

ارزیابی یازده مدل برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه حاجی آباد هرمزگان

ابوالفتح مرادی^{۱*}، عبدالحسین ضیائی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۱۴

چکیده

تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) یک پارامتر مهم برای تعیین نیاز آبی گیاهان در روش فائو بوده و از این رو، تعیین دقیق آن از اهمیت ویژه‌ای در بهینه کردن مصرف و مدیریت منابع آب برخوردار می‌باشد. در این تحقیق که به مدت چهار سال در منطقه حاجی آباد هرمزگان صورت گرفت تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن با استفاده از یک دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار به طور هفتگی اندازه‌گیری گردید. همچنین ET_0 توسط مدل‌های پنمن، بلینی-کریدل، تشعشع، تشت تبخیر و پنمن-مانتیت فائو، پاپاداکیس، جنسن-هیز، هارگریوز-سامانی، تورک و مکینگ محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر با استفاده از رگرسیون خطی، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، شاخص توافق (d) و واریانس توزیع باقیمانده‌ها (S^2) مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل‌های پنمن فائو، ایوانف، پاپاداکیس و جنسن-هیز ET_0 را بیشتر و مدل‌های تشت تبخیر فائو، هارگریوز، تورک و مکینگ آن را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده از لایسیمتر برآورد می‌نمایند. مدل‌های بلانی-کریدل و پنمن-مانتیت فائو ET_0 را برتریب با دقت بالاتری برآورد نموده و به‌عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها برای منطقه مورد آزمایش و مناطق با شرایط اقلیمی مشابه پیشنهاد می‌گردند.

واژه‌های کلیدی: لایسیمتر، تبخیر-تعرق، گیاه مرجع، مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق

مقدمه

از میزان تبخیر و تعرق از یک سطح وسیع پوشیده از چمن سبز با ارتفاع یکنواخت (۸ تا ۱۵ سانتیمتر) که دارای رشد فعال بوده، بطور کامل بر روی زمین سایه انداخته، بخوبی آبیاری شده و تحت تنش رطوبت قرار نگرفته باشد (Doorenbos and Pruitt, 1977). با استفاده از مدل‌هایی که از یک یا چند پارامتر آب و هوایی از قبیل درجه حرارت، تشعشع خورشیدی، رطوبت نسبی هوا، سرعت باد و ... استفاده می‌نمایند، برآورد می‌گردد. در مرحله بعد، ET_0 در ضریبی به نام ضریب گیاهی (Kc) ضرب می‌شود تا نیاز آبی گیاه بدست آید. در دهه‌های گذشته، مدل‌های مختلفی برای برآورد ET_0 ارائه شده است که با استفاده از آنها می‌توان با سهولت بیشتر و صرف وقت و هزینه کمتر ET_0 را در هر منطقه برآورد نمود. از آنجایی که ممکن است شرایط اقلیمی هر محل با شرایطی که این مدل‌ها تحت آن بدست آمده اند متفاوت باشد استفاده از آنها در هر محل بدون تست یا واسنجی با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری مستقیم با لایسیمتر می‌تواند منجر به خطای قابل ملاحظه‌ای در برآورد ET_0 گردد. از این رو، لازم است قبل از استفاده از هر یک از این مدل‌ها، نسبت به تست و واسنجی آنها در منطقه اقدام نمود. در این راستا تحقیقات زیادی در بسیاری از مناطق جهان صورت گرفته است. برای مثال، در تحقیقی که در آمریکا انجام شد، مقادیر ET_0 برآورد شده از هشت مدل آب و هوایی با داده‌های حاصل از لایسیمتر مقایسه و نتیجه گرفته شد که

امروزه بزرگترین چالش کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران از جمله استان هرمزگان کمبود و کاهش تدریجی کیفیت منابع آب است. اصولی‌ترین راه برای مقابله با کمبود آب و حفظ کیفیت آن، استفاده بهینه از منابع آب موجود است که به نوبه خود مستلزم آگاهی از تبخیر-تعرق یا نیاز آبی گیاهان می‌باشد. نیاز آبی گیاهان به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تعیین می‌شود. در روش مستقیم، گیاه مستقیماً در درون جعبه‌های کشت یا لایسیمتر کاشته و نیاز آبی آن به روش وزنی یا بیان آبی اندازه‌گیری می‌شود. به علت مشکل و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری مستقیم نیاز آبی گیاه در مزرعه، معمولاً از روش غیرمستقیم استفاده می‌شود. در این روش که توسط سازمان خواربار و کشاورزی جهانی (فائو) ارائه شده است نیاز آبی یا تبخیر-تعرق گیاه طی دو مرحله تعیین می‌شود (Doorenbos and Pruitt, 1977). در مرحله اول تبخیر-تعرق گیاه مرجع ET_0 که عبارت است

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
۲- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: moradi1373@gmail.com)

مراکش، ایتالیا، تونس، ترکیه و اسپانیا نیز با داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل پنمن-مانتیت در مناطق ایتالیا، تونس، ترکیه و اسپانیا مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع را بین ۲ تا ۱۸ درصد کمتر و در مراکش آن را بیش از مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده از لایسیمتر برآورد می‌نماید (Steduto et al., 1996). در چین نیز مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده از شانزده مدل برآورد ET_0 شامل مدل‌های تشعشی، دمایی و ترکیبی با داده‌های لایسمتری مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل‌های بلانی-کریدل و تشعشع فائو از دقت بالاتری نسبت به مدل پنمن-مانتیت فائو برخوردار بودند. در بین مدل‌های توصیه شده توسط فائو، مدل پنمن اصلاح شده کمترین دقت را در برآورد ET_0 دارا بود. همچنین مدل‌های ترکیبی از دقت بیشتری نسبت به مدل‌های تشعشی و آن هم از دقت بیشتری نسبت به مدل‌های دمایی برخوردار بودند (Liu et al., 2017). نامبردگان علت دقیق‌تر بودن مدل‌های ترکیبی و تشعشی نسبت به مدل‌های دمایی را منظور نمودن ترم تشعشع که عامل عمده موثر در تبخیر-تعرق است در مدل‌های ترکیبی و تشعشی دانستند. بر اساس گزارش کاترجی و رانا حدوداً ۶۰ تا ۷۰ درصد تبخیر-تعرق گیاه مرجع به علت تاثیر ترم انرژی بوده و تنها ۱۰ تا ۲۰ درصد آن ناشی از اثر ترم آیرودینامیکی است (Katerji and Rana, 2011).

در خصوص ارزیابی مدل‌های برآورد ET_0 ، تحقیقات بسیاری نیز در مناطق مختلف ایران صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. در تحقیق انجام شده در منطقه باجگاه شیراز، نتایج حاصل از یازده مدل برآورد ET_0 شامل پنمن-مانتیت، بلانی کریدل و تشعشع فائو، هارگریوز-سامانی، مکینگ، تورک، پریستلی-تایلور، لیناکر، جنسن-هیز، تشت تبخیر و کوپاس در مزرعه و گلخانه با استفاده از داده‌های لایسیمتری ارزیابی و نتیجه گرفته شد که در شرایط مزرعه، بترتیب مدل‌های تشعشع فائو، پنمن-مانتیت فائو، هارگریوز-سامانی و بلانی-کریدل فائو و در شرایط گلخانه بترتیب مدل‌های پنمن-مانتیت فائو، پریستلی-تایلور، تشعشع فائو و بلانی-کریدل فائو از دقت بالاتری در برآورد ET_0 برخوردار بودند (Moazed et al., 2014). در کرمانشاه نیز نتایج حاصل از نه مدل برآورد ET_0 شامل پنمن-مانتیت، پنمن، بلانی-کریدل و تشعشع فائو، پنمن-کیمبرلی، مکینگ، تورک، پریستلی-تایلور و هارگریوز-سامانی با داده‌های لایسیمتری مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل‌های پنمن-مانتیت فائو، مکینگ و هارگریوز-سامانی بترتیب بیشترین و مدل‌های پنمن-کیمبرلی و پنمن فائو بترتیب کمترین همخوانی را با داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر داشتند (Ghamarnia et al., 2015). علیرغم همخوانی خوب مدل‌های پنمن-مانتیت فائو، مکینگ و هارگریوز-سامانی در برآورد تبخیر-تعرق روزانه در منطقه مورد مطالعه، مدل‌های پنمن-مانتیت فائو و مکینگ مقدار فصلی

