نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و یکم، شماره ششم، ۱۳۹۳
http://jwsc.gau.ac.ir

اصلاح معادله هارگریوز با جایگزینی دمای سطح زمین به‌جای دمای هوا برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع

جلال یاراحمدی[۱] و *علی رحیمی‌خوب[۲]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران،
[۲]استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۵/۷

چکیده

تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) یکی از پارامترهای لازم برای تعیین آب مورد نیاز و برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان است. معادله‌هایی برای تعیین ET_o با استفاده از داده‌های دمای هوا ارایه شده است. در برخی از مناطق دنیا از جمله ایران، تراکم ایستگاه‌های هواشناسی برای پهنه‌بندی این پارامتر کافی نیست. برداشت داده‌های طیفی از نقاط مختلف زمین از برتری‌های تصاویر ماهواره‌ای است. هدف این پژوهش اصلاح معادله تجربی هارگریوز برای استفاده از داده‌های دمای سطح زمین به‌جای دمای هوا برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع است. تعداد ٤١٤ تصویر دمای روز و شب سطح زمین سنجنده مودیس برای یک دوره ۲ ساله (۲۰۰٦ و ۲۰۰۷) مربوط به شبکه‌های طرح توسعه نیشکر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج با مبنا قرار دادن معادله پنمن مانتیث فائو نشان داد، معادله هارگریوز اصلاح‌شده با هر دو نوع داده ورودی (دمای سطح زمین و دمای هوا) دقت یکسانی دارد. جذر میانگین مربع خطا و ضریب تعیین به‌ترتیب برابر ۱/۵ میلی‌متر در روز و ۰/۷۹ برآورد شدند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق گیاه مرجع، دمای سطح زمین، سنجنده مودیس، معادله هارگریوز

* مسئول مکاتبه: akhob@ut.ac.ir

مقدمه

داده‌های دقیق از تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) برای مطالعات منابع آب، برنامه‌ریزی آبیاری مزارع و ارزیابی‌های زیست‌محیطی لازم و ضروری است. این پارامتر به روش مستقیم از طریق لایسیمتر با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌گردد، ولی به‌دلیل هزینه زیاد خرید آن و آزمایش‌های زمان‌بر از معادله‌ها و رابطه‌های مبتنی بر داده‌های هواشناسی استفاده می‌شود. براساس پژوهش‌های کارشناسان سازمان فائو (FAO)، معادله تبخیر و تعرق پنمن- مانتیث (PM) که براساس مفاهیم فیزیکی تدوین شده، دقیق‌ترین نتایج را برای تمام شرایط آب و هوایی ارایه می‌دهد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). سازمان فائو تعریف استانداردی برای گیاه مرجع ارایه داد که عبارت از گیاه چمنی است که در سطح وسیع و پوشش سبز کامل با ارتفاع یکنواخت (۱۵-۸ سانتی‌متر) و کاملاً سایه‌انداز بر زمین و بدون کمبود آب رشد فعال و بدون کمبود آب تبخیر و تعرق می‌کند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). سازمان نام‌برده با توجه به خصوصیات تعریف شده برای گیاه مرجع، معادله پنمن- مانتیث را برای گیاه مرجع فرموله کرده و آن را به‌عنوان معادله استاندارد برای تعیین ET_o و واسنجی معادله‌های ساده تبخیر و تعرق معرفی کرده است.

برای تعیین ET_o با استفاده از معادله PM و یا سایر معادله‌های تجربی نیاز به داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و ET_o حساب شده با استفاده از این داده‌ها از نوع متغیر مکانی نقطه‌ای هستند و به‌عبارتی فقط در محدوده نزدیک ایستگاه‌ها اعتبار دارند. پیشرفت فناوری سنجش از دور و نرم‌افزارهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای، دسترسی به خصوصیات پدیده‌های زمینی را به‌صورت گسترده از نظر مکانی و زمانی فراهم کرده است. خصوصیات و ویژگی‌های سطح زمین با استفاده از باندهای مختلف سنجنده ماهواره‌ها قابل تعیین است. در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی برای تعیین ET_o با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام یافته است. برداشت اطلاعات از سطح شبکه‌های آبیاری در باندهای مختلف از برتری‌های تصاویر بالا است. این اطلاعات در باندهای مریی و مادون قرمز برای تعیین وضعیت پوشش گیاهی و در باندهای حرارتی برای تعیین دمای سطح زمین کاربرد دارد. ریواس و کیسلس (۲۰۰٤) معادله ساده‌ای بر مبنای بسط معادله پنمن مانتیث برای تعیین ET_o با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ارایه دادند که در آن دمای سطح زمین تنها متغیر معادله است. معادله آن‌ها برای منطقه نیمه‌مرطوب یکی از استان‌های آرژانتین ارزیابی و با مقایسه آن با نتایج

