پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

ارزیابی مدل‌های پیشنهادیFAO برای برآورد تبخیر–تعرق گیاه مرجع در آبخیز حاجی‌آباد هرمزگان

ابوالفتح مرادی*

استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

چکیده‌ی مبسوط

مقدمه و هدف

در چند سال اخیر بروز خشکسالی‌ها موجب‌شده است تا منابع آب در دسترس دشت‌ها و آبخیزهای جنوبی کشور، به‌ویژه آبخیزهای استان هرمزگان، به‌طور فزاینده‌ای کاهش یابد و افزون‌بر تغییر بوم‌شناسی (زیست بوم) آن‌ها، امنیت غذایی کشور را با خطر جدی مواجه نماید. هم زمان با تلاش برای یافتن منابع آب جدید، اصولی‌ترین راه مقابله با کمبود آب، استفاده‌ی مناسب و مؤثر از منابع آب موجود است که به نوبه ی خود مستلزم آگاهی از تبخیر-تعرق یا نیاز آبی گیاهان است. تبخیر-تعرق گیاهان معمولاً به دو روش مستقیم و غیرمستقیم محاسبه می شود. در روش غیرمستقیم تبخیر-تعرق گیاه مرجع ETo که بیانگر اثر آب و هوا بر تبخیر-تعرق است با استفاده از مدل‌هایی که از یک یا چند ویژگی آب و هوایی استفاده می‌کنند تخمین‌زده می‌شود، سپس ETo در ضریبی به‌نام ضریب گیاهی که منعکس‌کننده‌ی ویژگی‌های گیاه است ضرب می‌شود تا تبخیر-تعرق به‌دست آید. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان‌دهنده‌ی تفاوت اندازه‌ی دقت و همخوانی مدل‌های برآورد ETo در آبخیزها و مناطق مختلف است. بنابراین، اگر از هر یک از این مدل‌ها بدون ارزیابی اندازه‌ی هم‌سنجی و دقت آن‌ها در هر آبخیز استفاده شود امکان بروز خطا در برآورد اندازه‌ی ETo و به دنبال آن نیاز آبی گیاهان افزایش می‌یابد که این امر هرگونه برنامه‌ریزی برای آینده‌ی آبخیز را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین، هدف این پژوهش ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های پیشنهادی FAO در آبخیز حاجی‌آباد هرمزگان می‌باشد.

نوع مقاله: پژوهشی
***مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی:** Ab.moradi@areeo.ac.ir
استناد: مرادی، ا. ۱۴۰۲. ارزیابی مدل‌های پیشنهادیFAO برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در آبخیز حاجی‌آباد هرمزگان. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۶ (۲): ۱۳۳-۱۲۱.
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2022.358978.1477
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۱/۰۳/۱۶، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۳/۳۱، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۲/۰۴/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۲، دوره‌ی۳۶، شماره‌ی ۲، شماره‌ی پیاپی ۱۳۹، تابستان ۱۴۰۲، صفحه‌های۱۲۱ تا ۱۳۳
ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس
© **نویسندگان**

مواد و روش‌ها
این پژوهش به‌مدت چهار سال در آبخیز حاجی‌آباد هرمزگان انجام شد. تبخیر-تعرق گیاه مرجع (چمن) با استفاده از یک دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار به‌طور هفتگی اندازه‌گیری شد. به این منظور، در سال اول آزمایش، در مرکز زمینی به مساحت ۲ هکتار با کاربری کشاورزی که نماینده‌ی این آبخیز بود یک دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار مربع شکل به ابعاد ۳×۳ متر و عمق ۱۹۰سانتی‌متر نصب شد. سپس به مدت سه سال، در پیرامون و درون لایسیمتر با مساحت ۹۰۰ مترمربع، چمن رقم برمودا‌گراس (Cynodon dactylon L.) کشت شد و پس از این‌که پوشش کاملی روی زمین ایجاد شد و بلندی چمن حدود هشت سانتی‌متر شد، تبخیر-تعرق آن به‌طور هفتگی و به‌روش بیلان آبی اندازه‌گیری شد. همچنین تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از مدل‌های پیشنهادشده‌ی فائو شامل پنمن اصلاح‌شده، بلینی-کریدل اصلاح‌شده، تشعشع، تشتک تبخیر و پنمن- مانتیث برآورد شد و با داده‌های اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله‌ی لایسیمتر مقایسه شد و با استفاده از وایازی خطی، درصد خطای برآورد فصلی (سالانه) تبخیر-تعرق و جذر میانگین مربعات خطا، بهترین مدل‌ها برای آبخیز حاجی‌آباد هرمزگان تعیین و پیشنهاد شد.
نتایج و بحث
اندازه‌ی فصلی ETo اندازه‌گیری‌شده با لایسیمتر ۲۷۲۹/۸ میلی‌متر بود. اندازه‌ی ETo برآوردشده با روش مدل‌های پنمن اصلاح‌شده، بلینی-کریدل اصلاح‌شده، پنمن- مانتیث، تشعشع و تشتک تبخیر به‌ترتیب ۳۴۰۵/۰، ۲۶۹۵/۲، ۲۸۶۸/۰، ۲۷۸۹/۲ و ۲۰۵۴/۶ میلی‌متر بود. مقایسه‌ی داده‌های برآوردشده با مدل‌های مزبور با داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی لایسیمتر (۲۷۲۹/۸ میلی‌متر) نشان داد که مدل‌های پنمن اصلاح‌شده، پنمن- مانتیث و تشعشع، اندازه‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجع را به‌ترتیب ۲۴/۷، ۵/۱ و ۲/۲ ٪ بیش از اندازه‌گیری‌های لایسیمتر برآورد کرده‌اند. مدل‌های تشتک تبخیر و بلینی-کریدل اصلاح‌شده اندازه‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجع را به‌ترتیب ۲۴/۷ و ۱/۳ ٪کمتر از اندازه‌گیری‌های لایسیمتر برآورد کرده‌اند. در بیشتر دوره‌ها مقایسه‌ی داده‌های هفتگی نشان داد میانگین روزانه‌ی ETo با استفاده از مدل پنمن اصلاح‌شده و تشتک تبخیر فائو به‌ترتیب بیشتر و کمتر از اندازه‌گیری‌های لایسیمتر برآورد شده‌اند. در دوره‌هایی که اندازه‌های ETo کمتر از ۷ میلی‌متر در روز متر بوده است (بیشتر در فصل‌های پاییز و زمستان)، مدل تشعشع، اندازه‌ی تبخیر-تعرق را بیشتر از اندازه‌گیری‌های لایسیمتر برآورد کرد و در ماه‌های گرم سال که اندازه‌های ETo بیشتر از ۱۰ میلی‌متر در روز متر بوده است (تابستان) تبخیر-تعرق را کمتر از اندازه‌ی واقعی برآورد کرد.
نتیجه‌گیری و پیشنهادها
نتایج این پژوهش نشان داد، مدل‌های بلینی-کریدل و پنمن- مانتیث فائو، به‌ترتیب ETo را با دقت بیشتری برآورد کردند و به‌عنوان مناسب ترین مدل‌ها برای آبخیز حاجی‌آباد و مناطق با شرایط اقلیمی مشابه پیشنهاد شدند. البته مدل بلینی-کریدل در مقایسه با مدل پنمن-مانتیث به اطلاعات و ویژگی‌های اقلیمی کمتری نیاز داشت که در مناطق با داده‌های اقلیمی محدود نیز می‌تواند استفاده شود.

