۷	۲/۴	۲/۳	۳/۲	۳/۷	۲/۰	۲/۸
	R ²	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۹۰	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۱
	PBIAS	-۰/۵۶	۰/۴۵	۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۰۹	۰/۴۹	۰/۵۷	۰/۲۲
زمستان	RMSE (mm/day)	۱/۱	۰/۸	۰/۶	۰/۶	۰/۷	۰/۷	۰/۶	۰/۶	۰/۸
	R ²	۰/۵۶	۰/۶۰	۰/۶۷	۰/۶۲	۰/۸۰	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۶۲
	PBIAS	-۰/۱۸	۰/۳۱	-۰/۱۵	-۰/۱۷	-۰/۳۶	-۰/۱۵	۰/۳۱	۰/۲۵	-۰/۱۱

براساس نتایج به دست آمده از تخمین ETO با استفاده از روش دورنباس و پروت و مطابقت آن با روش فائو پنمن مانتیث، می توان پی برد که روش دورنباس و پروت از گروه تابشی کارایی زیادی دارد. همچنین، نتایج تحقیق بابامیری و دین پژوه در سال ۲۰۱۶ در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه نشان داد روش دورنباس و پروت به عنوان بهترین روش از گروه تابشی است. نتایج پژوهش یادشده مؤید نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر است [۱۲]. در حالی که لانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ دریافتند روش مک کینگ بهترین عملکرد را در بین روش های مطالعه شده در جنوب غرب چین داشت [۸]. لیو و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۵ گزارش کردند که روش مک کینگ عملکرد ضعیفی در برآورد ETO در جنوب غرب آمریکا داشت. همچنین، به این نتیجه رسیدند که روش های پریستلی تیلور و آبتیو بیش برآوردی و سایر روش های تابشی، کم برآوردی نشان دادند [۱۴]، در صورتی که در پژوهش حاضر، فقط روش جنسن هیز نسبت به روش فائو پنمن مانتیث بیش برآوردی داشت و سایر روش های تابشی کم برآوردی نشان دادند، که متفاوت بودن نوع اقلیم و موقعیت جغرافیایی منطقه می تواند دلیل احتمالی این تفاوت باشد.

از این نتایج می توان پی برد که روش های دورنباس و پروت و پریستلی تیلور در اقلیم خشک عملکرد بهتری دارند و می توانند برای تخمین ETO در مناطق خشک و نیمه خشک استفاده شوند، که دلیل احتمالی عملکرد خوب این روش ها در ایستگاه های مطالعه شده است. علاوه بر آن، روش های دورنباس و پروت و پریستلی تیلور پارامترهای ورودی بیشتری نسبت به سایر روش ها دارند که از این موضوع نیز نمی توان در بهبود کارایی مدل یادشده چشم پوشی کرد. در ارزیابی میزان بیش برآوردی و کم برآوردی فصلی، روش دورنباس و پروت در همه فصول بیش برآوردی داشت، در بین سایر روش ها، دورنباس و پروت با مقدار ۰/۱۸، مک گینس بوردن با مقدار ۰/۱۵، جنسن هیز به میزان ۰/۱۷، پریستلی تیلور، ۰/۳۶ و مک کینگ و تورک به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۱۱ در فصل زمستان بیش برآوردی نشان دادند. دیگر روش ها در تخمین ETO کم برآوردی داشتند. شکل ۳ نیز نقشه تغییرات مکانی بهترین روش های انتخابی برای هر یک از ایستگاه ها براساس روش های تابشی را نشان می دهد و بیان کننده عملکرد بسیار خوب روش دورنباس و پروت در تمامی شهرستان ها به جز بهبهان و امیدیه است. روش تورک در شهرستان امیدیه، اهواز و مسجد سلیمان، روش جونز و ریتچ در شهرستان بهبهان و جنسن هیز در شهرستان بستان در رتبه های بعد قرار گرفتند.



شکل ۳. بهترین مدل های مربوط به روش های مبتنی بر تابش در هر ایستگاه

اختلاف اندک از یکدیگر، در هریک از ایستگاه‌های مطالعاتی داشتند. از دلایل احتمالی این امر، شرایط آب و هوایی مشابه، برابری جغرافیای محل و همچنین یکسان بودن پارامترهای ورودی در تمامی روش‌های مطالعه شده است. در تعیین میزان بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی با استفاده از درصد انحراف (PBIAS)، همه روش‌های مبتنی بر انتقال جرم بررسی شده، بیش‌برآوردی را نشان دادند.