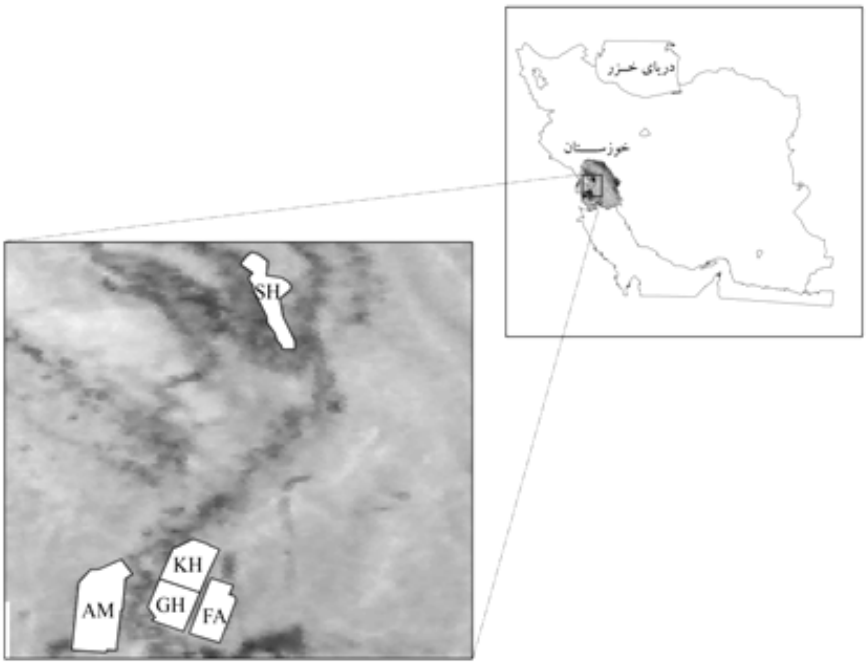
اندازه‌گیری شده در آن منطقه، دقت آن حدود ۰/٦ میلی‌متر در روز تعیین شد. معادله ریواس و کیسلس (۲۰۰٤) برای شبکه آبیاری قزوین مورد واسنجی قرار گرفت و ET_o با ضریب تعیین (R^2) و جذر میانگین مربع خطا (RMSE) به‌ترتیب مساوی ۰/۸۰ و ۰/٤۷ میلی‌متر در روز برآورد شد (رحیمی‌خوب و بهبهانی، ۲۰۱۲). مرادی و رحیمی‌خوب (۲۰۱۲) داده‌های دمای سطح زمین و تابش بیرون زمینی تصاویر ماهواره را با استفاده از مدل شبکه درختی M5 به ET_o تبدیل کردند. این پژوهش در شبکه آبیاری قزوین انجام شد و شاخص‌های آماری R^2 و درصد جذر میانگین مربع خطا به‌ترتیب ۰/۸۱ و ۸/۵ درصد برآورد شدند.

مدل‌های تجربی زیادی از نوع دمایی برای برآورد ET_o ارایه شده‌اند که داده‌های اندازه‌گیری شده ورودی آن‌ها فقط پارامترهای دمایی هوا مثل دمای بیشینه، کمینه و متوسط هوا هستند. مائدا و همکاران (۲۰۱۱) با توجه به این‌که سنجنده مودیس هر منطقه را دو بار در روز و شب تصویربرداری می‌کند و ساعات تصویربرداری مقارن به زمان‌های وقوع حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا هستند، سه معادله تجربی دمایی تبخیر و تعرق گیاه مرجع را برای استفاده از دمای سطح زمین روز و شب به‌جای پارامترهای دمای هوا برای منطقه‌ای در کنیا واسنجی کردند. سه معادله بالا شامل هارگریوز، تورنت‌وایت و بلینی- کریدل بود و نتایج آن‌ها نشان داد، مدل هارگریوز با دقت ۰/٤۷ میلی‌متر در روز بهترین نتیجه را ارایه می‌دهد.

هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی مدل هارگریوز برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های سطح زمین سنجنده مودیس برای مزارع طرح توسعه نیشکر خوزستان است. در این پژوهش پارامترهای دمای روز و شب سطح زمین تصاویر سنجنده مودیس جایگزین پارامترهای ماکزیمم و مینیمم دمای هوا در مدل هارگریوز شد و این مدل برای هر دو نوع ورودی‌های دمای هوا و دمای سطح زمین برای مزارع نیشکر خوزستان مورد واسنجی قرار گرفت. سؤال این پژوهش این است که آیا دقت مدل هارگریوز با جایگزین شدن پارامترهای دمایی سطح زمین به‌جای پارامترهای دمای هوا کم می‌شود؟ از آن‌جا که مدل پنمن مانتیث فائو، مدل استانداردی برای برآورد ET_o و همچنین برای شرایطی که داده‌های اندازه‌گیری واقعی نباشد برای واسنجی مدل‌های تجربی توصیه شده است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸)، در این پژوهش این مدل به‌عنوان مبنا برای واسنجی و تعیین دقت مدل هارگریوز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی: از آن‌جا که تبخیر و تعرق گیاه مرجع باید برآمده از یک سطح پوشش گیاهی وسیع باشد، در این پژوهش پنج واحد از اراضی طرح توسعه نیشکر در استان خوزستان به‌عنوان مناطق مطالعه موردی استفاده شدند. این واحدها شامل شبکه‌های امیرکبیر (AM)، شعیبیه (SH)، خزایی (KH)، فارابی (FA) و غزالی (GH) هستند و هر یک حدود ۱۵ هزار هکتار وسعت دارند. شکل ۱ موقعیت شبکه‌های بالا در استان خوزستان را نشان می‌دهد. هر یک از شبکه‌ها مجهز به ایستگاه هواشناسی بوده و داده‌های اندازه‌گیری شده در آن‌ها به‌مدت ۲ سال (سال‌های ۲۰۰٦ و ۲۰۰۷) جمع‌آوری و برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن مانتیث فائو استفاده شدند. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارایه شده‌اند.