واژگان کلیدی: آبخیز، تبخیر-تعرق گیاه مرجع، حاجی‌آباد، لایسیمتر، مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق

مقدمه

در چند سال اخیر بروز خشکسالی‌ها موجب‌شده است تا منابع آب در دسترس دشت‌ها و آبخیزهای جنوبی کشور، به‌ویژه آبخیزهای استان هرمزگان، به‌طور فزاینده‌ای کاهش یابد و افزون‌بر تغییر بوم‌شناسی (زیست‌بوم) آن‌ها، امنیت غذایی کشور را با خطر جدی مواجه نماید. همزمان با تلاش برای یافتن منابع آب جدید، اصولی‌ترین راه برای مقابله با کمبود آب، استفاده‌ی مناسب و مؤثر از منابع آب موجود است که به نوبه‌ی خود مستلزم آگاهی از تبخیر-تعرق یا نیاز آبی گیاهان است. نیاز آبی گیاه، یعنی اندازه‌ی آب لازم برای جبران آب از دست‌رفته در اثر تبخیر-تعرق از یک گیاه سالم در حال رشد در یک محیط طبیعی است که هیچ‌گونه شرایط محدودکننده مانند کمبود آب و یا حاصلخیزی خاک نباشد (دورنبوس و پروت ۱۹۷۷). در آبخیزهای مختلف آگاهی‌داشتن از اندازه‌ی تبخیر-تعرق یا نیاز آبی گیاهان موجب می‌شود تا بتوان گونه‌های مناسب گیاهی متناسب با شرایط آن آبخیز را به‌نحوی انتخاب کرد که اندازه‌ی تبخیر-تعرق آبخیز به حداقل برسد و در مصرف آب صرفه‌جویی شود. تبخیر-تعرق گیاهان معمولاً به دو روش مستقیم و

غیرمستقیم تعیین می‌شود. در روش مستقیم، در نقاطی از آبخیز جعبه‌های کاشت یا لایسیمتر تعبیه و در درون آن‌ها گیاهی کشت شده و نیاز آبی آن به روش وزنی یا بیلان آبی اندازه‌گیری می‌شود. به‌علت مشکل و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری مستقیم نیاز آبی گیاهان در آبخیزها، معمولاً از روش غیرمستقیم استفاده می‌شود. در این روش که به‌وسیله‌ی سازمان خواربار و کشاورزی جهانی (FAO) (دورنبوس و پروت ۱۹۷۷) پیشنهاد شده است نیاز آبی یا تبخیر-تعرق گیاهان در دو مرحله تعیین می شود. تبخیر-تعرق گیاه مرجع ETo عبارت است از اندازه‌ی تبخیر-تعرق از یک سطح گسترده و پوشیده از چمن سبز با بلندی یکنواخت (۸ تا ۱۵ سانتی‌متر) و رشد فعال که به‌طور کامل روی زمین سایه انداخته و به‌خوبی آبیاری شده و تحت تنش رطوبتی قرار نگرفته باشد (دورنبوس و پروت ۱۹۷۷). در مرحله‌ی اول، اندازه‌ی ETo با استفاده از مدل‌هایی که از یک یا چند ویژگی آب و هوایی (مانند دما، تشعشع خورشیدی، رطوبت‌نسبی هوا، سرعت باد و ...) استفاده می‌کنند، برآورد می‌شود. در مرحله‌ی دوم، ETo برآوردشده را در ضریب گیاهی (Kc) که به نوع و مرحله‌ی رشد گیاه بستگی دارد، ضرب می‌کنند تا نیاز آبی گیاه به‌دست آید. در دهه‌های گذشته، مدل‌های مختلفی برای برآورد ETo پیشنهاد شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان با سهولت بیشتر و صرف وقت و هزینه‌ی کمتر، ETo را در آبخیزها برآورد کرد. از این گروه می‌توان به مدل‌های پیشنهادی سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی (FAO) در سال‌های ۱۹۷۷ (پنمن اصلاح‌شده، بلینی-کریدل اصلاح-شده، تشعشع، تشتک تبخیر) و ۱۹۹۸ (پنمن- مانتیث فائو) اشاره کرد (دورنبوس و پروت ۱۹۷۷؛ آلن و همکاران ۱۹۹۸).

از آنجایی که شرایط اقلیمی هر آبخیز با شرایطی که این مدل‌ها در آن اجرا شده‌اند، ممکن است متفاوت باشد؛ استفاده از آن‌ها بدون آزمون و واسنجی با داده‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری مستقیم با لایسیمتر می‌تواند در هر آبخیز منجر به خطای قابل ملاحظه‌ای در برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع شود. از این‌رو در آبخیزهای مختلف آزمون و واسنجی مدل‌ها قبل از استفاده از هر یک از آنها لازم است. در این راستا در بسیاری از آبخیزها و نقاط مختلف جهان پژوهش‌های زیادی انجام شده است. آلن و همکاران (۱۹۸۹) داده‌های به‌دست آمده‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجع از شکل‌های مختلف معادله‌ی پنمن (پنمن ۱۹۶۳؛ کیمبرلی-پنمن ۱۹۷۲؛ کیمبرلی-پنمن ۱۹۸۲ و پنمن اصلاح‌شده FAO) و پنمن- مانتیث را با داده‌های لایسیمتری مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که معادله‌های پنمن- مانتیث و کیمبرلی-پنمن، به‌ترتیب با داده های اندازه‌گیری‌شده بیشترین همخوانی را داشتند. در استان کرمان ابول‌پور (۱۹۹۶)، هشت مدل مختلف برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع را با داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی لایسیمتر مقایسه کرد و نتیجه گرفت که مدل‌های بلینی- ریدل و جنسن- هیز، به‌ترتیب بیشترین دقت را در برآورد ETo داشتند. در استان گرگان امداد و صباغ‌فرشی (۲۰۰۰)، اندازه‌های برآوردشده‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجع با مدل‌های پنمن- مانتیث، تشتک تبخیر، پنمن اصلاح‌شده و بلینی-کریدل اصلاح‌شده‌ی FAO و هارگریوز و مکینگ را با داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی لایسیمتر مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که مدل‌های پنمن- مانتیث و بلینی- کریدل، با داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی لایسیمتر بیشترین همخوانی را داشتند. یادر و همکاران (۲۰۰۵) اندازه‌های ETo برآوردشده با هشت مدل آب و هوایی را با داده‌های اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله‌ی لایسیمتر مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که مدل پنمن- مانتیث با داده‌های واقعی بیشترین همخوانی را داشت.