جدول ۱۱ نیز مقایسه بهترین روش‌های تخمین ET0 در هر ایستگاه، در مقیاس فصلی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شاخص‌های آماری، در این مورد نیز برآورد روش‌ها بسیار نزدیک به روش فائو پنمن مانیتث بوده و در بیشتر حالات ضریب تعیین بیش از ۹۰ درصد است که برآورد خوب روش‌های انتقال جرم در منطقه در مقیاس فصلی را نشان می‌دهد.

نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه روش‌های مبتنی بر انتقال جرم با توجه به نتایج شاخص‌های آماری، برآورد روش‌های ET0 در تمامی شهرستان‌ها بسیار نزدیک به روش فائو پنمن مانیتث بوده و در بیشتر حالات ضریب تعیین بیش از ۹۰ درصد است، که برآورد خوب روش‌های انتقال جرم در استان را نشان می‌دهد. بر این اساس، جدول ۱۰ به مقایسه بهترین روش‌های تخمین سالیانه ET0 با استفاده از روش‌های انتقال جرم و مقایسه آنها با روش PMF-56 در هر ایستگاه می‌پردازد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، مدل سازمان هواشناسی جهانی (WMO) با $R^2=0/97$ و mm/day $RMSE=5$ بهترین برآورد ET0 را نشان داد. درخور یادآوری است روش پنمن با $R^2=0/87$ و mm/day $RMSE=4/5$ کمترین میزان دقت را در تخمین ET0 به خود اختصاص داد. سایر روش‌ها نیز عملکرد خوب و رضایت‌بخش و با

جدول ۱۰. معیارهای آماری تخمین سالیانه ET0 مبتنی بر انتقال جرم در منطقه مطالعاتی

پنمن	بروکمپ وینر	میر	آلبرتیج	روهور	دالتون	ماهرینگر	تراپرت	سازمان هواشناسی جهانی	شاخص‌های آماری
۴/۵	۱۶/۸	۹/۲	۲۲/۲	۱۰/۵	۱۰/۲	۱۵/۶	۸/۲	۵/۰	RMSE(mm/day)
۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	R ²
-۰/۲۵	-۲/۱۸	-۱/۱	-۲/۷۶	-۱/۳۳	-۱/۳	-۱/۸۶	-۱/۰۱	-۰/۵۷	PBIAS

جدول ۱۱. معیارهای آماری تخمین فصلی ET0 مبتنی بر انتقال جرم در منطقه مطالعاتی

پنمن	بروکمپ وینر	میر	آلبرتیج	روهور	دالتون	ماهرینگر	تراپرت	سازمان هواشناسی جهانی	مدل	فصل
۶/۲	۳/۷	۱۴/۶	۱۸/۶	۳/۹	۸/۳	۷/۲	۶/۴	۸/۰	RMSE (mm/day)	بهار
۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۹۸	۰/۹۷	R ²	
-۰/۱۱	-۱/۰۵	-۱/۹۵	-۰/۳۹	-۱/۸۱	-۲/۳۵	-۰/۸۴	-۰/۷۸	-۱/۰۲	PBIAS	
۱۳/۲	۹/۳	۳۱/۳	۳۹/۴	۶/۳	۱۸/۸	۱۶/۷	۱۴/۹	۱۸/۴	RMSE (mm/day)	تابستان
۰/۷۶	۰/۸۷	۰/۷۵	۰/۸۸	۰/۳۷	۰/۸۱	۰/۶۴	۰/۸۴	۰/۷۸	R ²	
-۰/۴۲	-۱/۶۰	-۲/۰۹	-۰/۷۷	-۲/۵۸	-۳/۲۸	-۱/۳۳	-۱/۲۶	-۱/۵۶	PBIAS	
۳/۲	۲/۳	۲/۸	۲/۴	۱/۹	۳/۷	۱/۷	۳/۰	۴/۵	RMSE (mm/day)	پاییز
۰/۸۲	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۸۵	R ²	
۰/۲۲	۰/۵۷	۰/۴۹	۰/۰۹	۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۲۰	۰/۴۵	-۰/۵۶	PBIAS	
۴/۰	۰/۴	۲/۰	۲/۰	۰/۹	۱/۰	۰/۷	۰/۵	۱/۰	RMSE (mm/day)	زمستان
۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۸۶	۰/۹۲	۰/۶۴	۰/۸۴	۰/۷۵	۰/۹۱	۰/۸۱	R ²	
۰/۰۶	-۰/۴۴	-۱/۹۱	۰/۱۲	-۰/۹۳	-۰/۹۰	-۰/۳۶	-۰/۱۸	-۰/۴۶	PBIAS	