شکل ۱- موقعیت شبکه‌های آبیاری واحدهای نیشکر در جنوب خوزستان بر روی یک تصویر ماهواره‌ای.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده.

ایستگاه	کد	طول جغرافیایی (°E)	عرض جغرافیایی (°N)	ارتفاع (متر)
امیر کبیر	AM	٤٨°،١٨′	٣١°،٠٦ ′	٧
شعیبیه	SH	٤٨°،٤٦′	٣١°،٤٨ ′	٢٩
خزاعی	KH	٤٨°،٣٥′	٣١°،٠٨ ′	٥
فارابی	FA	٤٨°،٣٥′	٣١°،٠١′	٧/٢
غزالی	GH	٤٨°،٢٨′	٣١°،٠٠′	٥

تصاویر مودیس: در این پژوهش، داده‌های دمای سطح زمین در دو زمان روز و شب به‌دست آمده از تصاویر سنجنده مودیس، به‌عنوان ورودی مدل‌های تجربی تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌جای دمای بیشینه و کمینه روزانه هوا استفاده شدند. سنجنده مودیس که بر روی دو ماهواره ترا و آکوا نصب می‌شود، تصاویر سطح زمین را در ۳۵ باند طیفی بین ۰/٦۲ و ١٤/٣٨٥ میکرومتر با دقت مکانی ۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر و یک کیلومتر تهیه می‌کند. دقت مکانی این سنجنده در محدوده طیفی حرارتی یک کیلومتر می‌باشد. ماهواره‌های ترا و آکوا به‌ترتیب در تاریخ‌های ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ٤ می ۲۰۰۲ در مدار قرار گرفتند. این ماهواره‌ها خورشید آهنگ هستند ولی در دو مسیر مخالف، هر روز دو بار به دور زمین می‌گردند. ماهواره ترا از شمال به جنوب حرکت می‌کند و زمان‌های عبور آن از استوا حدود ۱۰/۵ صبح و شب به وقت محلی در هر روز است، حال آن‌که ماهواره آکوا در مسیری مخالف ماهواره ترا، از جنوب به شمال حرکت می‌کند و زمان‌های عبور آن از استوا حدود ۱/۵ صبح و بعد از ظهر به وقت محلی در هر روز است.

سازمان ملی هوا و فضای آمریکا (ناسا) عهده‌دار پردازش داده‌های سنجنده مودیس بوده و محصولات متنوعی برای کاربردهای زمینی، اقیانوسی و جوی تولید و عرضه می‌کند. این محصولات از طریق وب سایت این سازمان به آدرس http://modis.gsfc.nasa.gov/ قابل دسترس است. در این پژوهش ٤١٤ تصویر با کد محصول MOD11A1 مربوط به سال‌های ۲۰۰٦ و ۲۰۰۷ که منطقه خوزستان را پوشش می‌دهند، از سایت بالا اخذ شدند. این محصول دمای سطح زمین را در دو زمان روز و شب با دقت مکانی یک کیلومتر و با مختصات سینوسی که حاصل تصاویر ماهواره ترا سنجنده مودیس است، ارایه می‌دهد. دمای سطح زمین با استفاده از دو باند حرارتی ۳۱ (محدوده طیفی ۱۱/۲۸–۱۰/۷۸ میکرومتر) و ۳۲ (محدوده طیفی ۱۲/۲۷–۱۱/۷۷ میکرومتر) تصاویر مودیس با

به‌کارگیری الگوریتم روزنه مجزا برآورد می‌شود (وانکاتسم و همکاران، ۲۰۱۰). الگوریتم روزنه مجزا اثرات اتمسفر و گسیلندکی سطح زمین را اصلاح می‌کند.

تصاویر اخذ شده با استفاده از نرم‌افزار MRT (MODIS Reprojection Tool) از سیستم سینوسی به سیستم مختصات طول و عرض جعرافیایی تبدیل و به فرمت img از فرمت‌های استاندارد سیستم اطلاعات جعرافیایی (GIS)، ذخیره شدند. سپس موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS شناسایی و دمای سطح زمین در دو زمان روز و شب از پیکسل ایستگاه‌ها استخراج شدند. لازم به ذکر است، هر تصویر مودیس، تعدادی اطلاعات را به‌علت ابرناکی هوا، غلظت زیاد جو از ذرات معلق و شکاف بین دو مسیر ماهواره از دست می‌دهد. بنابراین هر ایستگاه در بعضی از روزها، بدون داده در تصویر است. دوره مطالعات این پژوهش ۲ سال بود (سال‌های ۲۰۰٦ و ۲۰۰۷) و در این فاصله ٤١٤ تصویر روز و شب که منطقه خوزستان را پوشش می‌داد از سایت ذکر شده در بالا دریافت شد.