در مشهد، اندازه‌های ETo برآوردشده با مدل‌های جنسن- هیز و پنمن- مانتیث فائو با داده‌های لایسیمتری مقایسه شد و گزارش شد که مدل پنمن- مانتیث فائو در مقایسه با مدل جنسن- هیز در برآورد ETo دقت بیشتری داشت (موسوی‌بایگی و همکاران ۲۰۱۱). همچنین در سنندج توانایی مدل‌های پنمن- مانتیث، تشعشع و پنمن اصلاح‌شده‌ی فائو، مکینگ، هارگریوز- سامانی و پریستلی- تایلور در برآورد ETo ارزیابی شد و با داده‌های لایسیمتری مقایسه شد. نتایج مشخص کرد که مدل پنمن اصلاح‌شده‌ی فائو، در برآورد تبخیر-تعرق بیشترین دقت را داشت (قمرنیا و همکاران ۲۰۱۲). در منطقه‌ی سیستان اندازه‌های برآوردشده‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجع با مدل‌های بلینی-کریدل و پنمن- مانتیث فائو، جنسن- هیز، جنسن- هیز اصلاح‌شده، مکینگ و هارگریوز- سامانی با داده‌های لایسیمتری مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل‌های بلینی-کریدل فائو و هارگریوز-سامانی، با داده‌های اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله‌ی لایسیمتر به‌ترتیب بیشترین و کمترین همخوانی را داشتند (پیری ۲۰۱۲). در رفسنجان اندازه‌های برآوردشده‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجع با مدل‌های بلینی-کریدل، پنمن- مانتیث، پنمن و تشعشع فائو، پنمن- کیمبرلی و هارگریوز- سامانی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله‌ی لایسیمتر مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل‌های پنمن- مانتیث و بلینی-کریدل فائو، با داده‌های واقعی به‌ترتیب بیشترین همخوانی را داشتند (نوری و همکاران ۲۰۱۷).

در مالـــی، دجامان و همکاران (۲۰۱۷) یازده مدل برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع ETo را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که مدل پنمن-مانتیث فائو در برآورد ETo دقت زیادی داشـــت. همچنین آنها گزارش کردند که مدل‌های هانســـن، کریستینســـن و ایرماک، اندازه‌هـــای ETo را کمتر از اندازه‌ی واقعی برآورد کرد و مدل جنســـن-هیز اندازه‌های ETo را بیشـــتر از اندازه‌ی واقعی برآورد کرد. در چین اندازه‌های برآورده‌شـــده‌ی ETo با شانزده مدل تشعشـــعی، دمایـــی و ترکیبی با داده‌های لایســـیمتری مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل‌های بلینی-کریدل و تشعشـــع فائو در مقایسه با مدل پنمن- مانتیث فائو دقت بیشـــتری داشـــتند. از بین مدل‌های توصیه شده‌ی فائو، مدل پنمن اصلاح‌شـــده در برآورد ETo کمترین دقت را داشت. همچنین مدل‌های ترکیبی در مقایسه با مدل‌های تشعشعی و این مدل‌ها نیز در مقایسه با مدل‌های دمایی دقت بیشـــتری داشـــتند (لیو و همـــکاران ۲۰۱۷). این پژوهشـــگران علـــت دقیق‌تر بودن مدل‌هـــای ترکیبی و تشعشعی در مقایســـه با مدل‌های دمایی را، لحاظ‌کردن دوره‌ی تشعشع که عامل مهم و مؤثر در تبخیر-تعرق در مدل‌های ترکیبی و تشعشعی است، دانستند.

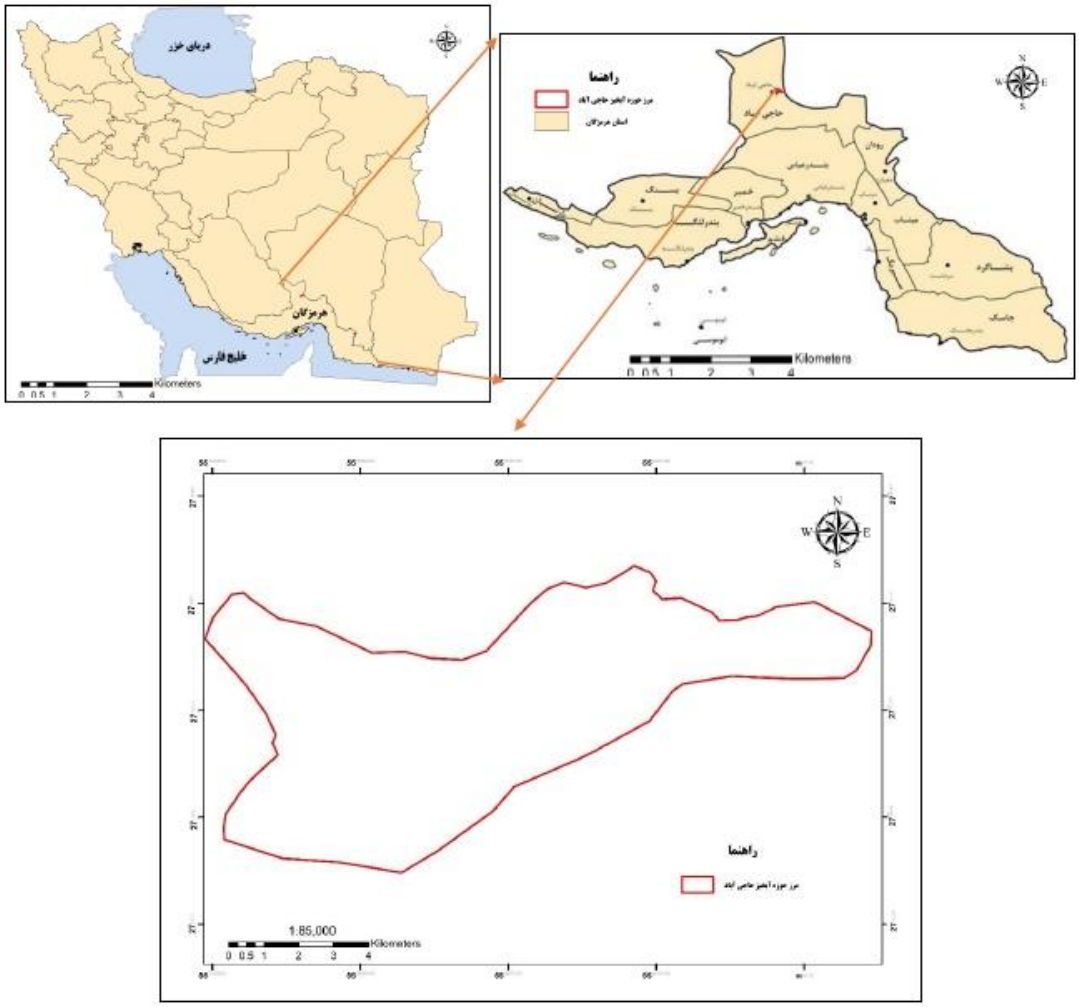
در پژوهشـــی، اندازه‌های برآوردشده‌ی ETo با مدل‌های هارگریوز- ســـامانی، پریســـتلی- تایلور، گرانجر- گری و پنمن- مانتیث فائو با داده‌های اندازه‌گیری‌شـــده با روش Eddy Covariance مقایســـه شد. نتایج نشان داد در مقایسه با سایر مدل‌ها، داده‌های مدل‌های پنمن- مانتیث فائو و هارگریوز- ســـامانی با داده‌های اندازه‌گیری‌شـــده به‌ترتیب بیشترین و کمترین همخوانی را داشتند (هولدر و همـــکاران ۲۰۱۸). در زابـــل، احمدی‌پـــور و همکاران (۲۰۱۹) نتایج مدل‌های پنمن، بلینی-کریدل و تشعشع فائو را با نتایج به‌دســـت آمده‌ی مدل پنمن-مانتیث فائو مقایســـه کردند. ایشـــان نتیجه گرفتند کـــه نتایج مدل پنمن فائو و تشعشـــع فائو با نتایج به‌دســـت آمده‌ی مدل پنمن-مانتیـــث به‌ترتیب بیشـــترین و کمترین همخوانی را داشـــتند. در مالزی، محمد و همکاران (۲۰۱۹) ســـی و یـــک مدل برآورد ETo را ارزیابی کردند. ایشـــان مدل پنمن-مانتیث فائو را به عنوان بهترین مدل توصیه کردند. در عربستان، اســـلام و همکاران (۲۰۲۰) نه مدل برآورد ETo را بـــا نتایج مدل پنمن-مانتیث فائو ارزیابی کردند. نتایج نشـــان داد که نتایج مدل‌هـــای ماهرینگر و تابرت، بـــا داده‌های به‌دســـت آمده‌ی مـــدل پنمن-مانتیث فائو به‌ترتیب بیشترین همخوانی را داشتند.

