



دانشگاه گورگان و منابع طبیعی گورگان

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 به جای دمای هوا برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع

جلال یاراحمدی^۱ و *علی رحیمی خوب^۲

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران،

آستاد 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_c) یکی از پارامترهای لازم برای تعیین آب مورد نیاز و برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان است. معادله‌هایی برای تعیین ET_c با استفاده از داده‌های دمای هوا ارائه 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 به جای دمای هوا برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع است. تعداد ۴۱۴ تصویر دمای روز و شب سطح زمین سنجنده مودیس برای یک دوره ۲ ساله (۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) مربوط به شبکه‌های طرح توسعه نیشکر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج با مبنای قرار دادن معادله پنمن ماتیتث فائو نشان داد، معادله هارگریوز اصلاح شده با هر دو نوع داده ورودی (دمای سطح زمین و دمای هوا) دقت یکسانی دارد. جذر میانگین مربع خطا و ضریب تعیین به ترتیب 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) 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 به دلیل 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-مانتیت (PM) که براساس مفاهیم فیزیکی تدوین شده، دقیق‌ترین نتایج را برای تمام شرایط آب و هوایی ارائه می‌دهد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). سازمان فائو تعریف استاندارد برای گیاه مرجع شرایط آب و هوایی چمنی است که در سطح وسیع و پوشش سبز کامل با ارتفاع یکنواخت (۸-۱۵ 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-مانتیت را برای گیاه مرجع فرموله کرده و آن را به‌عنوان معادله استاندارد برای تعیین ET و واسنجی معادله‌های ساده تبخیر و تعرق معرفی کرده است.

برای تعیین ET با استفاده از معادله PM و یا سایر معادله‌های تجربی نیاز به داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و ET حساب شده با استفاده از این داده‌ها از نوع متغیر مکانی نقطه‌ای هستند و به عبارتی فقط در محدوده نزدیک ایستگاه‌ها اعتبار دارند. پیشرفت فناوری سنسجش 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 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 (۲۰۰۴) معادله ساده‌ای بر مبنای بسط معادله پنمن-مانتیت برای تعیین ET با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ارائه 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

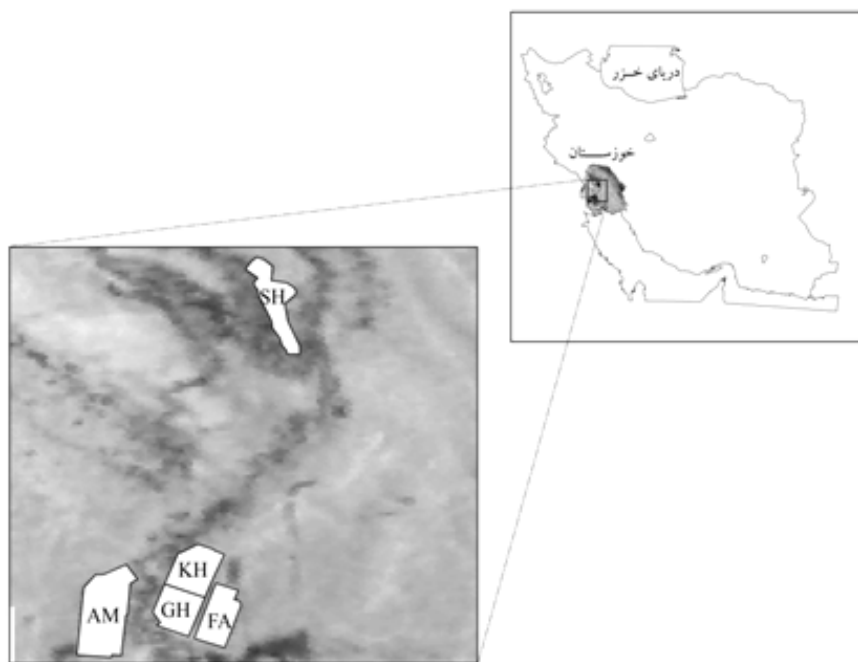
اندازه‌گیری شده در آن منطقه، دقت آن حدود $0/6$ میلی‌متر در روز تعیین شد. معادله ریواس و کیسلس (۲۰۰۴) برای شبکه آبیاری قزوین مورد واسنجی قرار گرفت و ET با ضریب تعیین (R^2) و جذر میانگین مربع خطا (RMSE) به ترتیب مساوی $0/80$ و $0/47$ میلی‌متر در روز برآورد شد (رحیمی خوب و بهبهانی، ۲۰۱۲). مرادی و رحیمی خوب (۲۰۱۲) داده‌های دمای سطح زمین و تابش بیرون زمینی تصاویر ماهواره را با استفاده از مدل شبکه درختی M5 به ET تبدیل کردند. این پژوهش در شبکه آبیاری قزوین انجام شد و شاخص‌های آماری R^2 و درصد جذر میانگین مربع خطا به ترتیب $0/81$ و $8/5$ درصد برآورد شدند.

