

تعیین مناسب‌ترین مدل تابش در معادله هارگریوز-سامانی در دشت شهرکرد با استفاده از داده‌های لایسیمتر

محمد امین زارعی^{۱*}، سید حسن طباطبائی^۲، حسین بابازاده^۳ و حسین صدقی^۴

چکیده

تابش خورشیدی از مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار بر تبخیر-تعرق بوده که برآورد دقیق آن در برآورد نیاز آبی گیاهان مؤثر است. به همین دلیل در این پژوهش اثر چند مدل تابش خورشیدی (R_s) بر نتیجه معادله هارگریوز-سامانی در برآورد تبخیر-تعرق مرجع چمن (ET_0) در دشت شهرکرد بررسی شد. بدین منظور با در نظر گرفتن میزان تابش محاسبه شده از مدل‌های هارگریوز-سامانی، دورنباس-پروت، آناندل و همکاران، آلن، ارتکین-یالدیز، سامانی، گودین و همکاران و محمود-هابارد، تبخیر-تعرق مرجع از معادله هارگریوز-سامانی محاسبه و نتیجه با تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر مقایسه گردید. نتایج نشان دادند تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده براساس تمام مدل‌های تابش به استثنای مدل سامانی، کمتر از تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده است. با مقایسه شاخص‌های آماری و نسبت‌های مقادیر برآورد شده به اندازه‌گیری شده، مشخص شد که دقیق‌ترین مدل تابش از نظر تأثیر بر محاسبه تبخیر-تعرق مرجع با معادله هارگریوز-سامانی در منطقه مورد مطالعه، مدل محمود-هابارد است. تبخیر-تعرق مرجع براساس این مدل با ۸٪ تخمین کمتر، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و خطای انحراف (MBE) به ترتیب برابر $0.92 \text{ Mj}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ و -0.43 ، خطای نسبی (RE) برابر 1.73% ، شاخص توافق (d) برابر 0.99 و بازده مدل برابر ۶۲ درصد دارای بهترین نتایج نسبت به تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر است. همچنین تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده براساس مدل گودین و همکاران دارای ضعیف‌ترین نتایج بود.

واژه‌های کلیدی: تابش، تبخیر-تعرق مرجع، دشت شهرکرد، معادله هارگریوز-سامانی.

ارجاع: زارعی م. ا. طباطبائی س. ح. بابازاده ح. و صدقی ح. ۱۳۹۴. تعیین مناسب‌ترین مدل تابش در معادله هارگریوز-سامانی در دشت شهرکرد با استفاده از داده‌های لایسیمتر. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۴۷-۵۶.

۱- دانشجوی دکتری آبیاری زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

* نویسنده مسئول: mohammadaminzareei@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۰۹

مقدمه

معادله‌های گوناگونی برای تخمین تبخیر- تعرق مرجع چمن (ET_0) ارائه شده است. این معادله‌ها در محدوده معادله‌های بسیار پیچیده توازن انرژی (مانند پنمن-مانتیث) که نیاز به داده‌های اقلیمی زیاد دارند (آلن، ۱۹۸۹) تا معادله‌های ساده‌تر که به داده‌های کمتری نیاز دارند (بلانی و کریدل، ۱۹۵۰ و هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۲ و ۱۹۸۵) قرار گرفته‌اند. معادله‌های تجربی به دلیل سادگی و تعداد کمتر پارامترهای ورودی در محاسبات آن‌ها، به عنوان روش‌های پرکاربرد محسوب می‌شوند. معادله هارگریوز- سامانی (۱۹۸۵) از معادله‌های تجربی معمول مورد استفاده است.

مهم‌ترین پارامترها در تخمین ET_0 ، دما و تابش خورشیدی هستند. براساس نتایج جنسن (۱۹۸۵) حداقل ۸۰٪ از ET_0 توسط پارامترهای دما و تابش خورشیدی کنترل می‌شود. فرایند تبخیر- تعرق با میزان انرژی موجود برای تبخیر آب تعیین می‌شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). تابش خورشیدی (R_s) با فراهم کردن انرژی، نقشی کلیدی در بیان انرژی در سیستم زمین- جو بازی می‌کند (ایزومون و مایر، ۲۰۰۲) و متغیری کلیدی در محاسبه ET_0 است. هارگریوز و سامانی (۱۹۸۲) معادله ساده‌ای به‌صورت زیر برای تخمین تابش خورشیدی (R_s) پیشنهاد کردند:

$$R_s = (KT)(R_a)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (1)$$

در معادله بالا R_a تابش خارج از جو (mm/day)، T_{max} و T_{min} به ترتیب دماهای بیشینه و کمینه (درجه سلسیوس) و KT ضریب تجربی معادله (۰/۱۶۲) برای ناحیه‌های داخلی و ۰/۱۹ در ناحیه ساحلی) است.