نتایج پژوهش‌های گذشته نشان‌دهنده‌ی تفاوت اندازه‌ی دقـــت و همخوانی مدل‌های بـــرآورد ETo در آبخیزها و مناطق مختلف است. بنابراین، اگر از هر یک از این مدل‌ها بدون ارزیابی اندازه‌ی هم‌سنجی و دقت آن‌ها در هر آبخیز یا منطقه استفاده شود امکان بروز خطا در برآورد اندازه‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجـــع و به‌دنبال آن نیاز آبی گیاهان افزایـــش می‌یابد کـــه این امر هرگونـــه برنامه‌ریزی برای آینده‌ی آبخیز را با مشـــکل مواجه می‌کند. از آنجایی که تاکنون هیچ‌گونه ارزیابی و بررســـی در زمینه‌ی اندازه‌ی دقت و کاربرد مدل‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق گیاه در آبخیز حاجی‌آباد انجام نشـــده اســـت، در این پژوهش ارزیابـــی اندازه‌ی دقـــت و کارایی مدل‌های پیشـــنهادی FAO در آبخیز حاجی‌آباد هرمزگان انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه‌ی پژوهش

این پژوهش، به‌مدت ۴ ســـال و از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۷ در آبخیز حاجی‌آباد به عرض جغرافیایی ۲۷/۱۳ درجه‌ی شمالی، طول جغرافیایی ۵۶/۲۲ درجه‌ی شرقی در شمال استان هرمزگان انجام شد (شکل ۱). مساحت این آبخیز، ۷۹۴ کیلومتـــر مربـــع و بلندی آن ۱۴۵۰ متر از ســـطح دریا اســـت. در شهرســـتان حاجی‌آباد میانگین سالانه‌ی دما ^{o}C ۲۲/۳، میانگین ســـالانه‌ی رطوبت نسبی ۴۰٪ ، میانگین ســـالانه‌ی بارندگی ۲۲۶/۷ میلی‌متر و میانگین سالانه‌ی تبخیر ۲۳۰۰ میلی‌متر است (محبی ۱۹۹۸).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز حاجی‌آباد هرمزگان.

Figure 1-Geographical Location of Haji Abad Watershed in Hormozgan Province.

روش پژوهش

در این پژوهش، در سال اول آزمایش، در مرکز قطعه زمینی به مساحت ۲ هکتار با کاربری کشاورزی که نماینده‌ی این آبخیز بود یک دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار مربع شکل به ابعاد ۳×۳ متر و عمق ۱۹۰سانتی‌متر نصب شد (شکل ۲). به این منظور ابتدا در مرکز زمین مزبور، گودالی به ابعاد کمی بزرگ‌تر از لایسیمتر حفر شد. از این رو ابتدا نیم‌رخ خاک به لایه‌های ۳۰ سانتی‌متری تقسیم شد و خاک هر لایه به‌طور جداگانه در مجاورت لایسیمتر قرار داده شد. پس از حفاری محل، سطوح داخلی و خارجی لایسیمتر به‌منظور جلوگیری از پوسیدگی، قیرگونی شد. سپس با استفاده از جرثقیل، لایسیمتر در درون گودال حفاری‌شده گذاشته شد و در کف آن به‌ترتیب لایه‌هایی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر سنگ‌ریزه درشت، ۱۰ سانتی‌متر سنگ‌ریزه با ابعاد کوچک‌تر و ۱۰ سانتی‌متر شن ریخته شد. سپس یک توری گالوانیزه به‌منظور جلوگیری از شسته‌شدن ذرات خاک روی آن گذاشته شد و خاک هر لایه مجدداً به‌جای اولیه برگردانده شد. سپس خاک هر لایه در درون لایسیمتر، فشرده و اشباع شد تا نشست کند. به‌منظور ایجاد یکنواختی خاک درون لایسیمتر با شرایط پیرامونش، به‌مدت یک سال لایسیمتر رها شد و در آن کشت انجام نشد. برای اندازه‌گیری آب زهکشی‌شده از لایسیمتر، اتاقکی در درون زمین در فاصله‌ی ۱۵ متری آن ساخته شد و از کف لایسیمتر به درون اتاقک لوله‌کشی شد. سپس به مدت سه سال، در پیرامون و درون لایسیمتر با مساحت ۹۰۰ مترمربع، چمن رقم برمودا‌گراس *(Cynodon dactylon L.)* کشت شد و پس از این‌که پوشش کاملی روی زمین ایجاد شد و بلندی چمن حدود هشت سانتی‌متر شد، تبخیر-تعرق آن به‌طور هفتگی و به‌روش بیلان آبی با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد.

$$ET=\frac{I+P-D+\sum_{1}^{n}(\theta_1-\theta_2)\Delta s_i}{\Delta t} \quad (1)$$

ET :تبخیر-تعرق گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر
I، P و D: به‌ترتیب عمق آب آبیاری، اندازه‌ی بارندگی و عمق آب زهکشی‌شده از خاک درون لایسیمتر بر حسب میلی‌متر، Θ_1 و Θ_2: به‌ترتیب رطوبت حجمی خاک در ابتدا و انتهای دوره‌ی هفتگی، n: تعداد لایه‌های خاک، ضخامت هر لایه‌ی خاک و Δt: فاصله‌ی زمانی بین دو اندازه‌گیری است.