مدل‌های پنمن-مانتیت فائو و تورک در مقایسه با سایر مدل‌های مورد بررسی بترتیب بیشترین همخوانی را با داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر داشتند (Yoder et al., 2005). بر اساس نتایج نامبردگان، مدل‌های پنمن فائو و پریستلی-تایلور ET_0 را بیشتر و مدل مکینگ آن را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کنند. در تحقیق دیگری که در یازده محل در قاره آمریکا انجام شد نتایج حاصل از دو مدل پریستلی-تایلور و تورنت وایت با مقادیر ET_0 بدست آمده از مدل پنمن-مانتیت فائو مقایسه و نتیجه گرفته شد که در بیشتر محل‌ها مدل تورنت وایت ET_0 را به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد و مدل پریستلی-تایلور آن را به میزان ۲۲ درصد کمتر از مدل پنمن-مانتیت برآورد می‌نماید (Fisher et al., 2011). راقب و همکاران در مصر مقادیر ET_0 بدست آمده از دوازده مدل برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع را با داده‌های لایسیمتری مقایسه و نتیجه گرفتند که مدل‌های تشعشع و بلانی-کریدل فائو به ترتیب بیشترین همخوانی را با داده‌های لایسیمتری داشتند (Ragheb et al., 2015). در کشور هند نیز نتایج حاصل از شش مدل برآورد ET_0 شامل تشت تبخیر، تشعشع، بلانی-کریدل و پنمن فائو، جنسن-هیز، مکینگ، پریستلی-تایلور و هارگریوز-سامانی با داده‌های حاصل از مدل پنمن-مانتیت فائو مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل‌های پنمن، هارگریوز-سامانی و پریستلی-تایلور بترتیب بیشترین همخوانی را با نتایج حاصله از مدل پنمن-مانتیت فائو داشته اما مدل‌های بلانی-کریدل، جنسن-هیز و تشعشع فائو ET_0 را بیشتر و مدل‌های مکینگ و تشت تبخیر آن را کمتر از مدل پنمن-مانتیت فائو برآورد کردند (Reddy et al., 2012). در تحقیقی که با استفاده از داده‌های بدست آمده از ۴۳۶۲ ایستگاه کلیماتولوژی در سراسر جهان انجام شد، مقادیر ET_0 محاسبه شده از یازده مدل دمایی برآورد ET_0 با داده‌های حاصله از مدل پنمن-مانتیت فائو مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل هارگریوز-سامانی دقیق‌ترین و مناسب‌ترین مدل و تورنت وایت کم‌دقت‌ترین و نامناسب‌ترین مدل برای برآورد ET_0 در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد (Almorox et al., 2015). با این حال، در تحقیقی که در جنوب اسپانیا انجام گرفت این نتیجه حاصل شد که مدل هارگریوز-سامانی در مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع بیش از ۵/۳ میلیمتر، مقدار ET_0 را کمتر و در مقادیر کوچکتر از آن، ET_0 را بیشتر برآورد می‌کند (Berengenda and Gavilan, 2005). در تحقیق دیگری در انگلیس، مقادیر ET_0 حاصله از مدل‌های هارگریوز-سامانی، پریستلی-تایلور، گرانجر-گری و پنمن-مانتیت فائو با داده‌های اندازه‌گیری شده از روش Eddy Covariance مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل‌های پنمن-مانتیت فائو و هارگریوز-سامانی در مقایسه با سایر مدل‌ها، بترتیب بیشترین و کمترین همخوانی را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند (Holder et al., 2018). مقادیر ET_0 بدست آمده از مدل پنمن-مانتیت فائو در شش کشور مدیترانه ای شامل

لایسیمتر مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل‌های پنمن-مانتیث و بلانی-کریدل فائو بترتیب بیشترین همخوانی را با داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر داشتند (نوری و همکاران، ۱۳۹۵). در تحقیق دیگری که در منطقه سیستان انجام شد مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع برآورد شده از مدل‌های بلانی-کریدل و پنمن-مانتیث فائو، جنسن-هیز، جنسن-هیز اصلاحی، مکینگ و هارگریوز-سامانی با داده‌های لایسیمتری مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل‌های بلانی-کریدل فائو و هارگریوز-سامانی بترتیب بیشترین و کمترین همخوانی را با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر داشتند (پیری، ۱۳۹۱).

مروری بر مطالعات انجام شده نشان دهنده تفاوت در میزان دقت و همخوانی مدل‌های برآورد ET_0 با داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر در مناطق مختلف بوده بطوریکه یک مدل ممکن است در منطقه‌ای بهتر از سایر مدل‌ها تبخیر-تعرق گیاه مرجع را برآورد نموده ولی در منطقه‌ای دیگر از دقت پایینی در برآورد آن برخوردار بوده و کارایی لازم را نداشته باشد. لذا لازم است قبل از استفاده از هر مدل در یک منطقه، کارایی و میزان دقت آن با داده‌های لایسیمتری مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته و ضمن واسنجی در محل و ارائه ضرایب اصلاحی مناسب برای منطقه مورد آزمایش، بهترین مدل برای آن منطقه انتخاب شود. اگرچه این امر تقریباً در اکثر مناطق ایران صورت گرفته اما واسنجی و ارائه ضرایب اصلاحی مناسب برای منطقه بشدت تابع شرایط اقلیمی بوده و در استان هرمزگان نیز تاکنون هیچگونه تحقیقی در این خصوص انجام نشده است. بنابراین، هدف از انجام این تحقیق ارزیابی میزان دقت و کارایی مدل‌های مختلف برآورد ET_0 و ارائه ضرایب اصلاحی مناسب برای مدل‌ها و معرفی بهترین مدل در منطقه حاجی‌آباد هرمزگان می باشد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به مدت چهار سال و به منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی حاجی‌آباد به عرض جغرافیایی ۲۷/۱۳ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۵۶/۲۲ درجه شرقی و ارتفاع ۹۲۰ متر از سطح دریا در شمال استان هرمزگان انجام گرفت. میانگین سالانه دمای هوا در حاجی‌آباد ۲۲/۳ درجه سانتیگراد و میانگین سالانه رطوبت نسبی آن ۴۰ درصد می باشد. شهرستان حاجی‌آباد دارای میانگین بارندگی سالانه ۲۲۶/۷ میلی‌متر و میزان تبخیر ۲۳۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد (مجبی، ۱۳۷۷). در سال اول آزمایش، اقدام به نصب یک دستگاه لایسیمتر زهکش دار مربع شکل به ابعاد ۳×۳ متر و عمق ۱۹۰ سانتیمتر در مرکز قطعه زمینی به مساحت ۲ هکتار که نماینده محل بود گردید (شکل ۱). بدین منظور ابتدا در مرکز زمین موردنظر گودالی به ابعاد

تبخیر تعرق گیاه مرجع را بترتیب ۱۴ و ۱۲/۸ درصد کمتر و مدل هارگریوز-سامانی آن را ۳۶ درصد بیشتر از داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر برآورد کردند. در تحقیق دیگری که در کرمان انجام شد نتایج تبخیر-تعرق محاسبه شده از شش مدل برآورد ET_0 شامل پنمن-مانتیث، بلانی-کریدل و تشعشع فائو، پنمن-کیمبرلی، مکینگ و هارگریوز-سامانی با داده‌های لایسیمتری مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل‌های تشعشع فائو و مکینگ بترتیب بیشترین و کمترین همخوانی را با داده‌های لایسیمتری داشتند (Bakhtiari et al., 2011). همچنین مدل‌های پنمن-مانتیث فائو، هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل فائو و مکینگ ET_0 را کمتر از داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر برآورد کردند. در اردبیل نیز نتایج حاصل از هجده مدل برآورد ET_0 با داده‌های لایسیمتری مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل بلانی-کریدل بیشترین همخوانی را با داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر داشت (رئوف و عزیز مبر، ۱۳۹۶). در تحقیق دیگری که در سنجند انجام شد توانایی مدل‌های پنمن-مانتیث، تشعشع و پنمن-اصلاح شده فائو، مکینگ، هارگریوز-سامانی و پرستلی-تایلور در برآورد ET_0 با استفاده از داده‌های لایسیمتری مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته و مشخص شد که مدل پنمن اصلاح شده فائو بالاترین دقت را در برآورد تبخیر-تعرق دارا بود (قمرنیا و همکاران، ۱۳۹۱). در مشهد نیز مقادیر ET_0 برآورد شده از مدل‌های جنسن-هیز و پنمن-مانتیث فائو با داده‌های لایسیمتری مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل پنمن-مانتیث فائو از دقت بالاتری در برآورد ET_0 در مقایسه با مدل جنسن-هیز برخوردار بود (موسوی بایگی و همکاران، ۱۳۸۹). دهقان و مکاری (۱۳۹۸) نیز در تحقیقی که در مشهد انجام دادند نتیجه گرفتند که در شرایط کمبود داده‌های سرعت باد و رطوبت نسبی، مدل والیانز اصلاح شده و در شرایطی که تنها داده‌های دما در دسترس باشد، مدل هارگریوز اصلاح شده بیشترین دقت را در مقایسه با مدل پنمن-مانتیث فائو داشته و می‌تواند به عنوان مدل‌های جایگزین مورد استفاده قرار گیرند. در زابل نیز نتایج حاصل از هشت مدل برآورد تبخیر-تعرق با نتایج حاصل از مدل پنمن-مانتیث فائو مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل پنمن ۱۹۴۸، پنمن فائو و هارگریوز بترتیب بیشترین همخوانی را با داده‌های حاصل از مدل پنمن-مانتیث فائو داشتند (Ahmadipour et al., 2019). در جیرفت نتایج تبخیر-تعرق گیاه مرجع برآورد شده با استفاده از مدل‌های بلانی-کریدل، تشت تبخیر، پنمن-مانتیث، پنمن و تشعشع فائو، پنمن-کیمبرلی، و هارگریوز سامانی با داده‌های لایسیمتری مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل تشت تبخیر فائو بیشترین همخوانی را با داده‌های لایسیمتری داشت (وحیدی، ۱۳۸۸). در تحقیقی در رفسنجان مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع برآورد شده از مدل‌های بلانی-کریدل، پنمن-مانتیث، پنمن و تشعشع فائو، پنمن-کیمبرلی و هارگریوز-سامانی با مقادیر اندازه‌گیری شده از