معادله پنمن مانتیث فائو (PM): در این پژوهش، نتایج معادله پنمن مانتیث فائو به‌عنوان مبنا برای واسنجی و تعیین دقت مدل هارگریوز برای هر دو نوع داده‌های ورودی دمای هوا و دمای سطح زمین استفاده شد. معادله پنمن مانتیث فائو (PM-FAO) به‌شرح زیر است:

$$ET_{r}PM = \frac{۰/٤۰۸\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{۹۰۰}{T_a + ۲۷۳} U_۲(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(۱ + ۰/۳٤U_۲)} \qquad (۱)$$

که در آن، $ET_{r}PM$: تبخیر تعرق گیاه مرجع برآورد شده از معادله پنمن مانتیث فائو ($mm\ d^{-۱}$)، Δ: شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n: تابش خالص رسیده به زمین ($MJ\ m^{-۲}\ d^{-۱}$)، G: شار گرمای خاک ($MJ\ m^{-۲}\ d^{-۱}$)، γ: ثابت سایکرومتر (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، T_a: متوسط دمای روزانه هوا (درجه سانتی‌گراد)، $U_۲$: متوسط روزانه سرعت باد (متر بر ثانیه)، e_s: فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال) و e_a: فشار بخار هوا (کیلوپاسکال) می‌باشند. مؤلفه‌های رابطه بالا با استفاده از رابطه‌های ارایه شده در نشریه شماره ٥٦ فائو (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) و داده‌های هواشناسی تعیین گردید.

معادله هارگریوز (HG): آلن و همکاران (۱۹۹۸) معادله هارگریوز را برای وقتی کـه داده‌هـای کـافی برای برآورد ET_0 با استفاده از مدل پنمن مانتیث فـائو وجـود نداشـته باشـد، توصـیه کردنـد. معادلـه هارگریوز (هارگریوز و همکاران، ۱۹۸۵) فقط به داده‌های بیشینه و کمینه هوا که در تمام ایستگاه‌هـای هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود و تابش بیرون زمینی نیاز دارد. تابش بیرون زمینی تابع موقعیت مکـانی و زمانی است و بنابراین در معادله هارگریوز فقط پارامترهای بیشینه و کمینه دمـای هـوا انـدازه‌گیـری می‌شوند. این رابطه برای دوره‌های هفتگی و بیش‌تر از دقت خوبی برخوردار است (هارگریوز و آلـن، ۲۰۰۳) و در نشریه شماره ۵۶ فائو (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) به‌صورت زیر ارایه شده است:

$$ET_0\ HG = ۰/۰۰۲۳\ R_a\ (T_a + ۱۷/۸)\ (T_{max} - T_{min})^{۰/۵} \qquad (۲)$$

که در آن، $ET_0\ HG$: تبخیر و تعرق گیاه مرجع برآورد شده از معادله هارگریوز، R_a: تابش رسـیده بـه بالای جو بر حسب عمق معادل آب تبخیـر شـده در روز ($mm\ d^{-1}$)، T_{max} و T_{min} بـه‌ترتیـب دمـای بیشینه و کمینه روزانه هوا (درجه سانتی‌گراد) و T_a: دمای متوسط روزانه (درجـه سـانتی‌گـراد) کـه از میانگین‌گیری دمای دمای بیشینه و کمینه روزانه هوا به‌دست می‌آید. تابش رسیده به بالای جو تابع روز شمار و عرض جغرافیایی است و برای برآورد آن از رابطه ارایه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). معادله هارگریوز تجربی است و اثر سایر پارامترهای مـؤثر بـر تبخیـر و تعرق گیاه مرجع مثل سرعت باد و رطوبت نسبی که در معادله نیستند، در ضـریب ثابـت آن، مـنعکس شده است. بنابراین این رابطه باید برای هر منطقه واسنجی شود. برای واسنجی رابطه بالا، رابطه خطی زیر توصیه شده است:

$$Y = m\,X + c \qquad (۳)$$

که در آن، Y: معرف مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع برآورد شده از رابطه ۱، X: معرف مقادیر تبخیـر و تعرق گیاه مرجع برآورد شده از رابطه ۲ و پارامترهای m و c ضرایب ثابت هستند. در این پـژوهش داده‌های ایستگاه‌های امیرکبیر، فارابی و غزالی برای واسنجی معادله هارگریوز و داده‌های ایستگاه‌هـای خرایی و شعیبه برای آزمون معادلات واسنجی استفاده شدند.

اصلاح معادله هارگریوز برای استفاده از داده‌های دمای سطح زمین (HG TS): برای اصلاح معادله هارگریوز برای استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای، پارامترهای دمـای سـطح زمـین در روز (T_d) و

شب (T_n) جایگزین بیشینه و کمینه دمای هوای روزانه و متوسط این دو پارامتر (T_m) جایگزین دمای متوسط روزانه هوا در رابطه ۲ می‌شوند (مائدا و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به این‌که نوع داده‌های ورودی تغییر یافته، بنابراین ضرایب معادله هارگریوز برای ورودهای دمای سطح زمین باید اصلاح شوند. فرم کلی معادله اصلاح شده هارگریوز به‌صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$ET.\ HG\ TS = A\ R_a\ (T_m + C)\ (T_d - T_n)^B \qquad (٤)$$