ترکیب معادله (۱) با معادله اولیه هارگریوز (هانسن و همکاران، ۱۹۷۹) سبب یک معادله ساده شد که فقط به دو پارامتر دما و عرض جغرافیایی در تخمین تبخیر- تعرق مرجع (ET_0) نیاز دارد (هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۲ و ۱۹۸۵). این معادله ساده شده به صورت زیر است:

$$ET_0 = 0.0135 (KT)(R_a)(T_{max} - T_{min})^{0.5} (T + 17.8) \quad (2)$$

که در آن T دمای میانگین هوا است. معادله (۲) و ضریب تجربی آن (KT)، در پژوهش‌های زیادی ارزیابی شده و قابلیت آن در تخمین مناسب تبخیر- تعرق مرجع به اثبات رسیده است.

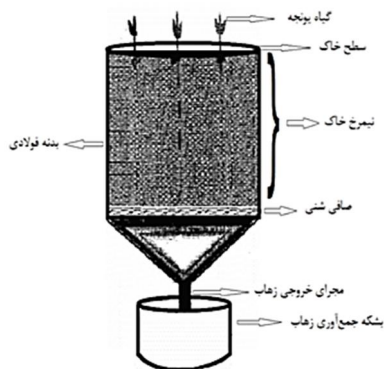
قمرنیا و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند برای منطقه‌هایی که به اندازه کافی بزرگ هستند و با استفاده از داده‌های مطمئن و تعداد کافی ایستگاه‌ها، ضریب اولیه ۰/۰۲۳ استفاده شده در معادله هارگریوز- سامانی نیازی به تعدیل نداشته و می‌تواند با اطمینان بالا به کار برده شود. باتیستا و همکاران (۲۰۰۹) ضریب‌های اولیه معادله‌های هارگریوز- سامانی و تورن- وایت را در کشور مکزیک واسنجی کرده و نشان دادند با استفاده از معادله هارگریوز- سامانی بدون تعدیل، تخمین‌های مناسبی به دست می‌آید. رویزکانالز و همکاران (۲۰۰۷) معادله هارگریوز- سامانی را برای تخمین تبخیر- تعرق مرجع روزانه (ET_0) در شرایط نیمه‌خشک جنوب اسپانیا واسنجی کرده و نشان دادند معادله هارگریوز- سامانی بدون هیچ‌گونه واسنجی، در منطقه مورد مطالعه دارای دقت خوبی بود.

پژوهش‌های مختلفی بر پایه معادله پنمن برای بررسی اثر تابش و دیگر متغیرهای اقلیمی ورودی برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع انجام شده است. سبزی‌پور و همکاران (۱۳۸۷) از تلفیق ۴ معادله تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_0) با ۴ مدل برآورد تابش، در مجموع ۱۶ سناریوی مختلف برای برآورد ET_0 بدست آورده و نتایج حاصل از این سناریوها را با داده‌های حاصل از نتایج لایسیمتر در اقلیم سرد نیمه‌خشک همدان ارزیابی کردند. نتایج نشان داد معادله جنسن- هیز که مدل تابش دانشیار در آن استفاده شده، در مقایسه با سایر مدل‌ها مقدار ET_0 را با دقتی بهتر برآورد می‌کند. ایرماک و همکاران (۲۰۰۶) نتیجه گرفتند R_s نیروی غالب پیش‌برنده ET_0 در منطقه‌های مرطوب در طول ماه‌های تابستان است و در اقلیم‌های جزیره‌ای و نیمه‌خشک در ماه‌های تابستان، ET_0 بیشتر تحت تأثیر دمای بیشینه است در حالیکه ET_0 در اقلیم نیمه‌مرطوب به شکل مساوی تحت تأثیر دمای بیشینه و R_s می‌باشد. ایرماک و همکاران (۲۰۱۰) اثر ۱۹ مدل تابش خالص با ساختار و پیچیدگی متفاوت را بر تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن و یونجه بررسی کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند بیشترین اثر تابش خالص (R_n) بر تبخیر- تعرق مرجع، مربوط به روش‌های استفاده شده برای محاسبه انتشار جوی نسبت به روش‌های مورد استفاده در محاسبه تابش خورشیدی آسمان صاف (R_{s0}) یا فاکتور تعدیل ابر است. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد مدل تابش خالص که از معادله هارگریوز و