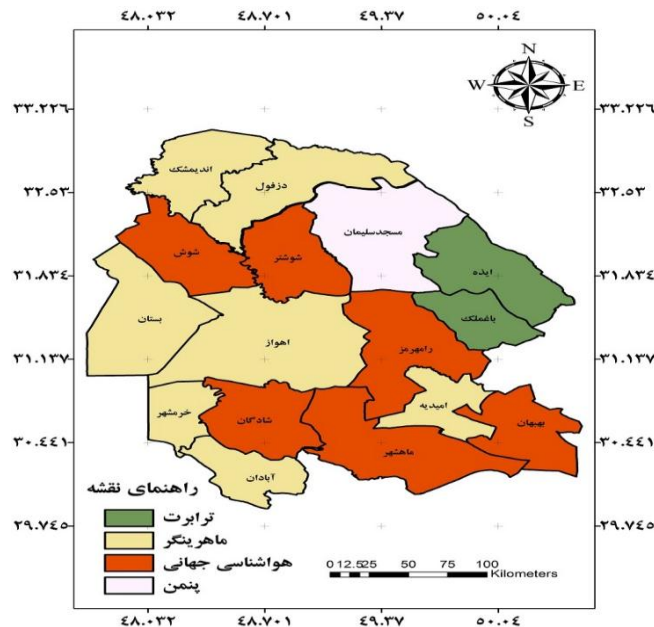
آلبرتیج برابر با ۳۹/۴ میلی‌متر بر روز در فصل تابستان نیز بوده است. در نهایت، فصل تابستان در روش‌های انتقال جرم نیز ضعیف‌ترین برآوردها را داشته است. کمترین میزان RMSE نیز مربوط به روش بروکمپ و وینر برابر با ۰/۴ میلی‌متر بر روز در فصل زمستان است. در تعیین میزان بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی با استفاده از درصد

در ارزیابی نتایج فصلی، کمترین میزان برآورد ET0 مربوط به روش روهور برابر با ضریب تعیین ۰/۲۷ در تابستان است. در فصل بهار نیز همه روش‌ها ضریب تعیین بیش از ۰/۹۰ درصد دارند که دقت زیاد روش‌ها در فصل بهار را نشان می‌دهند. در فصول دیگر نیز روش‌ها دقت زیادی داشتند. بیشترین میزان RMSE مربوط به روش

از فضای نقشه را دربرمی‌گیرد. بر این اساس، روش ماهرینگر در شهرستان‌های دزفول، بستان، اهواز، امیدیه و آبادان در رتبه نخست، سپس روش WMO در شهرستان‌های شوشتر، رامهرمز، بندرماهشهر و بهبهان، روش پنمن در شهرستان مسجدسلیمان و روش تراپرت در شهرستان ایذه در رتبه‌های بعد قرار می‌گیرند. این در حالی است که نتایج مطالعه دامانا و همکارانش (۲۰۱۵)، عملکرد خوب روش‌های ماهرینگر و تراپرت بود [۱]. همچنین، مطالعات ولی‌پور (۲۰۱۷) نشان داد روش پنمن بهتر از سایر روش‌ها به تخمین ET0 در بیشتر استان‌های ایران پرداخته است [۶].

انحراف (PBIAS)، کلیه روش‌های مبتنی بر انتقال جرم بررسی شده در فصول بهار و تابستان و مدل WMO در فصل پاییز، بیش‌برآوردی تخمین کردند و در فصل زمستان روش‌های پنمن و آبرتج به‌ترتیب با درصد انحراف ۰/۰۶ و ۰/۱۲ کم‌برآوردی تخمین کرد.