لایسیمتر هدایت و از آنجا در بشکه‌ای جمع‌آوری و حجم آن اندازه‌گیری شد. ارتفاع چمن همواره بین ۸ تا ۱۵ سانتی‌متر نگهداری و هنگامی که این ارتفاع به حدود ۱۵ سانتی‌متر می‌رسید سرزنی چمن انجام می‌شد. همچنین یک عدد تشتت تبخیر کلاس A در داخل چمن نصب و تبخیر از آن بطور روزانه اندازه‌گیری گردید. پارامترهای اقلیمی از قبیل دما و رطوبت نسبی هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی و بارندگی بطور روزانه در ایستگاه هواشناسی موجود در محل آزمایش اندازه‌گیری و با استفاده از آنها تبخیر-تعرق گیاه مرجع برای دوره‌های هفتگی توسط مدل‌های پنمن فائو (FAO-Pen)، بلانی-کریدل فائو (FAO-B-C)، تشعشع فائو (FAO-RAD) و تشتت تبخیر فائو (FAO-Pan)، پنمن-مانتیث فائو (FAO-P-M)، ایوانف (Ivan)، پاپاداکیس (Papa)، جنسن-هیز (J-H)، هارگریوز-ساماتی (H-S)، تورک (Turk) و مکینگ (Mac) محاسبه شد (جدول ۲).

ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع، R_n تشعشع خالص رسیده به سطح، R_s تشعشع رسیده به سطح زمین، R_a تشعشع برون زمینی، G شدت جریان گرما در خاک، T_{max} ، T_{min} و T بترتیب دمای حداقل، دمای حداکثر و میانگین دمای هوا، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع در مقابل دما، γ ثابت سایکرومتر، e_s فشار بخار اشباع هوا، e_a فشار بخار واقعی هوا، e_1 و e_2 به ترتیب فشار بخار اشباع در میانگین ماهانه حداقل و حداکثر دمای هوا در گرمترین ماه سال در منطقه، E ارتفاع محل از سطح دریا، n و N بترتیب تعداد ساعات آفتابی واقعی و حداکثر ساعات آفتابی محتمل، P نسبت متوسط ساعات آفتابی روزانه در ماه مورد نظر به کل ساعات آفتابی سال، RH_{max} ، RH_{min} و RH_{mean} بترتیب رطوبت نسبی حداقل، حداکثر و میانگین رطوبت نسبی هوا، U_2 ، u_d و u_n به ترتیب میانگین ۲۴ ساعته سرعت باد، سرعت باد در روز و سرعت باد در شب در ارتفاع دو متری، F فاصله تشتت از لبه پوشش گیاهی احاطه کننده در جهت وزش باد، E_p تبخیر از تشتت، K_p ضریب تشتت می‌باشند.

مقادیر هفتگی تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده از لایسیمتر و محاسبه شده از مدل‌های مختلف در دو سال اول آزمایش (۱۰۴ داده هفتگی) برای واسنجی مدل‌ها و نتایج سال سوم (۵۱ داده هفتگی) برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. پس از واسنجی مدل‌ها و مشخص شدن ضرایب اصلاحی از طریق رگرسیون خطی، مقادیر ET_0 اندازه‌گیری شده از لایسیمتر در سال سوم آزمایش را به عنوان متغیر مستقل در معادله رگرسیونی مربوط به هر مدل قرار داده و مقادیر ET_0 حاصله از آن مدل برآورد شدند. سپس از طریق رگرسیون خطی از مبداء مختصات، شیب خط رگرسیون و ضریب تبیین برای هر مدل در دوره ارزیابی بدست آمد.

کمی بزرگتر از لایسیمتر حفر شد. برای این کار ابتدا پروفیل خاک را به لایه‌های ۳۰ سانتی متری تقسیم و خاک هر لایه بطور جداگانه در مجاورت لایسیمتر قرار داده شد. پس از حفاری محل، سطوح داخلی و خارجی لایسیمتر به منظور جلوگیری از پوسیدگی قیرگونی گردید. در مرحله بعد، با استفاده از جرثقیل، لایسیمتر را در داخل گودال حفاری شده قرار داده و در کف آن بترتیب لایه‌هایی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر سنگریزه درشت، ۱۰ سانتی‌متر سنگریزه با ابعاد کوچکتر و ۱۰ سانتی‌متر شن ریخته شد. سپس یک توری گالوانیزه جهت جلوگیری از شسته شدن ذرات خاک بر روی آن قرار داده و خاک هر لایه مجدداً به جای اولیه برگردانده شد. پس از قرار دادن خاک هر لایه در داخل لایسیمتر، آن را فشرده و اشباع نموده تا نشست کند. سپس به منظور ایجاد یکنواختی خاک درون لایسیمتر با شرایط اطراف، به مدت یک سال لایسیمتر را رها نموده و در آن کشت صورت نگرفت. برای اندازه‌گیری آب زهکشی شده از لایسیمتر، اتاقکی در داخل زمین در فاصله ۱۵ متری آن احداث و از کف لایسیمتر به داخل اتاقک لوله کشی گردید. سپس در سه سال بعد، در داخل و مساحت ۹۰۰ متری اطراف لایسیمتر اقدام به کاشت چمن رقم برموداگراس نموده و پس از اینکه پوشش کاملی بر روی زمین ایجاد شد و ارتفاع چمن به حدود ۸ سانتیمتر رسید تبخیر-تعرق از آن بطور هفتگی و به روش بیلان آبی با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد.

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

در معادله فوق، ET تبخیر-تعرق گیاه مرجع حسب میلی‌متر، I ، P و D بترتیب عمق آب آبیاری، میزان بارندگی و عمق آب زهکشی شده از خاک درون لایسیمتر حسب میلی‌متر، θ_1 و θ_2 بترتیب رطوبت حجمی خاک در ابتدا و انتهای دوره هفتگی، n تعداد لایه‌های خاک، ضخامت هر لایه خاک و Δt فاصله زمانی بین دو اندازه‌گیری است.

قبل از اجرای آزمایش از خاک درون لایسیمتر در عمق ۰ تا ۱۵۰ و در فواصل ۳۰ سانتیمتری نمونه‌برداری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری گردید (جدول ۱). رطوبت خاک در داخل لایسیمتر تا عمق ۱۵۰ سانتیمتر و در فواصل ۳۰ سانتی متری به طور هفتگی و قبل از آبیاری به روش جرمی و با استفاده از مته‌ای باریک به قطر حدود ۲ سانتیمتر اندازه‌گیری گردید. در هر بار نمونه‌برداری سوراخ ایجاد شده با خاک نرم پر می‌شد و پس از مدت کوتاهی روی آن در اثر رشد چمن با گیاه پوشیده می‌شد. مقدار آب آبیاری از طریق کنتور نصب شده در مسیر آب ورودی به لایسیمتر و مقدار بارندگی با استفاده از باران سنج اندازه‌گیری گردید. آب زهکشی شده از لایسیمتر نیز توسط لوله‌ای به چاهک اندازه‌گیری موجود در فاصله ۱۶ متری



شکل ۱- مراحل نصب لایسیمتر در منطقه مورد آزمایش (حاجی آباد هرمزگان)

جدول ۱-مقادیر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک درون لایسیمتر در اعماق مختلف

| عمق خاک (سانتی‌متر) | | | | | ویژگی خاک |
|---------------------|--------|--------|---------|--------|--|
| ۱۵۰-۱۲۰ | ۱۲۰-۹۰ | ۹۰-۶۰ | ۶۰-۳۰ | ۳۰-۰ | |
| شن لومی | لوم | لوم | لوم رسی | لوم | بافت |
| ۱/۴۹ | ۱/۴۶ | ۱/۴۱ | ۱/۳۷ | ۱/۳۷ | جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتیمتر مکعب) |
| ۱/۰۹ | ۳/۱۱ | ۴/۶۲ | ۳/۶۱ | ۲/۸۵ | هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی زیمنس بر متر) |
| ۸/۰۳ | ۷/۸۶ | ۷/۸۹ | ۷/۸۷ | ۷/۶۷ | اسیدیته |
| ۳۱/۵۰ | ۲۹/۷۰ | ۲۷/۷۰ | ۲۲/۱۰ | ۲۹/۹۰ | کل مواد خنثی شونده (درصد) |
| ۶/۹۰ | ۱۱/۱۰ | ۱۳/۰۰ | ۲۱/۰۰ | ۱۲/۵۰ | ظرفیت تبادل کاتیونی (میلی‌اکی‌والان در صد گرم) |
| ۰/۲۴ | ۰/۳۵ | ۰/۴۵ | ۰/۵۱ | ۰/۶۷ | کربن آلی (درصد) |
| ۰/۰۵ | ۰/۰۷ | ۰/۰۹ | ۰/۱۲ | ۰/۱۱ | ازت کل (درصد) |
| ۲/۷۸ | ۲/۸۵ | ۲/۲۹ | ۱/۵۴ | ۱۵/۶۷ | فسفر قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم) |
| ۱۱/۰۰ | ۱۳۶/۰۰ | ۱۴۸/۰۰ | ۲۰۲/۰۰ | ۲۸۰/۰۰ | پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم) |