مشخصات لایسیمتر

این مطالعه با استفاده از داده‌های یک لایسیمتر زهکش‌دار کشت شده با یونجه در ایستگاه تحقیقات کشاورزی چهارتخته (به وسعت ۲۷ هکتار) متعلق به مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری (شهرکرد) انجام شد. لایسیمتر مورد استفاده در وسط قطعه زمینی به ابعاد 25×40 متر (۱۰۰۰ مترمربع پوشیده شده از یونجه یک ساله) قرار دارد و با پوششی از گیاهان مختلف زراعی در اراضی مجاور و در جهت‌های شمال، جنوب، غرب و شرق (۱۲ هکتار) احاطه شده است (شکل ۱). هدف از نصب این لایسیمتر، اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاه مرجع یونجه و تبدیل آن به تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن با ضریب‌های مربوطه است. تاریخ شروع آماربرداری اول اردیبهشت ۱۳۹۰ و پایان آن در سیام مهر ۱۳۹۰ بود.

عمق خاک لایسیمتر ۲/۵ متر و قطر لایسیمتر ۳ متر بوده که مساحتی برابر با $7/06$ مترمربع را می‌پوشاند. در کنار لایسیمتر، چاهک اندازه‌گیری آب زهکش شده به مساحت ۲ متر مربع و عمق ۳/۵ متر از سطح زمین احداث شده است. شکل ۲ نمایی از لایسیمتر مورد استفاده را نشان می‌دهد. شکل ۳ برخی ویژگی‌های خاک لایسیمتر در عمق‌های مختلف را نشان می‌دهد. ظرفیت زراعی (FC) در عمق‌های مختلف خاک لایسیمتر متفاوت و بین ۱۷/۲ تا ۲۳/۰ درصد وزنی با میانگین ۱۹/۵ درصد است. نقطه پژمردگی دائم (PWP) بین ۹/۵ تا ۱۳/۵ درصد وزنی و میانگین آن ۱۰/۸ درصد است (شکل ۳-الف). همچنین وزن مخصوص ظاهری خاک هر لایه بین ۱/۳۴ تا ۱/۷۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر بوده و میانگین آن ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است (شکل ۳-ب).



شکل ۲- نمایی از لایسیمتر مورد استفاده در پژوهش

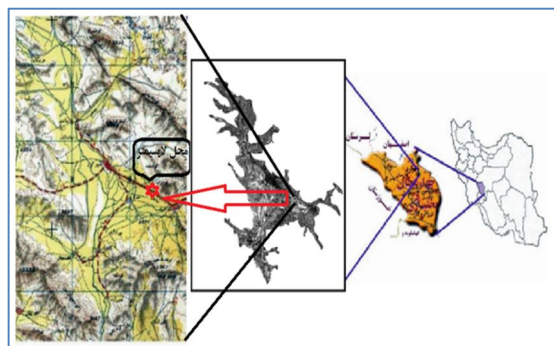
سامانی (۱۹۸۲) در محاسبه R_s در آن استفاده شده بود، به دلیل عدم واسنجی یا تصحیح ضریب‌های این معادله برای منطقه‌های مورد بررسی در این پژوهش، دارای نتایج ضعیف تا متوسط است.

تاکنون پژوهش‌های زیادی در مورد اثر روش برآورد تابش خورشیدی (R_s) بر نتایج معادله هارگریوز-سامانی در تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) در دشت شهرکرد صورت نگرفته است. در این پژوهش تأثیر ۸ مدل مختلف تابش بر نتایج تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده از معادله هارگریوز-سامانی، با استفاده از اندازه‌گیری‌های لایسیمتری، بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد پژوهش دشت شهرکرد در حوضه آبخیز کارون بوده و بین طول‌های $38^{\circ} 50'$ تا $51^{\circ} 10'$ شمالی و عرض‌های $32^{\circ} 07'$ تا $33^{\circ} 35'$ شرقی قرار دارد. این دشت از شمال و شمال غرب به ارتفاعات کلاه‌قازی، قراول‌خانه، چهل دختران و از نواحی جنوب به ارتفاعات جهان‌بین و تفه، از شرق به ارتفاعات کوه سینه و برات و از غرب به ارتفاعات کوه قلنگان و ارتفاعات مشرف به جاده فارسان منتهی می‌شود. محدوده مطالعاتی دارای میانگین دمای سالانه $12/02$ درجه سلسیوس است. همچنین متوسط بارندگی سالانه در کل حوضه آبریز ۴۰۰ میلی‌متر و اقلیم منطقه مطالعاتی نیمه‌مرطوب معتدل سرد است (مهدوی و همکاران، ۱۳۹۰). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد بررسی و لایسیمتر را در نقشه ایران نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محل نصب لایسیمتر

در این معادله d_n مقدار آب مورد نیاز گیاه بر حسب میلی‌متر، FC ظرفیت زراعی (وزنی) مزرعه، θ_i رطوبت وزنی لایه خاک قبل از آبیاری، D عمق خاک (عمق هر لایه) بر حسب میلی‌متر، ρ_b وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، و n تعداد لایه‌های خاک است.