شکل ۴ نقشه توزیع مکانی بهترین روش انتقال جرم محاسبه ET0 در هر ایستگاه در استان خوزستان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴، در ۱۱ ایستگاه از ۱۱ ایستگاه استان، روش‌های ماهرینگر و WMO به‌عنوان بهترین روش‌ها معرفی شدند که دقت و صحت بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها در هر ایستگاه دارند. روش پنمن درصد کمی



شکل ۴. بهترین مدل‌های مربوط به روش‌های مبتنی بر انتقال جرم در هر ایستگاه

خوب و نزدیک به مدل PMF-56 را نشان دادند و به‌ترتیب و با تفاوتی اندک در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین، در خور یادآوری است که بهترین عملکرد را از بین روش‌های تابشی، دورنباس و پروت در مقیاس سالانه و پریستلی تیلور در مقیاس فصلی داشتند و از بین روش‌های انتقال جرم، روش WMO در بررسی سالانه بیشترین دقت را داشت. نتایج فصلی در هر فصل با توجه به دمای هوا متفاوت گزارش شد، ولی دقت روش‌های بررسی شده در فصل تابستان در کلیه روش‌های مبتنی بر دما، تابش و انتقال جرم کمتر از سایر فصول بود.

نتیجه‌گیری

در انتخاب روش‌های بهینه در تخمین ET0 برای هر منطقه، به شرایط آب و هوایی و به‌خصوص نوع اقلیم مناطق باید توجه شود. در مطالعه حاضر با توجه به نتایج ارزیابی روش‌های دمایی، تابشی و انتقال جرم، بهترین روش در استان خوزستان، روش‌های مبتنی بر پارامتر دما مشخص شد و در نهایت بهترین روش تخمین سالانه ET0 از میان روش‌های دمایی در استان خوزستان، روش‌های بلانسی کریدل و هارگریوز سامانی بودند. ضمن اینکه نتایج به‌دست‌آمده از دو روش مبتنی بر تابش و مبتنی بر انتقال جرم نیز عملکرد

منابع

- [1]. Djaman K, Balde AB, Sow A, Muller B, Irmak S, Ndiaye MK, Manneh B, Moukoubi YD, Futakuchi K, Saito K. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. 2015; *Journal of Hydrology: Regional Studies* 139–159.
- [2]. Racz C, Nagy J, Dobos AC. Comparison of several methods for calculation of reference evapotranspiration. 2013; *Acta Silv. Lign. Hung* 9–24.
- [3]. Mattar MA, Alazba AA, Alblewi B, Gharabaghi B, Yassin MA. Evaluating and calibrating reference evapotranspiration models using water balance under hyper-arid environment. 2016; *Water Resour Manage* 30:3745–3767.
- [4]. Xu CY and Singh VP. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. 2002; *Water Resources Management* 16:197–219.
- [5]. Obada E, Alamou, EA, Chabi A, Zandagba J, Afouda A. Trends and changes in recent and future Penman-Monteith potential evapotranspiration in Benin (West Africa), 2017.
- [6]. Valipour M. Calibration of mass transfer-based models to predict reference crop evapotranspiration. 2017; *Appl Water Sci* 7:625–635.
- [7]. Almorox J, Quej VH, Martí P. Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Koppen climate classes. 2015; *Journal of Hydrology* 528 : 514–522.
- [8]. Lang, D, Zheng J, Shi J, Liao F, Ma X, Wang W, Chen X, Zhang M. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in SouthWestern China. 2017; *Water Journal* 1-18.
- [9]. Babamiri O, Dinpazhoh Y, Asadi E. Calibration and Evaluation of Seven Radiation-Based Reference Crop Evapotranspiration Methods at Urmia Lake Basin. 2013; *Journal of Water and Soil Science* 23(4) : 143-158. [In Persian].
- [10]. Babamiri O, Dinpazhoh Y. Comparison of Four Temperature Based Reference Crop Evapotranspiration Estimation Method at Urmia Lake Basin. 2014; *Irrigation Sciences and Engineering (Scientific Agricultural Journal)* 37(1) : 43-54. [In Persian].
- [11]. Babamiri O, Dinpazhoh Y. Comparison and calibration of nine mass transfer-based reference crop evapotranspiration methods at Urmia Lake Basin. 2015; *Journal of Water and Soil Conservation* 21(5) : 135-153. [In Persian].
- [12]. Babamiri O, Dinpazhoh Y. Comparison and evaluation of twenty methods for estimating reference evapotranspiration based on three general categories, Air Temperature, Solar Radiation and Mass Transfer in the Basin of Lake Urmia. 2016; *Journal of Soil and Water Sciences, Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 20 (77): 145-161. [In Persian].
- [13]. Ghamarnia H, Niazi Z. Evaluation and comparison of different methods of reference evapotranspiration based on mass transmission methods in Iran and its zoning by using GIS. 2018; *Iran-Water Resources* 14 (3): 318-338. [In Persian].
- [14]. Lu J, Sun G, McNulty SG, Amatya DM. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern united states. 2005; *Journal of the American Water Resources Association* 41: 621–633.
- [15]. Tabari H, Grismer ME, Trajkovic S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. 2011; *Irrigation Science*. ISSN 0342-7188.
- [16]. Thornthwaite CW. An approach toward a rational classification of climate. 1948; *Geogr Rev* 38:55–94.
- [17]. Schendel U. Vegetationswasserverbrauch und -wasserbedarf. Habilitation, 1967; Kiel, p 137.
- [18]. Hargreaves GL, Samani ZA. Reference crop evapotranspiration from temperature. 1985; *Appl Eng Agric* 1(2):96–99.
- [19]. Blaney HF, Criddle WD. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Soil conservation service technical paper 96, 1950; Soil conservation service. US Department of Agriculture, Washington.
- [20]. Trajkovic S. Hargreaves versus Penman–Monteith under humid condition. 2007; *J Irrig Drain Eng ASCE* 133:38–42.
- [21]. Linacre ET. A simple formula for estimating evapotranspiration rate in various climates using temperature data alone. 1977; *Agr. Mete* 18: 409-424.
- [22]. Turc L. Evaluation des besoins en eau irrigation, l'évapotranspiration potentielle. 1961; *Ann Agron* 12:13–49.
- [23]. Priestley CHB, Taylor RJ. On the assessment of surface heat flux and evapotranspiration using