که در آن، ET. HG TS: تبخیر و تعرق گیاه مرجع برآورد شده از معادله هارگریوز اصلاح شده برای استفاده از داده‌های دمای سطح زمین، A، B و C ضرایب معادله هستند. برای تعیین ضرایب، معادله نمایی زیر استفاده شد:

$$Y = A\ X^B \qquad (٥)$$

که در آن، Y: نسبت ET. PM بر $[R_a\ (T_m + C)]$ و X: اختلاف دمای سطح زمین در روز و شب تصاویر مودیس ($T_d - T_n$) می‌باشند. در این پژوهش مقدار ضریب C با سعی و خطا تعیین شد. برای مقادیر مختلف C، مقادیر X و Y برای داده‌های واسنجی (ایستگاه‌های امیرکبیر، فارابی و عزالی) محاسبه و پراکنش آن‌ها ترسیم شد و با برازش معادله نمایی بالا بر آن‌ها و براساس روش حداقل مربعات، ضرایب رابطه ۵ و ضریب تعیین (R^2) برآورد شدند. برای آزمون معادله بنیان شده، همان داده‌های آزمون معادله واسنجی هارگریوز استفاده شد.

شاخص‌های آماری: در این پژوهش نتایج ET. به‌دست آمده از مدل پنمن مانتیث مبنا قرار گرفت و به‌عنوان مقادیر مشاهده شده (O_i) و نتایج به‌دست آمده از معادله‌های اصلاح شده هارگریوز با ورودی‌های دمای هوا و دمای سطح زمین (به‌ترتیب رابطه‌های ۳ و ۵) به‌عنوان مقادیر پیش‌بینی شده (P_i) استفاده شدند. به‌منظور ارزیابی این معادله‌ها، علاوه‌بر ترسیم نمودارهای مشاهده شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) استفاده شده است. معادله‌های این شاخص‌ها به‌شرح زیر می‌باشند:

$$R^2 = \frac{\left[\sum(P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right]^2}{\sum(P_i - \overline{P})^2 \sum(O_i - \overline{O})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^{N} (O_i - P_i)^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

$$MBE = N^{-1} \sum_{i=1}^{N} (O_i - P_i) \quad (8)$$

که در آن‌ها، P_i: مقادیر برآورد شده معادلات هارگریوز، $\overline{P}$: متوسط مقادیر برآورد شده این مدل‌ها، O_i: مقادیر مبنا، $\overline{O}$: متوسط مقادیر مبنا و N: تعداد مشاهده‌ها می‌باشند. برای مقایسه نتایج این بررسی با سایر پژوهش‌ها، شاخص درصد جذر میانگین مربع خطا نیز برآورد شده است. این شاخص از نسبت ریشه میانگین مربعات خطا به میانگین مقادیر مبنا بر حسب درصد حساب می‌شود.

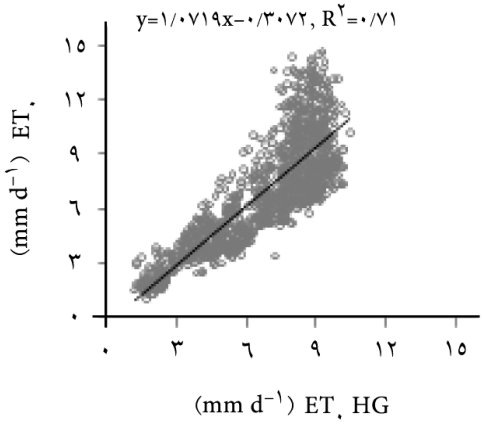
نتایج و بحث

پراکنش نتایج معادله هارگریوز و معادله پنمن مانتیث در شکل ۲ ارایه شده است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود ضریب تعیین معادله برازش شده به نقاط برابر ۰/۷۱ برآورد شده که نشان می‌دهد که معادله هارگریوز حدود ۷۱ درصد با تغییرات تبخیر و تعرق گیاه مرجع پنمن مانتیث برای دوره روزانه همخوانی دارد. معادله درج شده در شکل ۲ برای واسنجی معادله هارگریوز به‌صورت زیر استفاده شد:

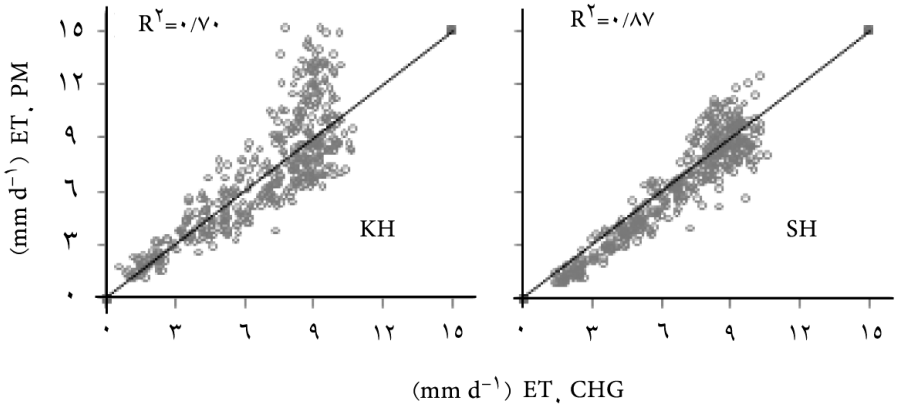
ET. CHG = ۱/۰۷ ET HG – ۰/۳۱ (۹)