جدول ۲- مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_o) مورد بررسی در منطقه آزمایش و معادلات آنها

| Model | Equation | Reference |
|-----------|--|-----------------------------|
| FAO Pen | $ET_o = C \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} 0.27 \left(1 + \frac{u_2}{100} \right) (e_s - e_a) \right]$ $C = 0.68 + 0.0028 RH_{max} + 0.018 R_s - 0.68 u_d + 0.13 \frac{u_d}{u_n} + 0.0097 u_d \frac{u_d}{u_n} + 0.43 \times 10^{-4} RH_{max} R_s u_d$ | Doorenbos and Pruitt (1977) |
| FAO P-M | $ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$ | Allen et al. (1998) |
| FAO E-Pan | $ET_o = K_p \times E_p$ | Doorenbos and Pruitt (1977) |
| FAO B-C | $ET_o = a + b [P(0.46T + 8.13)]$ $a = 0.0043 RH_{min} - \frac{n}{N} - 1.41$ $b = 0.82 - 0.0041 RH_{min} + 1.07 \frac{n}{N} + 0.066 u_d - 0.006 RH_{min} \frac{n}{N} - 0.0006 RH_{min} \times u_d$ | Doorenbos and Pruitt (1977) |
| H-S | $ET_o = 0.0023 (T + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} \times R_a$ | Hargreaves-Samani (1985) |
| FAO Rad | $ET_o = C \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right)$ | Doorenbos and Pruitt (1977) |
| J-H | $ET_o = C_T (T - T_x) R_s$ $C_T = \frac{1}{C_1 + 7.6 C_H}$ $C_1 = 38 - \frac{2E}{305}$ $C_H = \frac{50}{e_2 - e_1}$ $T_x = -2.5 - 0.14 (e_2 - e_1) - \frac{E}{550}$ | Jensen (1983) |
| Mak | $ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s - 0.12$ | Alexandris (2008) |
| Turk | $ET_o = 0.013 \frac{T}{T + 15} (R_s + 50) \quad RH_{mean} > 50\%$ $ET_o = 0.013 \frac{T}{T + 15} (R_s + 50) \left(1 + \frac{50 - RH_{mean}}{70} \right) \quad RH_{mean} < 50\%$ | Alexandris (2008) |
| Ivan | $ET_o = 0.0018 (25 + T)^2 (100 - RH_{mean})$ | Goodwin (1991) |
| Papa | $ET_o = 0.5625 (e_s - e_a)$ | Goodwin (1991) |

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n d_i \quad (3)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(P_i - O_{avg})(O_i - O_{avg})]^2} \right] \quad (4)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(P_i - O_i - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \right)^2}{n-1} \quad (5)$$

در معادله‌های فوق d_i , P_i , O_i و O_{avg} تفاوت بین مقادیر ET_o اندازه‌گیری شده و برآورد شده از مدل، ET_o برآورد شده توسط مدل،

مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (Jacovides and Kontoyiannis, 1995)، شاخص توافق (d) (Fox,) (S²) و واریانس توزیع باقیمانده‌ها (Moazed et al., 2014) هم برای دوره واسنجی و هم برای دوره ارزیابی با استفاده از معادله‌های ۲ تا ۵ برای هر مدل محاسبه و برای مقایسه مقادیر ET_o محاسبه شده از مدل‌های مورد بررسی با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر مورد استفاده قرار گرفتند.

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

ET₀ اندازه گیری شده، متوسط ET₀ اندازه گیری شده و N تعداد داده ها می باشد.

نتایج و بحث

مقایسه مدل های برآورد ET₀ در دوره واسنجی

شکل های ۲ و ۳ معادله های رگرسیونی بین مقادیر میانگین هفتگی ET₀ اندازه گیری شده از لایسیمتر و برآورد شده از مدل های مختلف در دوره واسنجی (دو سال اول آزمایش) را نشان می دهد. پس از ارزیابی و صحت سنجی مدل ها، در صورتی که توانایی هر مدل در برآورد تبخیر-تعرق اثبات گردد می توان با قرار دادن تبخیر-تعرق برآورد شده از مدل در معادله رگرسیون مربوطه، مقدار ET₀ را که از روش بیان آبی انتظار می رود و از دقت و اطمینان بالایی نیز برخوردار است بدست آورده و در برنامه ریزی آبیاری از آن بهره گرفت. بهترین مدل برای برآورد ET₀ بر مبنای رگرسیون خطی مدلی است که از ضریب تبیین (R²) بالاتری برخوردار بوده و عرض از مبدا (a) نزدیک به صفر و شیب خط (b) نزدیک به یک داشته باشد (Moazed et al., 2014; Djaman et al., 2016; Raof and Azizi Mobaser, 2019). همچنانکه در این شکل ها نشان داده شده است اکثر مدل ها R² بالایی دارند. معینا مدل های بلانی-کریدل فائو، پنمن-مانتیت فائو و جنسن-هیز از R² بالاتری در مقایسه با سایر مدل ها برخوردار بوده و شیب خط رگرسیون آنها تقریباً به یک نزدیک است. مدل های ایوانف، تورک و پنمن فائو کمترین R² را در بین مدل های ارائه شده دارند.

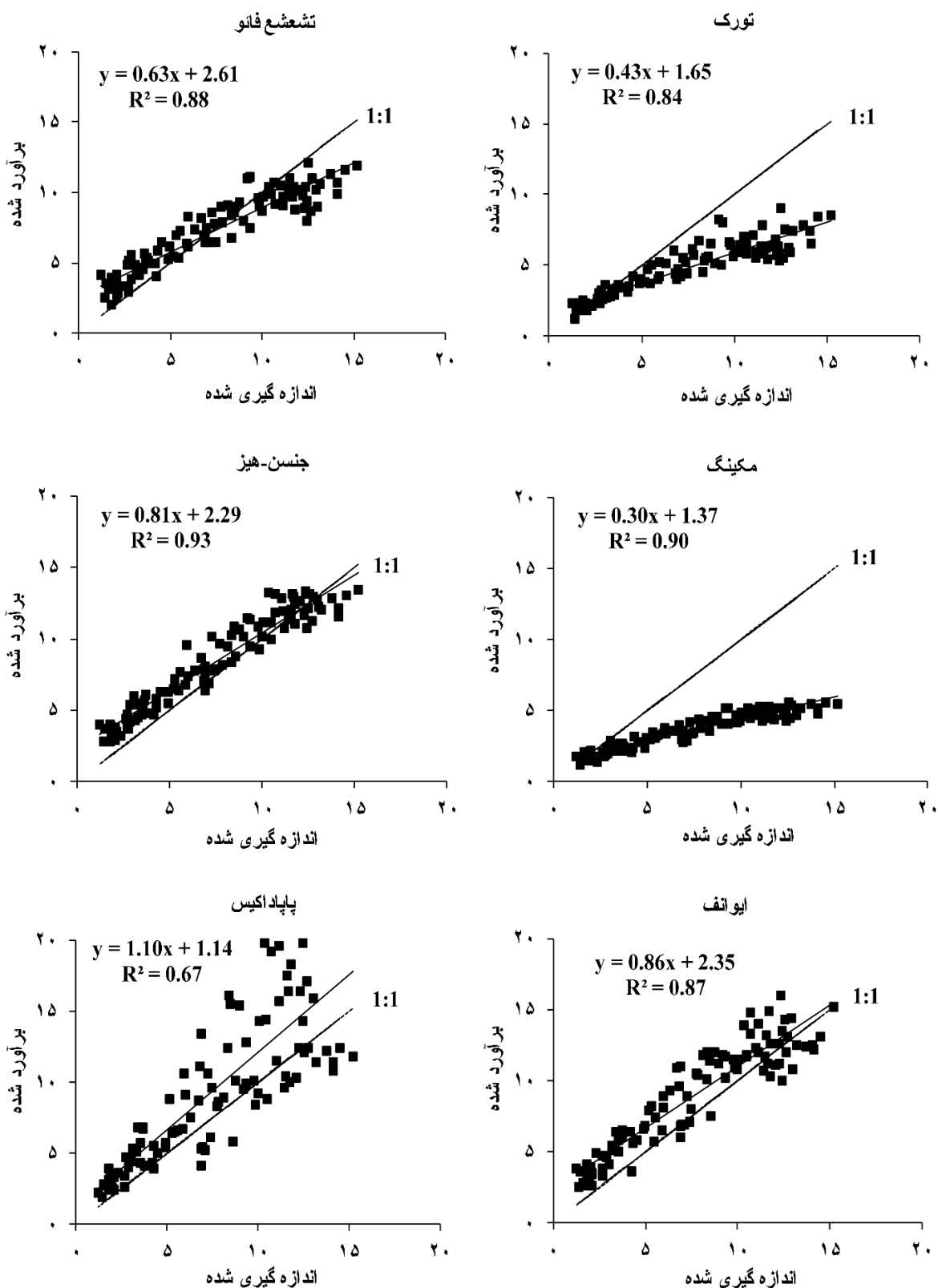
مقایسه داده ها با خط ۱:۱ نشان می دهد مدل های تورک و مکینگ در مقادیر ET₀ بیش از ۲ میلی متر در روز، هارگریوز-سامانی در مقادیر بیش از ۶ میلی متر در روز و تشت تبخیر تقریباً در اکثر دوره ها تبخیر-تعرق را کمتر از مقدار اندازه گیری شده و مدل های پنمن اصلاح شده، ایوانف و پاپاداکیس همواره آن را بیشتر برآورد نموده اند. میزان برآورد کمتر یا بیشتر از واقع تبخیر-تعرق توسط مدل های مختلف با استفاده از شاخص میانگین خطای اریب مدل ها مشخص می شود. مقایسه میانگین خطای اریب محاسبه شده برای مدل های مختلف (جدول ۳) نشان می دهد که مدل های مکینگ، تورک، هارگریوز-سامانی و تشت تبخیر بطور متوسط در طول سال مقدار ET₀ را بترتیب ۳/۶۷، ۲/۵۰، ۱/۹۰ و ۱/۸۱ میلی متر در روز کمتر از مقدار اندازه گیری شده از لایسیمتر و مدل های پاپاداکیس، پنمن اصلاح شده، ایوانف و جنسن-هیز آن را بترتیب ۱/۸۶، ۱/۵۳، ۱/۳۵ و ۰/۹۴ میلی متر در روز بیشتر برآورد کرده اند. مدل های تشعشع، بلانی-کریدل، و پنمن-مانتیت فائو در مقایسه با سایر مدل ها از دقت بیشتری در برآورد ET₀ برخوردار بوده بطوریکه مدل های تشعشع و بلانی-کریدل فائو مقدار ET₀ را بترتیب به میزان ۰/۰۴ و ۰/۲۱