شکل ۲- لایسیمتر و تشتک تبخیر کلاس A نصب‌شده در آبخیز حاجی‌آباد هرمزگان.

Figure 2- Lysimeter and Class A Evaporation Pan Installed in Hajiabad Watershed, Hormozgan Pprovince.

قبل از اجرای آزمایش از خاک درون لایسیمتر از عمق ۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر و با فاصله‌های ۳۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک درون لایسیمتر در عمق‌های مختلف.

Table 1- Some Physical and Chemical Characteristics of the Soil Inside the Lysimeter at Different Depths.

	(Soil Depth) (cm)				
	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150
Texture	Loam	Clay Loam	Loam	Loam	Loamy Sand
Buke Density (gr/cm^3)	1.37	1.37	1.41	1.46	1.49
Electrical Conductivity of Saturated Extract (dS/m)	2.85	3.61	4.62	3.11	1.09
pH	7.67	7.87	7.89	7.86	8.03
T.N.V (%)	29.90	22.10	27.70	29.70	31.50
CEC (meq/100g)	12.50	21.00	13.00	11.10	6.90
Organic Carbon (%)	0.67	0.51	0.45	0.35	0.24
Total N (%)	0.11	0.12	0.09	0.07	0.05
Available P (mg/kg)	15.67	1.54	2.29	2.85	2.78
Available K (mg/kg)	280.00	202.00	148.00	136.00	110.00

رطوبت ظرفیت مزرعه و نقطه‌ی پژمردگی دائم خاک تا عمق ۰ تا ۴۰ سانتی‌متری نیز با استفاده از دستگاه محفظه‌ی فشاری اندازه‌گیری شد و به‌ترتیب ۱۸/۷ و ۷/۶ ٪ جرمی بودند. چمن در ماه‌های گرم (از فروردین تا مهر) به‌طو روزانه و در پاییز و زمستان به‌طور یک روز در میان آبیاری شد. اندازه‌ی آب آبیاری براساس ۸۵ ٪ تبخیر از تشتک کلاس A تعیین شد. به‌طور هفتگی قبل از آبیاری رطوبت خاک درون لایسیمتر تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متر و با فاصله‌های ۳۰ سانتی‌متری و به روش جرمی اندازه‌گیری شد. آب زهکشی‌شده‌ی لایسیمتر نیز به‌وسیله‌ی لوله‌ای به چاهک اندازه‌گیری در فاصله‌ی ۱۶ متری لایسیمتر هدایت شد و از آنجا در بشکه‌ای جمع‌آوری و حجم آن اندازه‌گیری شد. بلندی چمن پیوسته بین ۸ تا ۱۵ سانتی‌متر نگهداری شد و هنگامی که بلندی گیاه به حدود ۱۵ سانتی‌متر می‌رسید سرزنی چمن انجام می‌شد. همچنین یک عدد تشتک تبخیر کلاس A در دورن

چمن نصب شد و تبخیر از آن به‌طور روزانه اندازه‌گیری شد (شکل ۲). ویژگی‌های اقلیمی مانند دما و رطوبت نسبی هوا، سرعت باد، ساعت‌های آفتابی و بارندگی در ایستگاه هواشناسی محل آزمایش اندازه‌گیری شد و با استفاده از آن‌ها تبخیر-تعرق گیاه مرجع برای دوره‌های هفتگی با استفاده از مدل‌های پیشنهادی FAO (پنمن اصلاح‌شده‌ی فائو، بلینی- کریدل اصلاح شده ی فائو، تشعشع، تشتک تبخیر و پنمن- مانتیث) برآورد شد و با داده‌های اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله‌ی لایسیمتر مقایسه شد. سپس وایازی خطی و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (جاکووید وکونتوئیانیس ۱۹۹۵) با استفاده از رابطه‌ی ۲ تعیین شد. درصد خطای هر روش نیز در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۳ تعیین شد. سرانجام بهترین مدل‌ها برای آبخیز حاجی‌آباد هرمزگان پیشنهاد شد.

$$E = \frac{ETo_{est} - ETo_{mea}}{ETo_{mea}} \times 100 \qquad (۲)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} d_i^2\right)^{0.5} \qquad (۳)$$

نتایج و بحث

میانگین سه ساله‌ی تبخیر-تعرق فصلی گیاه مرجع اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله‌ی لایسیمتر و برآوردشده با مدل‌های پیشنهادی FAO و درصد خطای هر مدل در برآورد ETo در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین اندازه‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تبخیر-تعرق گیاه مرجع برآوردشده با مدل‌های پیشنهادی FAO در جدول ۳ نشان داده شده است. اندازه‌های برآوردشده‌ی ETo با مدل‌های پنمن اصلاح‌شده و بلینی-کریدل اصلاح‌شده، پنمن-مانتیث، تشعشع و تشتک تبخیر، به‌ترتیب ۳۴۰۵/۰، ۲۶۹۵/۲، ۲۸۶۸/۰، ۲۷۸۹/۲ و ۲۰۵۴/۶ میلی‌متر بود. مقایسه‌ی این اندازه‌ها با داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی لایسیمتر (۲۷۲۹/۸ میلی‌متر) نشان داد که مدل‌های پنمن اصلاح‌شده، پنمن- مانتیث و تشعشع، اندازه‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجع را به‌ترتیب ۲۴/۷، ۵/۱ و ۲/۲ ٪ بیش از اندازه‌گیری‌های لایسیمتر برآورده کرده‌اند (جدول ۲). مدل‌های تشتک تبخیر و بلینی-کریدل اصلاح‌شده اندازه‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجع را به‌ترتیب ۲۴/۷ و ۱/۳٪ کمتر از اندازه گیری‌های لایسیمتر برآورد کرده‌اند (جدول ۲). بنابراین با توجه به خطای کمتر مدل‌های بلینی-کریدل اصلاح‌شده، تشعشع و پنمن- مانتیث، در مقایسه با سایر مدل‌ها و چنانچه هدف برآورد فصلی ETo باشد در اولویت نخست می‌توان مدل‌های بلینی-کریدل اصلاح‌شده و تشعشع را استفاده کرد و در صورتی که داده‌های اقلیمی لازم در دسترس باشد، در اولویت دوم مدل پنمن- مانتیث را استفاده کرد. مدل‌های تشتک تبخیر و پنمن اصلاح‌شده برای آبخیز پژوهش مناسب نبودند و استفاده از آن‌ها منجر به خطای قابل ملاحظه‌ای در

جدول ۲- میانگین سه ساله‌ی تبخیر-تعرق فصلی گیاه مرجع اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله‌ی لایسیمتر و برآوردشده با مدل‌های پیشنهادی FAO و درصد خطای هر مدل.