که در آن، ET. CHG: تبخیر و تعرق گیاه مرجع برآورد شده از معادله واسنجی هارگریوز برای داده‌های هواشناسی (CHG) است. رابطه ۹ برای ایستگاه‌های خرایی و شعیبه (داده‌های آزمون) اجرا شد. شکل ۳ مقایسه بین معادله CHG و PM را نشان می‌دهد. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود مدل CHG نتایج متفاوتی در دو ایستگاه خزایی و شعیبه نشان می‌دهد. در ایستگاه خزایی، پراکنش نقاط برای مقادیر ET. کم‌تر از ۸ میلی‌متر در روز به‌طور یکنواخت در دو طرف بهترین خط انطباق (خط ۱:۱) توزیع شدند ولی برای مقادیر ET. بیش‌تر از ۸ میلی‌متر در روز، نقاط از خط ۱:۱ دور شدند

به‌طوری‌که در این محدوده تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مدل CHG کم‌تر از مدل PM برآورد شده است. عملکرد مدل CHG در ایستگاه شعیبه به‌صورتی است که برای مقادیر ET_o کم‌تر از ۸ میلی‌متر در روز تمایل به بیش برآورد دارد ولی برای مقادیر ET_o بیش‌تر از ۸ میلی‌متر در دو طرف خط ۱:۱ توزیع شدند.



شکل ۲- پراکنش نتایج تبخیر و تعرق گیاه مرجع مدل‌های هارگریوز و پنمن مانتیث با استفاده از داده‌های واسنجی.

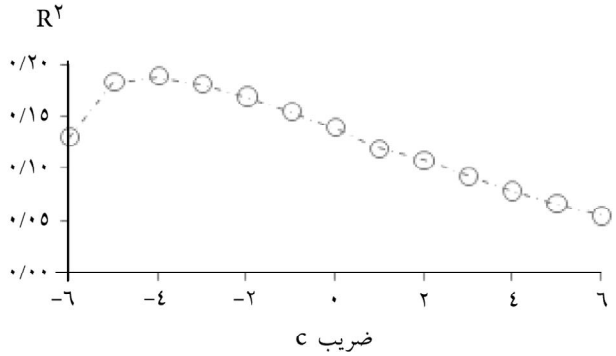


شکل ۳- پراکنش نتایج تبخیر و تعرق گیاه مرجع مدل‌های هارگریوز واسنجی شده و پنمن مانتیث برای ایستگاه‌های آزمون.

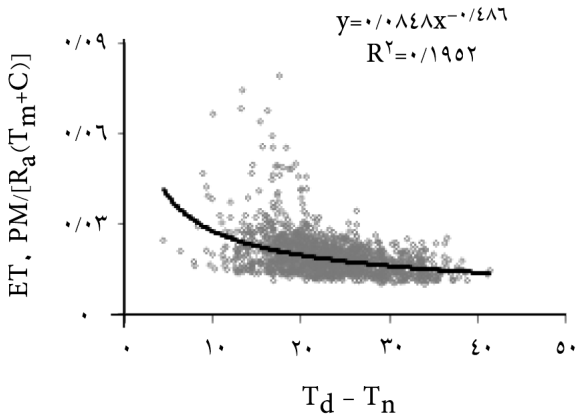
پارامتر Y (رابطه ۵) به‌ازای مقادیر C از ٦- تا ٦ و برای داده‌های واسنجی برآورد و پراکنش آن‌ها در مقابل پارامتر X ترسیم شد و ضریب تعیین با برازش معادله نمایی ۵ بر روی نقاط برآورد گردید. منحنی تغییرات ضریب C و R^2 در شکل ٤ ارایه شده است. ملاحظه می‌شود، بیش‌ترین مقدار R^2 به‌ازای ضریب C در محدوده ٤- و ۵- حاصل می‌شود. به‌منظور یافتن بهترین مقدار ضریب C، پارامتر Y به‌ازای C از ٤- و ۵- و با نمو ۰/۱- برای داده‌های واسنجی برآورد شد و نتایج نشان داد، ضرایب تعیین در محدوده بالا تغییر نمی‌کند. بنابراین مقدار ضریب C برابر با ٤- برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. به‌ازای C برابر با ٤-، پراکنش مقادیر پارامترهای X و Y برای داده‌های واسنجی در شکل ۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود، ضریب تعیین برابر با ۰/۱۹ و ضرایب A و B به‌ترتیب ۰/۰۹ و ۰/۵۱- برآورد شده‌اند. بنابراین معادله اصلاح شده هارگریوز برای داده‌های ورودی دمای سطح زمین به‌صورت زیر خواهد بود:

$$ET.\ HG\ TS = ۰/۰۹\ R_a\ (T_m - ٤)\ (T_d - T_n)^{-۰/۵۱} \qquad (۱۰)$$

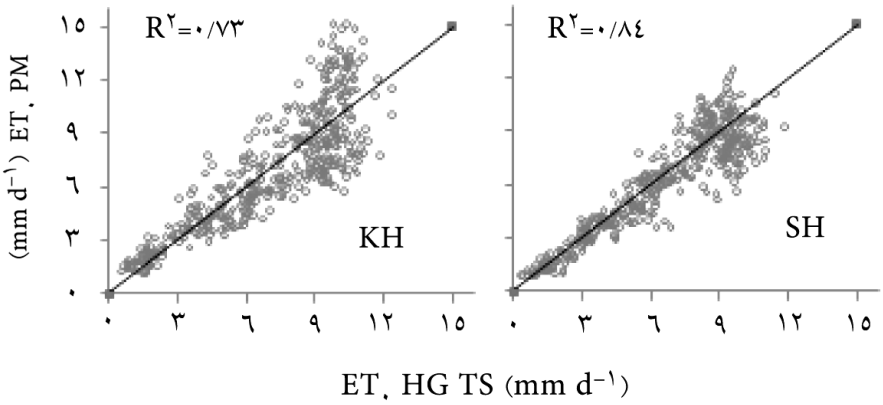
رابطه بالا برای ایستگاه‌های خرایی و شعیبه (داده‌های آزمون) اجرا شد. مقایسه بین معادله HG TS و PM در شکل ٦ ارایه شده است. ملاحظه می‌شود نتایج توزیع نقاط حول خط ۱:۱ در دو ایستگاه بالا بهتر از مدل واسنجی شده هارگریوز برای داده‌های هواشناسی است. در هر دو ایستگا، به تقریب نقاط به‌طور یکسان در دو طرف خط ۱:۱ توزیع شدند و به‌عبارتی رفتار مدل واسنجی شده هارگریوز برای داده‌های دمای سطح زمین در دو ایستگاه مختلف یکسان عمل شده است. ولی همان‌گونه که در شکل ٦ مشاهده می‌شود، خطای مدل برای مقادیر بیش از ۸ میلی‌متر در روز زیاد می‌باشد.



شکل ٤- منحنی تغییرات ضریب تعیین به‌ازای مقادیر مختلف ضریب C.



شکل ۵- منحنی تغییرات اختلاف دمای سطح زمین در روز و شب به‌ازای مقادیر نسبت ET. PM بر $[R_a (T_m + C)]$.



شکل ٦- پراکنش نتایج تبخیر و تعرق گیاه مرجع مدل هارگریوز واسنجی شده با داده‌های ورودی دمای سطح زمین و مدل پنمن مانتیث برای ایستگاه‌های آزمون.

خلاصه نتایج آماری دو مدل واسنجی شده در جدول ۲ ارایه شده است. ملاحظه می‌شود به‌طور کلی نتایج آماری هر دو روش تقریباً یکسانند در هر دو روش ضریب تعیین و جذر میانگین مربعات خطا به‌ترتیب ۰/۷۹ و ۱/۵ میلی‌متر در روز برآورد شدند. میانگین انحراف خطا در مدل CHG در دو ایستگاه خرایی و شعیبیه به‌ترتیب ۰/۳- و ۰/۳ میلی‌متر ولی در مدل HG TS صفر و ۰/۳ میلی‌متر

برآورد شدند که نشان‌دهنده این است که مدل HG TS وضعیت بهتری نسبت به مدل CHG دارد. با توجه به این‌که مدل‌های تجربی با داده‌های محدودی ET. را برآورد می‌کنند، دقت آن‌ها برای دوره‌های ماهانه مناسب است.

جدول ۲- خلاصه نتایج آماری مدل‌های هارگریوز با ورودی‌های دمای هوا و دمای سطح زمین.

ایستگاه	مدل CHG			مدل HG TS		
	R^2	RMSE mm d^{-1}	MBE mm d^{-1}	R^2	RMSE mm d^{-1}	MBE mm d^{-1}
خزایی	۰/۷۰	۱/۹	-۰/۳	۰/۷۳	۱/۷	۰/۰
شعیبیه	۰/۸۷	۱/۱	۰/۳	۰/۸٤	۱/۲	۰/۳
میانگین	۰/۷۹	۱/۵	۰/۰	۰/۷۹	۱/۵	۰/۲

مقایسه نتایج این بررسی با پژوهش‌های قبلی: نتایج این بررسی و نتایج پژوهش‌های گذشته در جدول ۳ برای مقایسه ارایه شده است. ملاحظه می‌شود، ضریب تعیین روش‌های ساده‌سازی مدل پنمن مانتیث و مدل شبکه درختی M5 با روش هارگریوز تقریباً نزدیک بهم هستند. ولی از نظر دقت روش هارگریوز دقت کم‌تری دارد. شاید تفاوت اقلیمی باعث کاهش دقت روش هارگریوز شده است. بنابراین توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده، روش‌های ساده‌سازی مدل پنمن مانتیث و مدل شبکه درختی M5 در شبکه خوزستان اجرا شود و با نتایج این پژوهش مورد مقایسه قرار گیرد. همچنین نتایج مائدا و همکاران (۲۰۱۱) و این پژوهش که در هر دو از روش هارگریوز استفاده شده، یکسان نیستند. ضریب تعیین در این پژوهش بیش‌تر از نتایج پژوهش مائدا و همکاران (۲۰۱۱) شده، ولی دقت برآورد در این پژوهش کم‌تر شده است. به هر حال شرایط اقلیمی بر روی دقت برآورد در معادلات تجربی مؤثر می‌باشد. به‌طور مثال سرعت باد یکی از پارامترهای مؤثر بر شدت تبخیر است، ولی این پارامتر در معادله‌های تجربی تبخیر و تعرق گیاه مرجع دخالت داده نشده است. بنابراین در مناطقی که تغییرات سرعت باد در طول سال زیاد باشد، دقت معادله‌های تجربی تبخیر و تعرق کاسته می‌شود و بر عکس اگر تغییرات سرعت باد در طول سال کم باشد، دقت معادله‌های بیش‌تر خواهد بود.