مدل‌های تجربی زیادی از نوع دمایی برای برآورد ET ارائه 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 به جای 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 $0/47$ میلی‌متر در روز بهترین نتیجه را ارائه 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 به جای پارامترهای دمای هوا کم می‌شود؟ از آن‌جا که مدل پنمن مانتیث فائو، مدل استاندارد برای برآورد ET 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 به مدت ۲ سال (سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) جمع‌آوری و برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن ماتیت فائو استفاده شدند. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه 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	۴۸°،۱۸'	۳۱°،۰۶'	۷
شعیبیه	SH	۴۸°،۴۶'	۳۱°،۴۸'	۲۹
خراعی	KH	۴۸°،۳۵'	۳۱°،۰۸'	۵
فارابی	FA	۴۸°،۳۵'	۳۱°،۰۱'	۷/۲
غزالی	GH	۴۸°،۲۸'	۳۱°،۰۰'	۵

تصاویر مودیس: در این پژوهش، داده‌های دمای سطح زمین در دو زمان روز و شب به دست آمده از تصاویر سنجنده مودیس، به عنوان ورودی مدل‌های تجربی تبخیر و تعرق گیاه مرجع به جای دمای پیشینه 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 ۰/۶۲ و ۱۴/۳۸۵ 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 به ترتیب در تاریخ‌های ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ۴ 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 ۴۱۴ تصویر با کد محصول MOD11A1 مربوط به سال‌های ۲۰۰۶ 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، ارائه می‌دهد. دمای سطح زمین با استفاده از دو باند حرارتی ۳۱ (محدوده طیفی ۱۰/۷۸-۱۱/۲۸ میکرومتر) و ۳۲ (محدوده طیفی ۱۲/۲۷-۱۱/۷۷ میکرومتر) تصاویر مودیس با

به‌کارگیری الگوریتم روزانه مجزا برآورد می‌شود (وانکاتسم و همکاران، ۲۰۱۰). الگوریتم روزانه مجزا اثرات اتمسفر و گسیلندگی 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 جغرافیایی تبدیل و به فرمت img از فرمت‌های استاندارد سیستم اطلاعات جغرافیایی (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 ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) و در این فاصله ۴۱۴ 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) به شرح زیر است:

$$ET_{PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_v (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_v)} \quad (1)$$

که در آن، ET_{PM} : تبخیر تعرق گیاه مرجع برآورد شده از معادله پنمن مانتیث فائو (mm d^{-1})، Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n : تابش خالص رسیده به زمین ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، G : شار گرمای خاک ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، γ : ثابت سایکرومتر (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، T_a : متوسط دمای روزانه هوا (درجه سانتی‌گراد)، U_v : 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 ۵۶ فائو (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) و داده‌های هواشناسی تعیین گردید.