Table 2- Seasonal Values of the Reference Crop Evapotranspiration Measured in Lysimeter and Estimated from the FAO-Proposed Models and the Error Percentage of Each Model.

(Measurement or Estimation Method of Reference Crop Evapotranspiration)	(Reference Crop Evapotranspiration) (mm)	(Error) (%)
Measured from Lysimeter	2729.8	-
Evaporation pan	2054.6	-24.7
FAO Adjusted Blaney-Criddle	2695.2	-1.3
FAO Adjusted Penman	3405.0	24.7
Radiation	2789.2	2.2
Penman-Monteith	2868.0	5.1

رقم‌های مثبت بیانگر برآورد بیشتر و رقم‌های منفی بیانگر برآورد کمتر تبخیر-تعرق در مقایسه با داده‌ی اندازه‌گیری‌شده است.

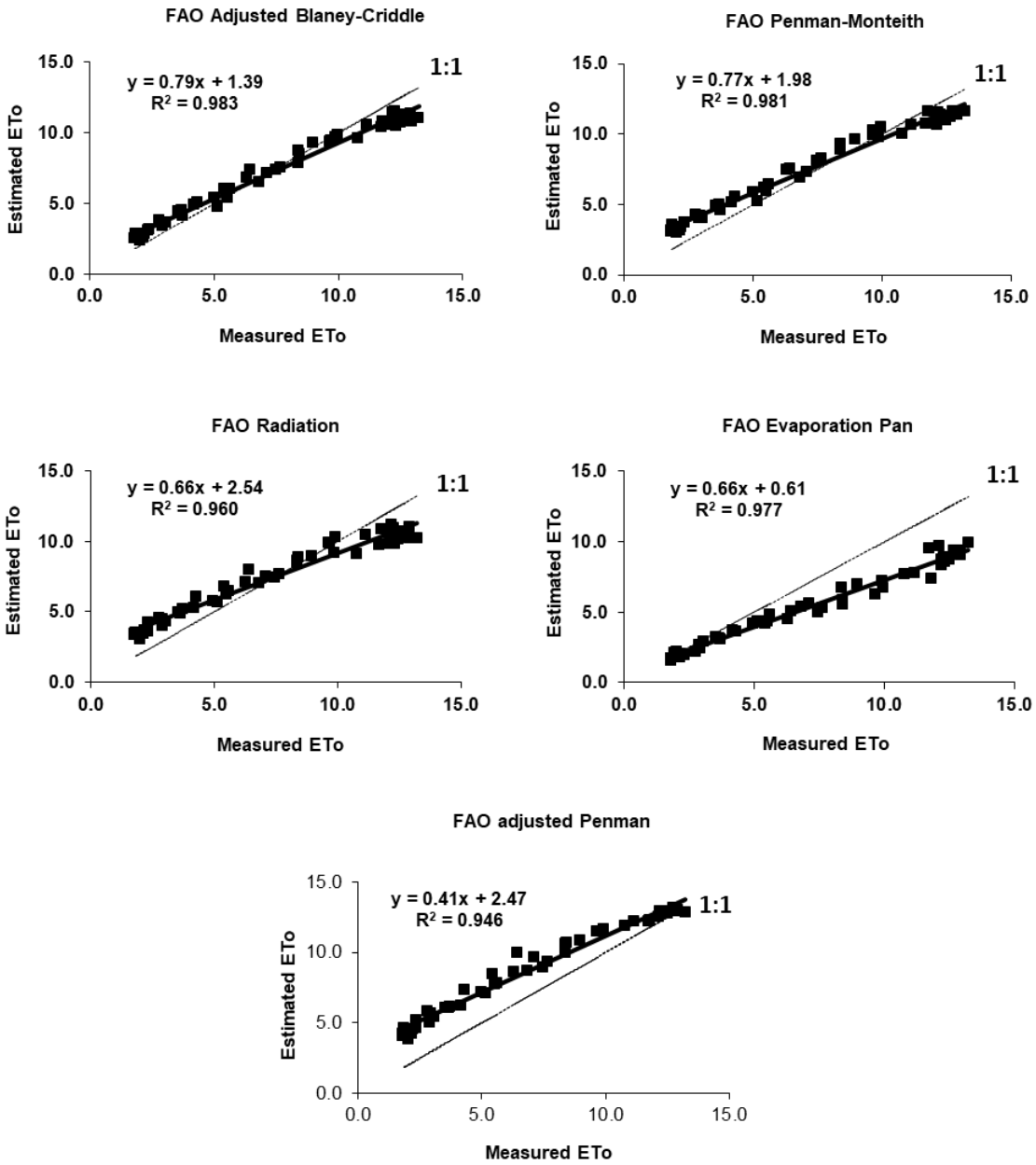
Positive Figures Indicate Overestimation and Negative Figures Indicate Underestimation of Evapotranspiration Compared to the Measured Value.

جدول ۳- اندازه‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مدل‌های برآورد ETo پیشنهادشده‌ی FAO.

Table 2- Root Mean Square Error (RMSE) Values for the FAO Proposed Models to Estimate ETo.

(ET_0) Estimation Method	RMSE
Evaporation Pan	2.28
FAO-Adjusted Blaney-Criddle	0.93
FAO-Adjusted Penman	1.96
Radiation	1.44
Penman-Monteith	1.05

برآورد فصلی ETo شد.
معادله‌های وایـــازی بین داده‌هـــای تبخیر-تعرق گیاه مرجع اندازه‌گیری شـــده با لایســـیمتر و برآوردشده با مدل‌های پیشنهادی FAO در شکل ۳ نشان داده شده اســـت. چنان‌چه تبخیر- تعرق از هـــر یک از مدل‌های مزبور برآورد شود می‌توان با گذاشتن رقم به‌دست آمده در معادله‌ی وایازی مربوطه اندازه‌ی ETo را که از روش بیلان آبی انتظار مـــی‌رود و دقت و اطمینان زیادی نیز دارد، به‌دســـت آورد و در برنامه‌ریزی آبیاری از آن بهره برد.



شکل ۳- رابطه‌های وایازی بین داده‌های تبخیر-تعرق روزانه (میانگین هفتگی) گیاه مرجع اندازه‌گیری‌شده با لایسیمتر و برآوردشده با مدل‌های پیشنهادی FAO.