جدول ۳- مقایسه نتایج این بررسی با سایر پژوهش‌های گذشته.

محقق	منطقه	روش	R^2	RMSE ($mm\ d^{-1}$)	RMSE (درصد)
رحیمی‌خوب و بهبهانی (۲۰۱۲)	قزوین	ساده‌سازی مدل پنمن مانتیث	۰/۸۰	۰/٤۷	–
مرادی و رحیمی‌خوب (۲۰۱۲)	قزوین	مدل شبکه درختی M5	۰/۸۱	–	۸/۵
ریواس و کیسلس (۲۰۰٤)	آرژانتین	ساده‌سازی مدل پنمن مانتیث	–	۰/٦۰	–
مائدا و همکاران (۲۰۱۱)	کنیا	واسنجی معادله هارگریوز	۰/٦۷	۰/٤۷	–
این پژوهش	خوزستان	واسنجی معادله هارگریوز	۰/۷۹	۱/۵	۲۲/۱

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش مدل هارگریوز برای استفاده از داده‌های دمای روز و شب سطح زمین به‌جای دمای ماکزیمم و مینیمم هوا مورد واسنجی قرار گرفت و با مدل هارگریوز معمولی که از داده‌های هوا برای برآورد ET_o استفاده می‌کند مقایسه شد. نتایج نشان داد، مدل هارگریوز با هر دو نوع داده‌های ورودی (دمای سطح زمین و دمای هوا) دقت یکسانی دارد. ولی مدل‌های تجربی تبخیر و تعرق برای دوره‌های روزانه از دقت مناسبی برخوردار نیست و برای دوره‌های ماهانه نتایج خوبی ارایه می‌دهند. از آن‌جایی که تصاویر ماهواره‌ای به دلایل ابرناکی هوا و خطاهای سیستماتیک نمی‌توانند آمار کاملی از روزهای هر ماه را داشته باشند، بنابراین امکان برآورد متوسط ماهانه با محدودیت مواجه بوده و لازم است در پژوهش‌های آتی، مدل‌هایی بررسی و بنیان شوند تا ET_o روزهای بدون آمار بازسازی شود.

منابع

1. 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. 300p.
2. Hargreaves, G.H., and Allen, R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. J. Irrig. Drain. Engin. 129: 1. 53-63.
3. Hargreaves, L.G., Hargreaves, G.H., and Riley, J.P. 1985. Irrigation water requirements for Senegal River Basin. J. Irrig. Drain. Engin. 111: 3. 265-275.
4. Maeda, E.E., Wiberg, D.A., and Pellikka, P.K. 2011. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. Applied Geography. 31: 1. 251-258.

5.Rahimikhoob, A., and Behbahani, S.M.R. 2012. An Evaluation of Simplified Penman-Monthieith Equation for Estimating Reference Crop Evapotranspiration Using Satellite Images, Case Study: Gazvin Irrigated Land Area. Iran. J. Soil Water Res. 43: 2. 139-147.
6.Moradi, M.A., and Rahimikhoob, A. 2012. Estimation of Reference Evapotranspiration Using NOAA Satellite Images and M5 Model Tree for Irrigation Networks-Case Study in Gazvin Irrigation Network. J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Science. 16: 62. 123-135. (In Farsi)
7.Rivas, R., and Caselles, V. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. Remote Sensing of Environment. 93: 1-2. 68-76.
8.Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T., and Connor, S.J. 2010. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. Remote Sensing of Environment. 114: 449-465.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 21(6), 2015
http://jwsc.gau.ac.ir

Adjustment of Hargreaves equation by replacing land surface temperature instead of air temperature for estimating reference crop evapotranspiration

J. Yarahmadi[1] and *A. Rahimikhoob[2]

[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, [2]Professor, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran

Received: 02/06/2013; Accepted: 07/29/2013

Abstract

Reference crop evapotranspiration (ET_0) data are desirable for assessing crop water requirements and scheduling farm irrigation. A large number of methods have been developed for assessing ET_0 from meteorological data. In several places of the world including Iran, the existing network of weather stations is insufficient to capture the spatial heterogeneity of this variable. The purpose of this study is to adjust the Hargreaves equation (HG) for using land surface temperature (Ts) data instead of air temperature to estimate ET_0 only on the basis of the remote sensing-based surface temperature. For this purpose, a total of 365 images of MODIS Ts product for the years 2006 and 2007, covering irrigated sugarcane farms in Khuzestan were used. The results show that HG equation adjusted by both types of input data (land surface temperature and air temperature) has the same accuracy. RMSE and R^2 were estimated 1.5 mm d^{-1} and 0.79, respectively.

Keywords: Reference crop evapotranspiration, Land surface temperature, MODIS sensor, Hargreaves equation

* Corresponding Author; Email: akhob@ut.ac.ir