معادله هارگریوز (HG): آلن و همکاران (۱۹۹۸) معادله هارگریوز را برای وقتی که داده‌های کافی برای برآورد ET با استفاده از مدل پنمن مانیتث فائو وجود نداشته باشد، توصیه کردند. معادله هارگریوز (هارگریوز و همکاران، ۱۹۸۵) فقط به داده‌های بیشینه و کمینه هوا که در تمام ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود و تابش بیرون زمینی نیاز دارد. تابش بیرون زمینی تابع موقعیت مکانی و زمانی است و بنابراین در معادله هارگریوز فقط پارامترهای بیشینه و کمینه دمای هوا اندازه‌گیری می‌شوند. این رابطه برای دوره‌های هفتگی و بیش‌تر از دقت خوبی برخوردار است (هارگریوز و آلن، ۲۰۰۳) و در نشریه شماره ۵۶ فائو (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$ET, HG = 0.023 R_a (T_a + 17/8) (T_{max} - T_{min})^{1/5} \quad (2)$$

که در آن، ET, HG: تبخیر و تعرق گیاه مرجع برآورد شده از معادله هارگریوز، R_a : تابش رسیده به بالای جو بر حسب عمق معادل آب تبخیر شده در روز ($mm d^{-1}$)، T_{min} و T_{max} : به‌ترتیب دمای بیشینه و کمینه روزانه هوا (درجه سانتی‌گراد) و T_a : دمای متوسط روزانه (درجه سانتی‌گراد) که از میانگین‌گیری 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 ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). معادله هارگریوز تجربی است و اثر سایر پارامترهای مؤثر بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع مثل سرعت باد و رطوبت نسبی که در معادله نیستند، در ضریب ثابت آن، منعکس شده است. بنابراین این رابطه باید برای هر منطقه واسنجی شود. برای واسنجی رابطه بالا، رابطه خطی زیر توصیه شده است:

$$Y = m X + c \quad (3)$$

که در آن، Y : معرف مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع برآورد شده از رابطه ۱، X : معرف مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع برآورد شده از رابطه ۲ و پارامترهای m و c ضرایب ثابت هستند. در این پژوهش داده‌های ایستگاه‌های امیرکبیر، فارابی و غزالی برای واسنجی معادله هارگریوز و داده‌های ایستگاه‌های خرای و شعبیه 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 دمای سطح زمین 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 به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$ET, HG TS = A R_a (T_m + C) (T_d - T_n)^B \quad (4)$$

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:

$$Y = A X^B \quad (5)$$

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 به دست آمده از مدل پنمن مانیت مبنای قرار گرفت و به عنوان مقادیر مشاهده شده (O_i) و نتایج به دست آمده از معادله‌های اصلاح شده هارگریوز با ورودی‌های دمای هوا و دمای سطح زمین (به ترتیب رابطه‌های ۳ و ۵) به عنوان مقادیر پیش‌بینی شده (P_i) استفاده شدند. به منظور ارزیابی این معادله‌ها، علاوه بر 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 به شرح زیر می‌باشند:

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

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

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

که در آن‌ها، P_i : مقادیر برآورد شده معادلات هارگریوز، \bar{P} : متوسط مقادیر برآورد شده این مدل‌ها، O_i : مقادیر مینا، \bar{O} : متوسط مقادیر مینا 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 مینا بر حسب درصد حساب می‌شود.

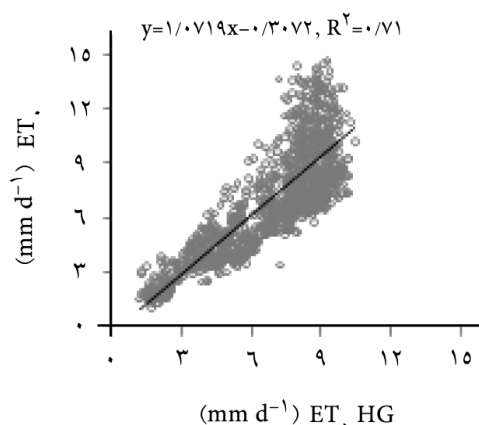
نتایج و بحث

پراکنش نتایج معادله هارگریوز و معادله پنمن مانیتث 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 مانیتث برای دوره روزانه همخوانی دارد. معادله درج شده در شکل ۲ برای واسنجی معادله هارگریوز به‌صورت زیر استفاده شد:

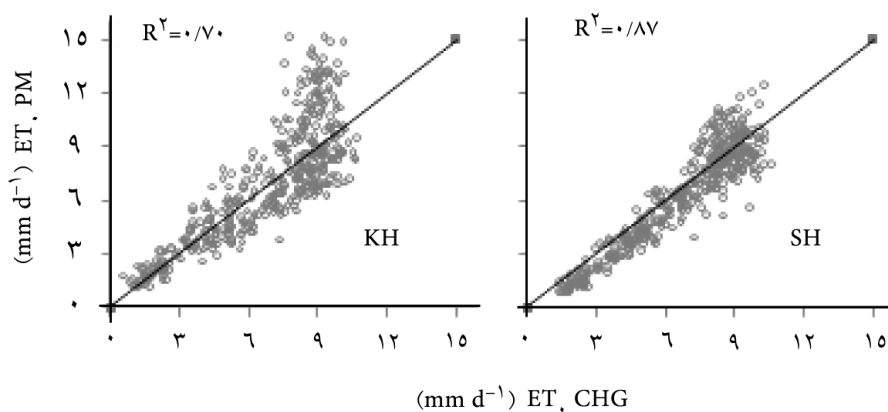
$$ET, CHG = 1/07 ET HG - 0/31 \quad (9)$$

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 خرابی و شعیه (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 خرابی و شعیه نشان می‌دهد. در ایستگاه خرابی، 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

به طوری که در این محدوده تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مدل CHG کم‌تر از مدل PM برآورد شده است. عملکرد مدل CHG در ایستگاه شعبیه به صورتی است که برای مقادیر ET کم‌تر از ۸ میلی‌متر در روز تمایل به بیش برآورد دارد ولی برای مقادیر ET 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 مانیتث با استفاده از داده‌های واسنجی.

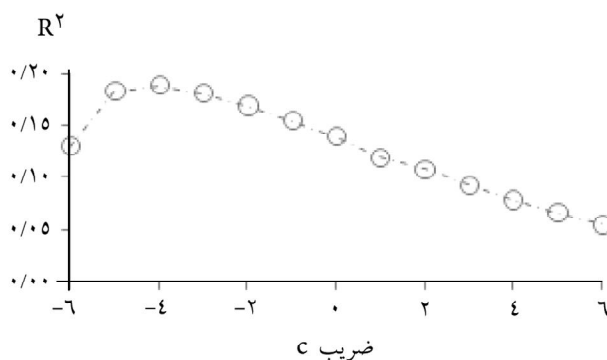


شکل ۳- پراکنش نتایج تبخیر و تعرق گیاه مرجع مدل‌های هارگریوز واسنجی شده و پنمن مانیتث برای ایستگاه‌های آزمون.

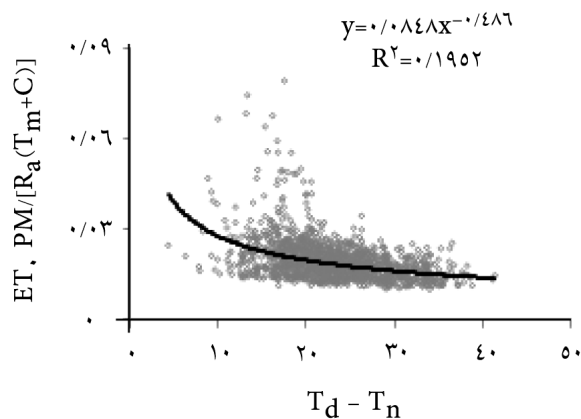
پارامتر Y (رابطه ۵) به‌ازای مقادیر C از ۶- تا ۶ و برای داده‌های واسنجی برآورد و پراکنش آن‌ها در مقابل پارامتر X ترسیم شد و ضریب تعیین با برازش معادله نمایی ۵ بر روی نقاط برآورد گردید. منحنی تغییرات ضریب C و R^2 در شکل ۴ ارایه شده است. ملاحظه می‌شود، بیش‌ترین مقدار R^2 به‌ازای ضریب C در محدوده ۴- و ۵- حاصل می‌شود. به‌منظور یافتن بهترین مقدار ضریب C ، پارامتر Y به‌ازای C از ۴- 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 ۴- برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. به‌ازای C برابر با ۴-، 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:

$$ET, HG TS = 0.09 R_a (T_m - \epsilon) (T_d - T_n)^{-0.51} \quad (10)$$

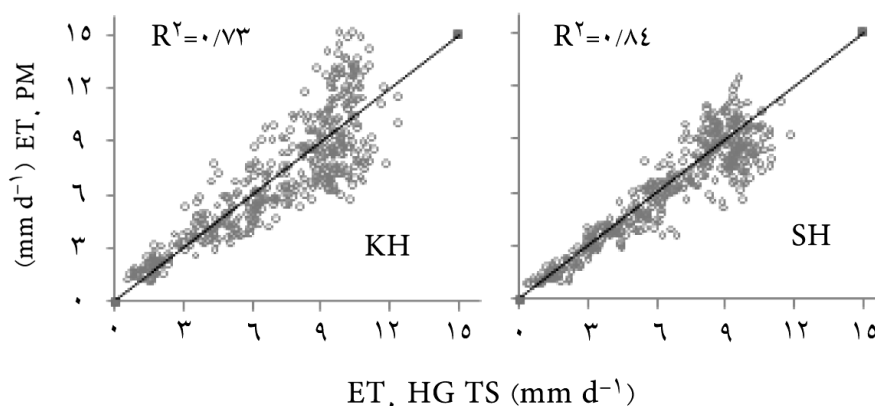
رابطه بالا برای ایستگاه‌های خرابی و شعبیه (داده‌های آزمون) اجرا شد. مقایسه بین معادله $HG TS$ و PM در شکل ۶ ارایه شده است. ملاحظه می‌شود نتایج توزیع نقاط حول خط ۱:۱ در دو ایستگاه بالا بهتر از مدل واسنجی شده هارگریوز برای داده‌های هواشناسی است. در هر دو ایستگاه، به تقریب نقاط به‌طور یکسان در دو طرف خط 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 ۶ مشاهده می‌شود، خطای مدل برای مقادیر بیش از ۸ میلی‌متر در روز زیاد می‌باشد.



شکل ۴- 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 ۶- پراکنش نتایج تبخیر و تعرق گیاه مرجع مدل هارگریوز واسنجی شده با داده‌های ورودی دمای سطح زمین و مدل پنمن مانیتث برای ایستگاه‌های آزمون.

خلاصه نتایج آماری دو مدل واسنجی شده در جدول ۲ ارائه 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 خرابی و شعیه 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 این که 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 HG TS			مدل CHG		
	MBE mm d ⁻¹	RMSE mm d ⁻¹	R ²	MBE mm d ⁻¹	RMSE mm d ⁻¹	R ²
خزایی	۰/۰	۱/۷	۰/۷۳	-۰/۳	۱/۹	۰/۷۰
شعیبیه	۰/۳	۱/۲	۰/۸۴	۰/۳	۱/۱	۰/۸۷
میانگین	۰/۲	۱/۵	۰/۷۹	۰/۰	۱/۵	۰/۷۹

مقایسه نتایج این بررسی با پژوهش‌های قبلی: نتایج این بررسی و نتایج پژوهش‌های گذشته در جدول ۳ برای مقایسه ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، ضریب تعیین روش‌های ساده‌سازی مدل پنمن مانیتث 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 مانیتث 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	۰/۴۷	-
مرادی و رحیمی‌خوب (۲۰۱۲)	قزوین	مدل شبکه درختی M5	۰/۸۱	-	۸/۵
ریواس و کیسل (۲۰۰۴)	آرژانتین	ساده‌سازی مدل پنمن مانتیث	-	۰/۶۰	-
ماندا و همکاران (۲۰۱۱)	کنیا	واسنجی معادله هارگریوز	۰/۶۷	۰/۴۷	-
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 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 ارائه 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 روزهای بدون آمار بازسازی شود.

منابع

- 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.
- Hargreaves, G.H., and Allen, R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. J. Irrig. Drain. Engin. 129: 1. 53-63.
- 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.
- 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. Yarahmadi¹ and *A. Rahimikhoob²

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, ²Professor, 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 (T_s) 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 T_s 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