Figure 3- Regression Relationships Between Daily Evapotranspiration Values (Weekly Average) of the Reference Crop Measured Using a Lysimeter and Estimated by the FAO Proposed Models.

تا اینجا همه‌ی مدل‌های مزبور R^2 بیشتری داشتند (شکل ۳). اما مدل‌های تشتک تبخیر، بلینی-کریدل اصلاح‌شده و پنمن- مانتیث در مقایسه با سایر مدل‌ها هم R^2 بیشتری داشتند و هم با داده‌های اندازه‌گیری‌شده بیشترین همبستگی را داشتند. مقایسه‌ی داده‌ها با خط ۱:۱ نشان داد در اکثر دوره‌ها به‌رغم همبستگی زیاد مدل تشتک تبخیر با داده‌های اندازه‌گیری‌شده با لایسیمتر، تبخیر-تعرق را کمتر از اندازه‌ی واقعی نشان داد که با نتایج نیشابوری و همکاران (۲۰۰۶) هم‌خوانی دارد ولی مدل پنمن اصلاح‌شده تبخیر-تعرق را بیشتر از اندازه‌ی واقعی برآورد کرد که با نتایج بوگاوسکی و بدنورز (۲۰۱۴) و یودر و همکاران (۲۰۰۵) هم‌خوانی دارد. در دوره‌هایی که داده‌های ETo کمتر از ۷ میلی‌متر در روز متر بوده است (عمدتاً فصل‌های پاییز و زمستان)، مدل تشعشع، تبخیر-تعرق را بیشتر از اندازه‌ی واقعی برآورد کرد ولی در ماه‌هایی که داده‌های ETo بیشتر از ۱۰ میلی‌متر در روز متر بوده است (ماه‌های خرداد تا شهریور)، تبخیر-تعرق را کمتر از اندازه‌ی واقعی برآورد کرد. نتایج برآورد بیش از اندازه‌ی واقعی تبخیر-تعرق در ماه‌های سرد سال و کمتر از اندازه‌ی واقعی در ماه‌های گرم سال به‌وسیله‌ی مدل‌های گوناگون در پژوهش‌های فاریاس و همکاران (۲۰۲۰) و دای و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش شده است که با نتایج این پژوهش هم خوانی دارد. از آنجایی که R^2 مدل‌های بررسی‌شده به‌هم بسیار نزدیک بود و اختلاف زیادی با یکدیگر نداشتند برای افزایش دقت در ارزیابی و انتخاب بهترین مدل یا مدل‌ها برای آبخیز حاجی‌آباد، افزون‌بر وایازی خطی از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز استفاده شد. براساس داده‌های جدول ۳ مدل‌های بلینی-کریدل اصلاح‌شده و پنمن–مانتیث با ۰/۹۳ و ۱/۰۵، به‌ترتیب کمترین اندازه‌ی RMSE را داشتند. همچنین این مدل‌ها بیشترین R^2 را داشتند (شکل ۳) و خطای آن‌ها در برآورد فصلی ETo نیز کم بود (جدول ۱). کارایی مناسب مدل‌های پنمن- مانتیث و بلینی-کریدل اصلاح‌شده‌ی فائو به‌وسیله‌ی معاضد و همکاران (۲۰۱۴) در شیراز و به‌وسیله‌ی نوری و همکاران (۲۰۱۷) در رفسنجان گزارش شده است. کارایی مناسب مدل بلینی-کریدل اصلاح‌شده‌ی فائو به‌وسیله‌ی رئوف و عزیزی‌مبصر (۲۰۱۸) در اردبیل و به‌وسیله‌ی پیری (۲۰۱۲) در سیستان نیز گزارش شده است. این گزارش‌ها با نتایج این پژوهش، هم‌خوانی دارند.

براساس نتایج این پژوهش، مدل‌های بلینی-کریدل اصلاح‌شده و پنمن- مانتیث، به‌ترتیب به‌عنوان بهترین مدل‌ها برای برآورد ETo در آبخیز حاجی‌آباد و مناطق با شرایط اقلیمی مشابه پیشنهاد می‌شوند. مزیت مدل بلینی-کریدل بر پنمن-مانتیث این است که به اطلاعات و ویژگی های اقلیمی کمتری نیاز دارد و در مناطق با داده‌های اقلیمی محدود نیز می‌تواند استفاده شود. البته در صورتی که هدف، برآورد فصلی تبخیر-تعرق گیاه مرجع باشد، می‌توان از مدل تشعشع نیز استفاده کرد.

فهرست منابع

Abol Pour B. 1996. Assessment of models for estimating daily and monthly potential evapotranspiration in Kerman. Sixth Iranian Conference on Irrigation and Evaporation Reduction Proceedings, pp. 202–212.

Ahmadipour A, Shaibani P, Mostafavi SA. 2019. Assessment of empirical methods for estimating potential evapotranspiration in Zabol Synoptic Station by REF-ET model. Mediotech Journal, 3(1): 1–4.

Allen RG, Jensen ME, Wright JL, Burmar RD. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agronomy Journal, 81(4): 650–662.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage paper. No. 56. FAO, Rome, Italy. 327 p.

Bogawski P, Bednorz E. 2014. Comparison and validation of selected evapotranspiration models for conditions in Poland (Central Europe). Water Resources Management, 28: 5021–5038.

Day L, Fu R, Zhao Z, Guo X, Du Y, Hu Z, Cao G. 2022. Comparison of fourteen reference evapotranspiration models with lysimeter measurements at a site in the humid alpine meadow Northeastern Qinghai-Tibetan plateau. Frontiers in Plant Science, 13:854196. 16 p. doi: 10.3389/fpls.2022.854196.

Djaman K, Koudahe K, Akinbile C, Irmak S. 2017. Evaluation of eleven reference evapotranspiration models in semiarid conditions. Journal of Water Resource and Protection, 9 (12): 1469–1490. doi: 10.4236/jwarp.2017.912094.

Doorenbos J, Pruitt WO. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24. FAO, Rome, Italy. 156 p.

Emdad MR, Sabbagh Farshi AA. 2000. Selection of the most suitable empirical equation to estimate potential evapotranspiration of reference crop in Golestan. Soil and Water Science, 12(10): 90–95.

Farias VDDS, Costa DLP, Pinto JVDN, PD, Souza PJDO, Souza BDE, Ortega-Farias S. 2020. Calibration of reference evapotranspiration models in Pará. Acta Scientiarum, 42(e42475): 2–10.

Ghamarnia H, Rezvani SV, Fathi P. 2012. Evaluation and calibration of reference evapotranspiration models according to calculating periods for a cold semi-arid climate. Water and Irrigation Management, 2(2): 25–37.

Holder AJ, Mccalmont JP, Mcnamara NP, Rowe R, Donnison IS. 2018. Evapotranspiration model comparison and an estimate of field scale miscanthus canopy precipitation interception. GCB Bioenergy, 10 (5): 353–366.