- large scale parameters. 1972; Mon Weather Rev 100:81-92.
- [24].Makkink GF. Testing the penman formula by means of lysimeters. 1957; J Inst Water Eng 11:277-288.
- [25].Jensen ME, Haise HR. Estimation of evapotranspiration from solar radiation. 1963; J Irrig Drain Div 89:15-41.
- [26].McGuinness JL, Bordne EF. A comparison of lysimeterderived potential evapotranspiration with computed values. Technical Bulletin. 1972; Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Washington, DC.
- [27].Jones JW, Ritchie JT. Crop growth models. 1990; Management of farm irrigation systems. In: Hoffman GJ, Howel TA, Solomon KH (eds), ASAE Monograph No. 9, ASAE, St. Joseph, Mich. pp. 63-89.
- [28].Irmak SA, Allen RG, Jones JW. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. 2003; J Irrig Drain Eng ASCE 129(5):336-347.
- [29].Abteu W. Evapotranspiration measurement and modeling for three wetland systems in South Florida. 1996; WaterResources Bulletin 32: 465-472.
- [30].Doorenbos J, Pruitt W O. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. 1977; Paper no. 24 (rev.). FAO, Rome.
- [31].Dalton J. Experimental essays on the constitution of mixed gases on the force of steam of vapor from waters and other liquids in different temperatures, both in a torricellian vacuum and in air on evaporation and on the expansion of gases by heat. 1802; Mem Manch Lit Philos Soc 5:535-602.
- [32].Trabert W. Neue beobachtungen uber verdampfungsgeschwindigkeiten. 1896; Meteorol Z 13:261-263.
- [33].Meyer A. Uber einige zusammenhange zwischen Klima und Boden in Europa. 1926; Chemie der Erde 2:209-347.
- [34].Rohwer C. Evaporation from free water surface. 1931; USDA Tech Null 217:1-96.
- [35].Penman HC. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. 1948; Proc R Soc Lond Ser A 193:120-145.
- [36].Albrecht, F. Diemethoden zur bestimmung verdunstung dernaturlichen erdoberflache. 1950; Arch Meteor Geoph Biokl Ser B2:1-38.
- [37].Mahringer W. Verdunstungsstudien am neusiedler see. 1970; Arch Met Geoph Biokl Ser B 18:1-20.
- [38].Brockamp B, Wenner H. Verdunstungsmessungen auf den steiner see bei munster. 1963; Dt Gewasserkundl Mitt 7:149-154.
- [39].Wmo Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. 1966; Tech Pap. (CIMO-Rep) 83. Genf.
- [40]. Alizadeh A. Design of surface irrigation systems. 6nd ed. Mashhad: Astane Ghods Razavi Press; 2015. [In Persian].