میلی متر در روز کمتر و مدل پنمن-مانتیت فائو آن را ۰/۲۶ میلی متر در روز بیشتر از مقدار اندازه گیری شده برآورد کرده اند.

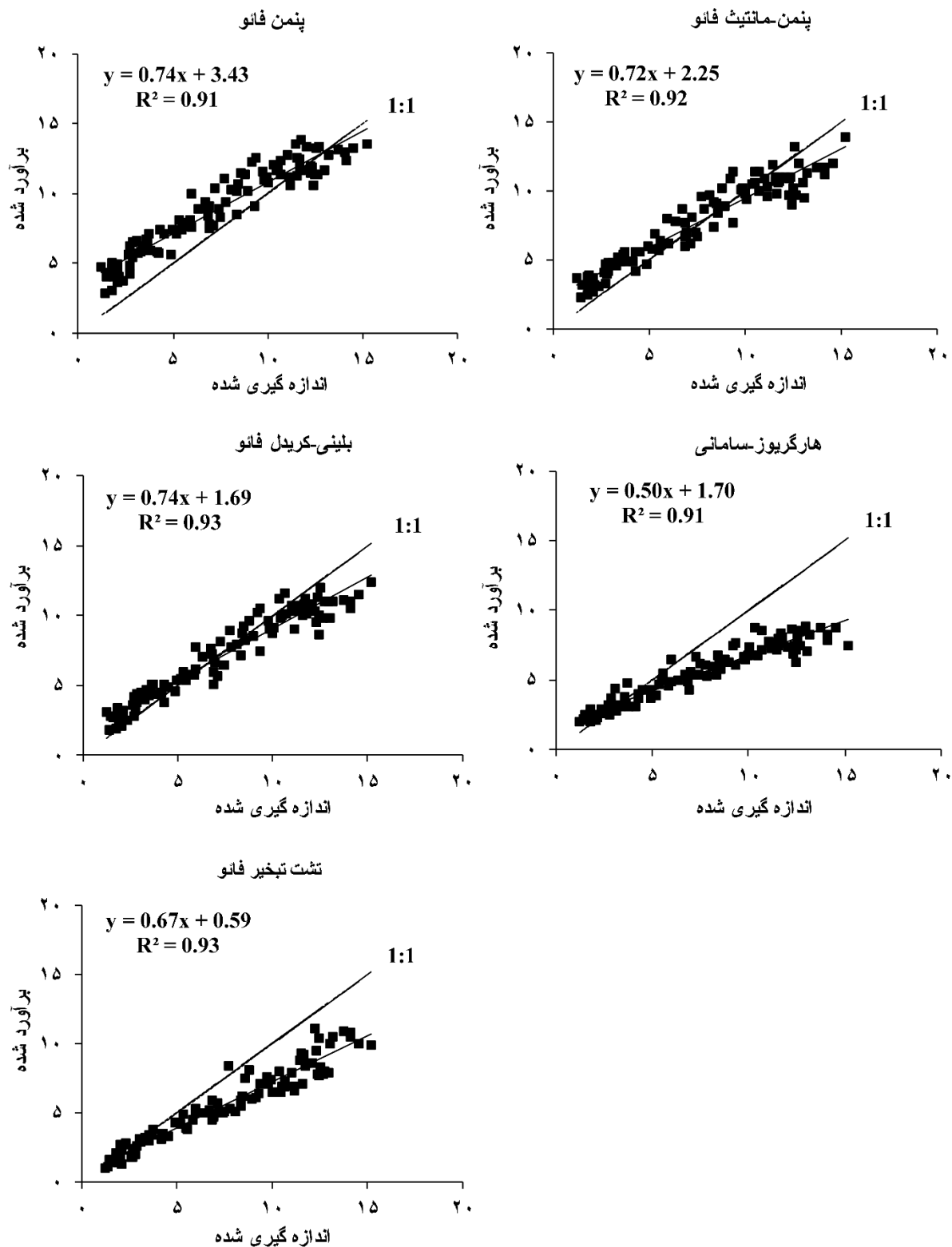
برآورد بیشتر یا کمتر از واقع ET₀ توسط مدل های مختلف بوسیله محققین دیگر نیز گزارش شده است. برای مثال، تانگ و همکاران عنوان نمودند که مدل هارگریوز-سامانی در مناطق خشک مقدار ET₀ را کمتر از مقدار واقعی و در مناطق مرطوب آن را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می کند (Tang et al., 2018). لیو و همکاران در تحقیقی نتیجه گرفتند که مدل هارگریوز-سامانی در مقادیر ET₀ بیش از ۶ میلی متر در روز و مدل های مکینگ و تورک در مقادیر ET₀ بیش از ۳ میلی متر در روز، مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع را کمتر از واقع برآورد می کنند (Liu et al., 2017). بنلی و همکاران نیز نتیجه گرفتند که مدل هارگریوز-سامانی در مقادیر ET₀ بیش از ۷ میلی متر در روز مقدار تبخیر-تعرق را کمتر برآورد می کند (Benli et al., 2010). برنجندا و گاویلان نیز در تحقیقی که در جنوب اسپانیا انجام دادند متوجه شدند که مدل هارگریوز در مقادیر ET₀ بیش از ۵/۳ میلی متر در روز مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع را کمتر و در مقادیر کوچکتر از آن، ET₀ را بیشتر برآورد می کند (Berengenda and Gavilan, 2005). یودر و همکاران نیز در تحقیقی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مدل پنمن فائو مقدار ET₀ را بیشتر و مدل مکینگ آن را کمتر از مقادیر اندازه گیری شده از لایسیمتر برآورد می کنند (Yoder et al., 2005). برآورد بیش از اندازه ET₀ با استفاده از مدل پنمن توسط آلن و همکاران و بوگوسکی و بدنورز و با استفاده از مدل جنسن-هیز توسط آنتونوپولوس و آنتونوپولوس نیز گزارش شده است (Allen et al., 2008; Antonopoulos and Antonopoulos, 2018; Boawsky and Bednorz, 2014).

علیرغم اینکه از R² بطور وسیعی در ارزیابی درجه تناسب مدل ها در تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده می شود این شاخص بیش از حد به داده های پرت حساسیت نشان داده اما به روند افزایشی تفاوت های نسبی بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده حساسیت ندارد (Moazed et al., 2014). بنابراین، استفاده از این شاخص به تنهایی، می تواند منجر به قضاوت نادرست در تعیین درجه تناسب یک مدل برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع و تصمیم گیری اشتباه در انتخاب یا رد آن مدل گردد.

نظر به معایب ارائه شده برای R² و از آنجایی که R² مدل های مورد بررسی اکثراً بالا بوده و به هم نزدیک است، برای افزایش دقت در ارزیابی و انتخاب بهترین مدل یا مدل ها برای منطقه مورد آزمایش، علاوه بر رگرسیون خطی از شاخص های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، شاخص توافق (d) و واریانس توزیع باقیمانده ها (S²) نیز استفاده شد (جدول ۳).