Islam S, Abdullah RAB, Badruddin IA, Algahtani A, Shahid S, Irshad K, Mallick J, Hirol H, Alsubih M, Elouni MH, Kahla N.B. 2020. Calibration and validation of reference evapotranspiration models in semi-arid conditions. Applied Ecology and Environmental Research, 18(1):1361–1386.

Jacovides CP, Kontoyiannis H. 1995. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. Agricultural Water Management, 27 (3–4): 365 –371.

Liu X, Xu C, Zhong X, Li Y, Yuan X, Cao J. 2017. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. Agricultural Water Management, 184: 145–155.

Muhammad MKI, Nashwan MS, Shahid S, Ismail TB, Song YH, Chung ES. 2019. Evaluation of empirical reference evapotranspiration models using compromise programming: A case study of Peninsular Malaysia. Sustainability, 11(16): 4267,

doi:10.3390/su11164267.

Moazed H, Ghaemi AA, Rafiee MR. 2014. Evaluation of several reference evapotranspiration methods: A comparative study of greenhouse and outdoor conditions. IJST, Transactions of Civil Engineering, 38(C2): 421–437.

Mohebi A. 1998. Agricultural Research Station of Haji Abad. Agricultural Research Center of Hormozgan.

Mousavi-Baygi M, Ashraf B, Miyanabadi A. 2011. The assessment of four reference crop evapotranspiration models in a semi-arid climate of Iran to find the best radiation model. Journal of Water and Soil Conservation, 17(4):87–105.

Neyshabouri MR, Moradi Dalini A, Jafarzadeh AA, Sadeghi S. 2006. Evaluation of FAO proposed methods for estimating reference crop evapotranspiration in the Karkaj area of Tabriz. Journal of Agricultural Science, 15(4): 63–72.

Noory H, Badiehneshin A, Mohammadi Mohammad Abadi A. 2017. Evaluation of reference evapotranspiration calculation methods and determination of Pistachio evapotranspiration in Rafsanjan. Journal of Agricultural Meteorology, 4(2):77–81.

Piri H. 2012. Assessment of computational methods of estimation of potential evapotranspiration using lysimeter data (case study: Sistan plain). Irrigation and Water Engineering Journal, 3(9): 50–62.

Raoof M, Azizi Mobase J. 2018. Evaluation of eighteen reference evapotranspiration models under the Ardabil climate condition. Journal of Water and Soil Conservation, 24(6):227–241.

Yoder RE, Odhiambo LO, Wight WC. 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. Applied Engineering in Agriculture, 21(2): 197–202.

Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981-2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Evaluation of the FAO Proposed Models for Reference Crop Evapotranspiration ETo Estimation in Hajiabad Watershed of Hormozgan Province

Abolfath Moradi*

Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran

Extended Abstract

Introduction and Objective

Due to droughts occurred in recent years, available water resources in southern basins and watersheds of Iran especially those are in Hormozgan Province has been drastically decreased which may not only change their ecosystem but also make serious problem for the country's food security. In addition to find new water resources, effective use of available water is the best choice to tackle water deficit which in turn, requires accurate estimation of evapotranspiration or water needs of plants. Crop evapotranspiration is usually calculated using the two-step FAO method. In this method, first the reference crop evapotranspiration ETo, representing effect of weather on crop evapotranspiration is estimated by models using weather variables and then, multiplied by crop coefficient (Kc) which reflects crop characteristics on evapotranspiration. A review on the research conducted around the world revealed that each model may have different accuracies and performances at different watersheds or locations. Subsequently, using these models without testing their accuracy and relevance at each watershed may increase error in estimating ETo and hence crop water requirements which may complicate any planning for the watershed in the future. Therefore, this research was conducted to evaluate the accuracy and performance of the FAO proposed models at Haji Abad watershed of

Article Type: Research Article
***Corresponding Author E-mail:** Ab.moradi@areeo.ac.ir
Citation: Moradi, A . 2023. Evaluation of the FAO Proposed Models for Reference Crop Evapotranspiration (ETo) Estimation in Hajiabad Watershed of Hormozgan Province. Watershed Management Research. 36(2): 121-133.
DOI: 10.22092/WMRJ.2022.358978.1477
Received: 07 February 2022, **Received in revised form**: 06 June 2022, **Accepted**: 21 June 2022, **Published online:** 22 June 2023
Watershed Management Research, VOL. 36, No. 2, Ser. No: 139, Summer 2023, pp. 121-133.
Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
©Author(s)

Hormozgan Province.

Materials and Methods

In this research which was conducted in Haji Abad watershed of Hormozgan for four years, reference crop (grass) evapotranspiration was measured weekly using a drainable lysimeter. In the first year, a large square drainable lysimeter (3 m wide ×3 m long × 1.9 m tall) was installed in the center of a 2-ha agricultural field which was representative of the watershed. In the next third years, grass *(Cynodon dactylon L.)* was grown inside the lysimeter and in the 900 m^2 surrounding field. At full cover and when grass height reached 8 cm, evapotranspiration from grass inside the lysimeter was measured weekly by the water balance method. Reference crop evapotranspiration was also estimated using the FAO models: Adjusted penman and Blaney- Criddle, Radiation, Evaporation pan and Penman-Monteith. The estimated ET_0 values from the FAO models were compared with the data measured from lysimeter using linear regression, root mean square error and error percentage in estimating seasonal ETo and subsequently, the most appropriate models were recommended for the watershed.

Results and Discussion

Seasonal grass evapotranspiration measured from the lysimeter was 2729.8 mm and estimated by Adjusted penman and Blaney- Criddle, Penman-Monteith, Radiation and Evaporation pan 3405, 2695.2, 2868, 2789.2 and 2054.6 mm, respectively. The FAO adjusted Penman, Penman-Monteith and Radiation models overestimated ETo by as much as 24.7, 5.1 and 2.2% respectively, whereas, the FAO evaporation pan and Blaney- Criddle underestimated it by as much as 24.7 and 1.3%, respectively. Comparing weekly ETo data showed that adjusted penman model overestimated ETo but the FAO evaporation pan model underestimated it for most of the periods. FAO radiation model had tendency to overestimate at ETo<7 mmday-1 (normally in Fall and Winter) but underestimate at ETo >10 mmday-1 (normally in Summer).

Conclusion and Suggestions

According to the results, the FAO Blaney-Criddle and Penman-Monteith models had respectively higher accordance and homogeneity with the real data measured from lysimeter and can predict ETo with higher accuracy than the other tested models. Therefore, these models are recommended, respectively as the most appropriate models to estimate ETo in Haji Abad Watershed and the areas having the same climate. Furthermore, the FAO Blaney-Criddle model needs fewer weather parameters and hence, may be used in the areas with limited climatic data.

Keywords: Watershed, reference crop evapotranspiration, Haji Abad, Lysimeter, evapotranspiration models