شکل ۲- مقایسه بین مقادیر میانگین هفتگی تبخیر-تعرق گیاه مرجع اندازه گیری شده از لایسیمتر و برآورد شده از مدل های تشعشعی (تورک، تشعشع فانو، جنسن-هیز و مکینگ) و رطوبتی (پاپاداکیس و ایوانف) در دوره واسنجی (دو سال اول آزمایش)



شکل ۳- مقایسه بین مقادیر میانگین هفتگی تبخیر-تعرق گیاه مرجع اندازه گیری شده از لایسیمتر و برآورد شده از مدل های پنمن-مانتیتث، پنمن، تشت تبخیر و بلانی-کریدل فانو و هارگریوز-سامانی در دوره واسنجی (دو سال اول آزمایش)

مدل‌های بلانی-کریدل و پنمن-مانتیت فائو و جنسن-هیز بیشترین d را نیز داشته‌اند. کمترین S^2 نیز بترتیب مربوط به مدل‌های جنسن-هیز، بلانی-کریدل، پنمن و پنمن-مانتیت فائو بوده است.

همانگونه که در جدول ۳ نشان داده شده است مدل‌های بلانی-کریدل، پنمن-مانتیت فائو و جنسن-هیز بترتیب کمترین RMSE را به خود اختصاص داده‌اند. کمترین MBE نیز بترتیب متعلق به مدل‌های تشعشع فائو، بلانی-کریدل و پنمن-مانتیت فائو بوده است.

جدول ۳- مقادیر جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای اریب، شاخص توافق، واریانس توزیع باقیمانده‌ها، ضریب تبیین و شیب خط رگرسیون برای مدل‌های مختلف برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع در دوره واسنجی (دو سال اول آزمایش)

| مدل | جذر میانگین مربعات خطا | میانگین خطای اریب | شاخص توافق | واریانس توزیع باقیمانده‌ها | ضریب تبیین | شیب خط رگرسیون |
|------------------|------------------------|-------------------|------------|----------------------------|------------|----------------|
| تشت تبخیر فائو | ۲/۳۹ | -۱/۸۳ | ۰/۸۸ | ۲/۳۴ | ۰/۹۳ | ۰/۶۷ |
| پنمن-مانتیت فائو | ۱/۴۴ | ۰/۲۴ | ۰/۹۶ | ۲/۰۲ | ۰/۹۲ | ۰/۷۲ |
| پنمن فائو | ۲/۰۸ | ۱/۵۳ | ۰/۹۲ | ۲/۰۰ | ۰/۹۱ | ۰/۷۴ |
| بلانی-کریدل فائو | ۱/۳۵ | -۰/۲۱ | ۰/۹۶ | ۱/۷۸ | ۰/۹۳ | ۰/۷۴ |
| هارگریوز-سامانی | ۲/۸۳ | -۱/۹۰ | ۰/۸۰ | ۴/۴۱ | ۰/۹۱ | ۰/۵۰ |
| تشعشع فائو | ۱/۷۵ | -۰/۰۴ | ۰/۹۳ | ۳/۰۵ | ۰/۸۸ | ۰/۶۳ |
| جنسن-هیز | ۱/۵۰ | ۰/۹۴ | ۰/۹۶ | ۱/۳۷ | ۰/۹۳ | ۰/۸۱ |
| مکینگ | ۴/۶۴ | -۳/۶۷ | ۰/۴۸ | ۸/۰۵ | ۰/۹۰ | ۰/۳۰ |
| تورک | ۳/۴۸ | -۲/۵۰ | ۰/۷۰ | ۵/۸۸ | ۰/۸۵ | ۰/۴۳ |
| ایوانف | ۲/۰۰ | ۱/۳۵ | ۰/۹۳ | ۲/۱۵ | ۰/۸۷ | ۰/۸۶ |
| پاپاداکیس | ۳/۶۲ | ۱/۸۶ | ۰/۸۵ | ۹/۶۶ | ۰/۶۷ | ۱/۱۰ |

را داشته‌اند. اگرچه مدل‌های ایوانف و پاپاداکیس در بعضی شاخص‌ها از قبیل واریانس توزیع باقیمانده‌ها وضعیت مناسب‌تری در مقایسه با مدل‌های بلانی-کریدل و پنمن-مانتیت فائو داشته‌اند اما از نظر سایر شاخص‌ها در وضعیت ضعیف‌تری قرار گرفته‌اند.

با توجه به استفاده از شاخص‌های مختلف برای ارزیابی مدل‌ها، رتبه بندی هر مدل از نظر میزان دقت و درجه تناسب آن مدل برای برآورد ET_0 در منطقه مورد آزمایش بر اساس جایگاه و رتبه کسب شده توسط مدل از هر شاخص انجام شد. برای این منظور، مدلی که از ضریب تبیین بالاتر و شیب خط رگرسیون نزدیک‌تر به یک برخوردار بود در رتبه بالاتر قرار گرفت. همچنین مدلی که کمترین مقدار هر یک از شاخص‌های RMSE یا S^2 را داشت در رتبه یک و مدلی که بیشترین مقدار این شاخص‌ها را دارا بود در رتبه یازده قرار داده شد. از نظر شاخص‌های d و MBE نیز مدلی که نزدیک‌ترین d به یک یا نزدیکترین MBE به صفر را داشت در رتبه یک و مدلی که شاخص d آن از یک دورترین و یا MBE آن از صفر دورترین بود در رتبه یازده قرار گرفتند. پس از رتبه‌بندی مدل‌ها از نظر شاخص‌های مختلف، رتبه نهایی هر مدل با در نظر گرفتن رتبه‌های آن مدل در شاخص‌های مختلف تعیین (جدول ۵) و بر اساس آن بهترین مدل‌ها برای منطقه مورد آزمایش انتخاب شدند.

مقایسه مدل‌های برآورد ET_0 در دوره ارزیابی

مقایسه شاخص‌های آماری مورد استفاده برای سنجش کارایی مدل‌ها در دوره‌های واسنجی (جدول ۳) و ارزیابی (جدول ۴) نشان دهنده کاهش جذر میانگین مربعات خطا، واریانس توزیع باقیمانده‌ها و افزایش شاخص توافق در اثر واسنجی مدل‌ها و استفاده از ضرایب اصلاحی ارائه شده برای آنها می‌باشد. واسنجی مدل‌ها در اکثر مدل‌ها منجر به کاهش ضریب تبیین اما نزدیک‌تر شدن شیب خط رگرسیون آنها به یک شده است. البته در بعضی مدل‌ها مثل بلانی-کریدل فائو عمل واسنجی تأثیر چندانی بر ضریب تبیین نداشته اما موجب نزدیک‌تر شدن شیب خط رگرسیون به یک گردیده است. بنابراین، می‌توان گفت که واسنجی مدل‌ها دقت آنها در برآورد ET_0 را افزایش داده است. نتایج مقایسه مدل‌ها در دوره ارزیابی (جدول ۴) همچنین نشان داد که مدل‌های بلانی-کریدل و پنمن-مانتیت فائو ضمن برخوردار بودن از ضریب تبیین بالا، نزدیکترین شیب خط رگرسیون به یک را داشته و بترتیب کمترین جذر میانگین مربعات خطا و بیشترین میزان شاخص توافق را در بین مدل‌های مورد ارزیابی به خود اختصاص داده‌اند. این مدل‌ها همچنین پس از مدل‌های پاپاداکیس و ایوانف کمترین واریانس توزیع باقیمانده‌ها را به خود اختصاص داده و پس از مدل تشعشع فائو بترتیب کمترین میزان میانگین خطای اریب

جدول ۴- مقادیر جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای اریب، شاخص توافق، واریانس توزیع باقیمانده‌ها، ضریب تبیین و شیب خط رگرسیون برای مدل‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در دوره ارزیابی (سال سوم آزمایش)

| مدل | جذر میانگین مربعات خطا | میانگین خطای اریب | شاخص توافق | واریانس توزیع باقیمانده‌ها | ضریب تبیین | شیب خط رگرسیون |
|------------------|------------------------|-------------------|------------|----------------------------|------------|----------------|
| تشت تبخیر فائو | ۲/۲۶ | -۱/۸۲ | ۰/۹۴ | ۱/۷۸ | ۰/۹۹ | ۰/۷۳ |
| پنمن-مانتیت فائو | ۱/۱۳ | ۰/۲۵ | ۰/۹۹ | ۱/۲۲ | ۰/۸۶ | ۰/۹۶ |
| پنمن فائو | ۱/۸۶ | ۱/۵۴ | ۰/۹۷ | ۱/۰۹ | ۰/۶۸ | ۱/۱۰ |
| بلانی-کریدل فائو | ۱/۰۶ | -۰/۲۰ | ۰/۹۹ | ۱/۰۹ | ۰/۹۲ | ۰/۹۲ |
| هارگریوز-سامانی | ۲/۷۳ | -۱/۸۸ | ۰/۹۰ | ۳/۹۳ | ۰/۸۳ | ۰/۶۸ |
| تشعشع فائو | ۱/۴۶ | -۰/۰۲ | ۰/۹۷ | ۲/۱۳ | ۰/۷۵ | ۰/۹۱ |
| جنسن-هیز | ۱/۲۱ | ۰/۹۵ | ۰/۹۹ | ۰/۵۵ | ۰/۸۸ | ۱/۰۶ |
| مکینگ | ۴/۵۸ | -۳/۶۴ | ۰/۷۳ | ۷/۷۱ | ۰/۷۰ | ۰/۴۵ |
| تورک | ۳/۳۷ | -۲/۴۸ | ۰/۸۵ | ۵/۲۱ | ۰/۷۸ | ۰/۶۰ |
| ایوانف | ۱/۴۷ | ۱/۳۶ | ۰/۹۸ | ۰/۳۰ | ۰/۸۹ | ۱/۱۱ |
| پاپاداکیس | ۱/۹ | ۱/۸۶ | ۰/۹۸ | ۰/۱۶ | ۰/۹۸ | ۱/۲۲ |

جدول ۵- رتبه‌بندی مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET₀) مورد بررسی در منطقه حاجی آباد هرمزگان بر اساس شاخص‌های مختلف در دوره ارزیابی (سال سوم آزمایش)

| مدل | رگرسیون خطی | جذر میانگین مربعات خطا | میانگین خطای اریب | شاخص توافق | واریانس توزیع باقیمانده‌ها | رتبه نهایی |
|------------------|-------------|------------------------|-------------------|------------|----------------------------|------------|
| تشت تبخیر فائو | ۳ | ۸ | ۷ | ۴ | ۶ | ۸ |
| پنمن-مانتیت فائو | ۵ | ۲ | ۳ | ۱ | ۵ | ۲ |
| پنمن فائو | ۱۰ | ۶ | ۶ | ۳ | ۴ | ۷ |
| بلانی-کریدل فائو | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۴ | ۱ |
| هارگریوز-سامانی | ۷ | ۹ | ۹ | ۵ | ۸ | ۹ |
| تشعشع فائو | ۸ | ۴ | ۱ | ۳ | ۷ | ۶ |
| جنسن-هیز | ۴ | ۳ | ۴ | ۱ | ۳ | ۳ |
| مکینگ | ۱۱ | ۱۱ | ۱۱ | ۷ | ۱۰ | ۱۱ |
| تورک | ۹ | ۱۰ | ۱۰ | ۶ | ۹ | ۱۰ |
| ایوانف | ۶ | ۵ | ۵ | ۲ | ۲ | ۵ |
| پاپاداکیس | ۲ | ۷ | ۸ | ۲ | ۱ | ۴ |

مکینگ همخوانی خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر نشان نداده و استفاده از آنها در منطقه آزمایش و مناطق مشابه از نظر اقلیمی منجر به ایجاد خطای قابل ملاحظه در برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع شده و استفاده از آنها توصیه نمی‌شود.

جدول ۶ مقادیر سالانه ET₀ برآورد شده از لایسیمتر و مدل‌های مختلف و درصد خطای هر مدل در برآورد ET₀ در دوره ارزیابی را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، مقدار سالانه ET₀ اندازه‌گیری شده از لایسیمتر ۲۵۷۴/۶ میلی‌متر بوده است. بعضی از مدل‌ها میزان ET₀ را بیشتر و بعضی دیگر آن را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده از لایسیمتر برآورد کرده‌اند. بیشترین میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع (۳۲۳۷/۰ میلی‌متر) توسط مدل پاپاداکیس و کمترین آن توسط مدل

با توجه به رتبه‌بندی مدل‌ها می‌توان گفت مدل‌های بلانی-کریدل و پنمن-مانتیت فائو واسنجی شده با ضرایب اصلاحی ارائه شده در معادلات رگرسیون مربوطه (شکل ۳) که از نظر شاخص‌های مختلف، جایگاه بهتری داشته و همچنین از R² بالاتر و شیب خط رگرسیون نزدیک‌تر به یک برخوردار بوده‌اند به ترتیب به عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها برای منطقه مورد آزمایش و مناطق با شرایط اقلیمی مشابه پیشنهاد می‌گردند. مزیت مدل بلانی-کریدل بر پنمن-مانتیت این است که این مدل ساده‌تر بوده و به داده‌ها و پارامترهای اقلیمی کمتری نیاز داشته و در مناطقی با داده‌های اقلیمی محدود نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس شاخص‌های مختلف، مدل‌های تشت تبخیر فائو، هارگریوز-سامانی، پنمن فائو، تورک و

ایوانف، جنسن-هیز و پنمن-مانتیث فائو به ترتیب مقدار سالانه تبخیر-تعرق گیاه مرجع را ۲۵/۷، ۲۱/۴، ۱۸/۸، ۱۳/۲ و ۳/۵ درصد بیشتر برآورد کرده‌اند.

مکینگ (۱۲۷۳/۶ میلی‌متر) برآورد شده است. مدل‌های مکینگ، تورک، تشت تبخیر، هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل و تشعشع فائو به ترتیب مقدار سالانه تبخیر-تعرق گیاه مرجع را ۵۰/۵، ۳۴/۳، ۲۵/۲، ۲۶/۰ و ۲/۷ و ۰/۳۳ درصد کمتر و مدل‌های پاپاداکیس، پنمن فائو،

جدول ۶- مقادیر سالانه تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) اندازه‌گیری شده از لایسیمتر و برآورد شده از مدل‌های مختلف در دوره ارزیابی و درصد

خطای هر مدل در برآورد ET_0

| خطا (درصد) | تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر) | مدل |
|---------------|------------------------------------|------------------|
| -۲۵/۲ | ۱۹۲۴/۸ | تشت تبخیر فائو |
| ۳/۵ | ۲۶۶۵/۱ | پنمن-مانتیث فائو |
| ۲۱/۴ | ۳۱۲۵/۵ | پنمن فائو |
| -۲/۷ | ۲۵۰۳/۸ | بلانی-کریدل فائو |
| -۲۶/۰ | ۱۹۰۴/۶ | هارگریوز-سامانی |
| -۰/۳۳ | ۲۵۶۶/۱ | تشعشع فائو |
| ۱۳/۲ | ۲۹۱۴/۱ | جنسن-هیز |
| -۵۰/۵ | ۱۲۷۳/۶ | مکینگ |
| -۳۴/۳ | ۱۶۹۱/۰ | تورک |
| ۱۸/۸ | ۳۰۵۹/۷ | ایوانف |
| ۲۵/۷ | ۳۲۳۷/۰ | پاپاداکیس |
| - | ۲۵۷۴/۶ | لایسیمتر |

لایسیمتری داشته و ET_0 را با دقت بیشتری برآورد نمودند. همچنین بعضی از مدل‌ها مقدار تبخیر-تعرق را کمتر و بعضی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد نمودند. مدل‌های رطوبتی ایوانف و پاپاداکیس، مدل تشعشعی جنسن-هیز و مدل ترکیبی پنمن فائو ET_0 را بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌های تشعشعی تورک و مکینگ، مدل دمایی هارگریوز-سامانی و مدل تشت تبخیر فائو آن را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر برآورد کردند. بنابراین، با توجه به اینکه مدل‌های بلانی-کریدل و پنمن-مانتیث فائو از دقت و کارایی بالاتری در برآورد ET_0 برخوردار بودند این مدل‌ها بترتیب به عنوان بهترین مدل‌ها برای برآورد ET_0 در منطقه مورد آزمایش و مناطق مشابه از نظر اقلیمی پیشنهاد می‌شوند. مزیت مدل بلانی-کریدل بر سایر مدل‌های یاد شده این است که به داده‌های کمتری نیاز دارد و می‌تواند در مناطقی با داده‌های اقلیمی محدود مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

برخود لازم می‌دانیم از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان جهاد کشاورزی و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی هرمزگان به خاطر تامین مالی و خدمات پشتیبانی این تحقیق، پرسنل آزمایشگاه بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و همچنین کارکنان ایستگاه

مقایسه مقادیر خطای مدل‌های ذکر شده در برآورد تبخیر-تعرق سالانه گیاه مرجع بیانگر این است که مدل‌های بلانی-کریدل و پنمن-مانتیث فائو علاوه بر برآورد دقیق‌تر ET_0 هفتگی، در مقایسه با سایر مدل‌ها، از خطای کمتری در برآورد تبخیر-تعرق سالانه گیاه مرجع در منطقه مورد آزمایش برخوردار بوده‌اند. استان هرمزگان دارای آب و هوای گرم و خشک بوده و بخش اعظم محصولات باغی این استان را گیاهان همیشه سبز از قبیل مرکبات، خرما، انبه و نباتات گرمسیری تشکیل می‌دهد که در تمام طول سال سبز و در حال رشد می‌باشند. همچنین برخلاف بیشتر استان‌ها، در این استان علاوه بر فصول بهار و تابستان، در پاییز و زمستان نیز محصولات زراعی خارج از فصل تولید می‌شود. لذا چنانچه هدف برآورد نیاز آبی سالانه درختان و یا برآورد فصلی آب مورد نیاز گیاهان زراعی باشد می‌توان از این مدل‌ها برای برآورد سالانه یا فصلی تبخیر-تعرق گیاه مرجع که اولین مرحله در تعیین نیاز آبی گیاهان در روش فائو می‌باشد در منطقه مورد آزمایش و مناطق با شرایط اقلیمی مشابه استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شده از مدل‌های مختلف با داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر نشان داد که مدل‌های بلانی-کریدل و پنمن-مانتیث فائو بترتیب همخوانی بیشتری را با داده‌های

- Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*. 21/22:17-28.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Almorox, J., Quej, V.H. and Marti, P. 2015. Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. *Journal of Hydrology*. 528:514-522.
- Antonopoulos, V.Z. and Antonopoulos, A.V. 2018. Evaluation of different methods to estimate monthly reference evapotranspiration in a Mediterranean area. *Water Utility Journal* 18: 61-77.
- Bakhtiari, B., Ghahreman, N., Liaghat, A.M. and Hoogemboom, G. 2011. Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. *Journal of Agricultural Science & Technology*. 13:233-237.
- Benli, B., Bruggeman, A., Oweis, T. and Ustun, H. 2010. Performance of Penman-Monteith FAO 56 in a semiarid highland environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 136(11): 757-765.
- Berengenda, J. and Gavilan, P. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *J. of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(2):147-163.
- Djaman, K., Tabari, H., Balde, A.B., Diop, L., Futakuchi, K. and Irmak, S. 2016. Analyses, calibration and validation of evapotranspiration models to predict grass-reference evapotranspiration in the Senegal river delta. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 8: 82-94.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24. FAO, Rome, Italy.
- Fisher, J.B., Whittaker, R.J. and Malhi, Y. 2011. ET come home: potential evapotranspiration in geographical ecology. *Global Ecology and Biogeography*. 20:1-18.
- Fox, D.G. 1981. Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance. *Bulletin American Meteorological Society*. 62(5): 599-609.
- Ghamarnia, H., Mousabeygi, F., Amiri, S. and Amirkhani, D. 2015. Evaluation of a few evapotranspiration models using lysimetric measurements in a semi-arid climate region. *International Journal of Plant & Soil Science*.
- تحقیقات کشاورزی حاجی آباد بویژه آقای صادق بهرامی به خاطر کمک‌های بی دریغ خود تشکر و قدردانی نماییم.
- ### منابع
- پیری، ح. ۱۳۹۱. ارزیابی روش‌های محاسباتی تبخیر و تعرق پتانسیل با داده‌های لایسیمتر (مطالعه موردی دشت سیستان). *مجله مهندسی آبیاری و آب*، سال سوم، شماره نهم، صفحه‌های ۵۰-۶۲.
- رئوف، م. و عزیز میسر، ج. ۱۳۹۶. ارزیابی هجده مدل تبخیر و تعرق مرجع در شرایط آب و هوایی اردبیل. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، جلد ۲۴، شماره ۶، صفحه‌های ۲۴۱-۲۲۷.
- دهقان، ه. و مکاری، م. ۱۳۹۸. ارزیابی و اصلاح مدل‌های والیانتر برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در شرایط کمبود داده. *نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران*، سال نهم، شماره سی و ششم، صفحه‌های ۸۶ تا ۹۷.
- قمرنیا، ه.، رضوانی، س.و. و فتحی، ب. ۱۳۹۱. ارزیابی و واسنجی مدل‌های تبخیر و تعرق گیاه مرجع با توجه به اثر دوره محاسباتی برای اقلیم نیمه خشک سرد. *مجله مدیریت آب و آبیاری*، دوره ۲، شماره ۲، صفحه‌های ۳۷-۲۵.
- محبی، عبدالحمید. ۱۳۷۷. ایستگاه تحقیقات کشاورزی حاجی آباد. چاپ مرکز تحقیقات کشاورزی هرمزگان.
- موسوی بایگی، س.م.، اشرف، ب. و میان‌آبادی، آمنه. 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*، دوره ۱۷، شماره ۴، صفحه‌های ۱۰۵-۸۷.
- نوری، ح.، بادیه‌نشین، ع. و محمدی محمدآبادی، ا. ۱۳۹۵. ارزیابی روش‌های محاسباتی تبخیر و تعرق گیاه مرجع و تعیین تبخیر و تعرق گیاه پسته در رفسنجان. *نشریه هواشناسی کشاورزی*، جلد ۴، شماره ۲، صفحه‌های ۸۱-۷۷.
- وحیدی، ع. ۱۳۸۸. ارزیابی روش‌های مختلف تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع (چمن) با استفاده از سنجش‌های لایسیمتر وزنی. *مجموعه مقالات دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر*، کرمان، دانشگاه شهید باهنر.
- Ahmadipour, A., Shaibani, P., Mostafavi, S.A. 2019. Assessment of empirical methods for estimating potential evapotranspiration in Zabol Synoptic Station by REF-ET model. *Mediatech Journal* 3(1): 1-4.
- Alexandris, S., Stricevic, R. and Petcovic, S. 2008.

- Engineering. 38 (C2): 421-437.
- Ragheb, H.M.A., Gomah, H.H., Hassanein, M.K. and Hassan, A.M.A. 2015. Validation of reference evapotranspiration models using lysimeters under arid climatic conditions. *Assiut Journal of Agricultural Sciences* 46(2): 210-228.
- Raof, M. and Azizi Mobaser, J. 2019. Reference evapotranspiration estimation using locally adjusted coefficient of Angstrom's radiation model in an arid-cold region. *Journal of Agricultural Science and Technology* 21(2): 487-499.
- Reddy, K.C.S., Jyothy, S.A. and Mallikarjuna, P. 2012. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop coefficients for groundnut crop. *IOSR Journal of Engineering*. 2(6):35-42.
- Steduto, P., Caliendo, A., Rubino, P., Ben Mechlia, N., Masmoudi, M., Martinez-Cob, A., Jose Faci, M., Rana, G., Mastroilli, M., El Mourid, M., Karrou, M., Kanber, R., Kirda, C., El-Quosi, D., El-Askari, K., Ait Ali, M., Zareb, D. and Snyder, R.L. 1996. Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the Mediterranean region. In: *Proceedings of international conference on evapotranspiration and irrigation scheduling*, San Antonio, Texas, 3-6 November 1996, pp. 357-363.
- Tang, P., Xu, B., Gao, Z., Li, H., Gao, X. and Wang, C. 2018. Estimating reference crop evapotranspiration with elevation based on an improved HS model. *Hydrology Research*. (In press). DOI: 10.2166/nh.2018.022.
- Yoder, R.E., Odhiambo, L.O. and Wight, W.C. 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.
- 5(2):100-109.
- Goodwin, C.R. 1991. Tidal-Flow, Circulation, and Flushing Changes Caused by Dredge and Fill in Hillsborough Bay, Florida. *US Geological Survey Water-Supply Paper* 2376, 49 p.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*. 1: 96-99.
- Holder, A.J., Mccalmon, J.P., Mcnamara, N.P., Rowe, R. and Donnison, I.S. 2018. Evapotranspiration model comparison and an estimate of field scale miscanthus canopy precipitation interception. *GCB Bioenergy*. 10: 353-366.
- Jacovides, C. P. and Kontoyiannis, H. 1995. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural water management*. 27: 365 -371.
- Jensen, M. E. (ed.) 1983. *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. pp.199-200. An ASAE Monograph No. 3, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA.
- Katerji, N. and Rana, G. 2011. Crop reference evapotranspiration: a discussion of the concept, analysis of the process and validation. *Water Resource Management*. 25:1581-1600.
- Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X. and Cao, J. 2017. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. *Agricultural Water Management*. 184: 145-155.
- Moazed, H., Ghaemi, A.A. and Rafiee, M.R. 2014. Evaluation of several reference evapotranspiration methods: a comparative study of greenhouse and outdoor conditions. *IJST, Transactions of Civil*

Evaluation of Eleven Models for Reference Crop Evapotranspiration Estimation in Haji Abad Region of Hormozgan

A. Moradi^{1*} and A.H. Ziaei²

Received: Jun.11, 2019

Accepted: Aug.05, 2019

Abstract

Reference crop evapotranspiration (ET_o) is an important parameter for determining crop water requirements in the FAO method, and hence, its accurate estimation is of crucial importance in optimizing crop water use and water resources management. In this research where conducted in Haji Abad region of Hormozgan province for four years, weekly evapotranspiration from grass as a reference crop was measured using a drainable lysimeter. The ET_o was also estimated using eleven models including FAO Radiation, Evaporation Pan, Blaney-Criddle, Penman and Penman-Monteith and Papadakis, Ivanov, Jensen-Haise, Hargreavse-Samani, Tork, and Making models. The estimated ET_o values from different models were compared with the data measured from lysimeter using linear regression, root mean square error, mean bias error, index of agreement and variance of the distribution of differences. Results showed that FAO Penman, Ivanov, Papadakis and Jensen-Haise models overestimated ET_o , but the FAO evaporation pan, Hargreaves-Samani, Turk and Making models underestimated it. The results also indicated that the FAO Blaney-Criddle and FAO Penman-Monteith models had respectively higher accordance and homogeneity with the real data measured from lysimeter and can predict ET_o with higher accuracy than other tested models. Therefore, these models are recommended, respectively, as the most appropriate models to estimate ET_o in Haji Abad region and the areas having the same climate.

Keywords: Lysimeter, Evapotranspiration, Reference crop, Evapotranspiration models

1- Assistant Professor, Soil and water research department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran

2- Associate Professor, Soil and water research department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran

(* - Corresponding Author Email: Moradi1373@gmail.com)