میزان تبخیر و تعرق از لایسیمتر با استفاده از معادله (۴) برای هر روز در دوره پژوهش تعیین شد.

$$ET = I + P - D - \Delta\theta \quad (4)$$

در این معادله ET تبخیر و تعرق گیاه در لایسیمتر، I آب آبیاری، P میزان بارش، D مقدار آب زهکشی شده (نفوذ عمقی)، $\Delta\theta$ تغییر رطوبت حجمی خاک بین دو اندازه‌گیری رطوبت ($\theta_2 - \theta_1$) است و همه پارامترها بر حسب میلی‌متر هستند. از آنجا که تبخیر-تعرق مرجع به دست آمده از لایسیمتر برای گیاه یونجه بوده، بنابراین با کاربرد ضریب تبدیل و به‌صورت معادله زیر، این مقادیر به تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن تبدیل شده‌اند (مرشدی، ۱۳۹۱):

$$ET_0 = 0.88 \times ET_r \quad (5)$$

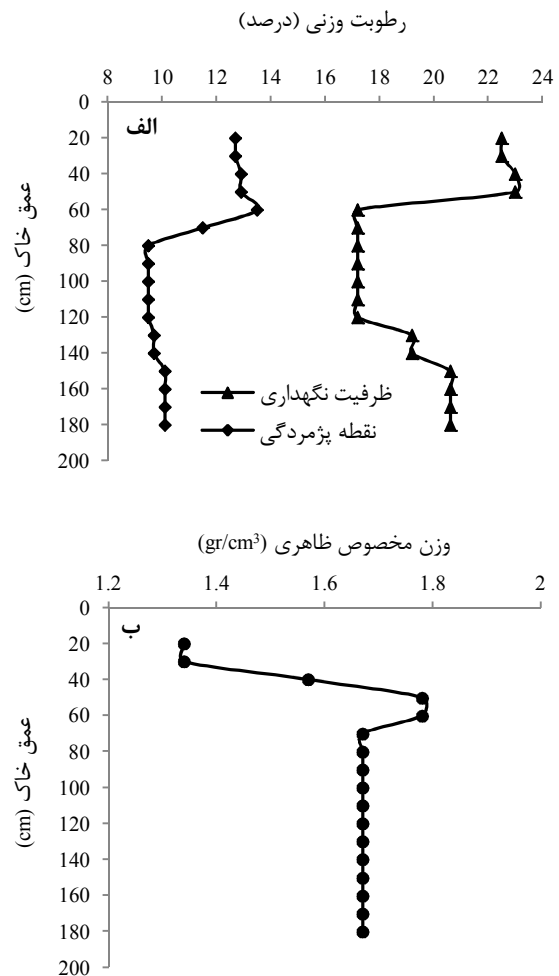
در این معادله ET_r تبخیر-تعرق گیاه مرجع یونجه و ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن است.

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش از ایستگاه هواشناسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی شهرکرد در محل انجام پژوهش به دست آمد. متغیرهای هواشناسی استفاده شده شامل بارش، سرعت باد، دماهای بیشینه، کمینه و میانگین دمای هوا، دمای خاک و دمای نقطه شبنم، تابش، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، نسبت ابری بودن و تبخیر از تشتک هستند. داده‌های هواشناسی هر ۳ ساعت ثبت شدند و برای استفاده از آنها در محاسبات، میانگین روزانه آنها محاسبه شد.

محاسبه تشعشع خورشیدی در سطح زمین

برای محاسبه تشعشع خورشیدی (R_s) و استفاده از آن در معادله محاسبه تبخیر-تعرق مرجع، از معادله‌های خلاصه شده در جدول ۱ استفاده شد. در این پژوهش کلیه محاسبات تابش و تبخیر-تعرق با نرم‌افزار اکسل انجام شد.



شکل ۳- ویژگی‌های خاک لایسیمتر در اعماق مختلف، الف- نقطه پژمردگی و ظرفیت نگهداری (درصد وزنی) و ب- وزن مخصوص ظاهری خاک (gr/cm^3)

چگونگی اندازه‌گیری رطوبت خاک، مقدار آب آبیاری

و تعیین تبخیر و تعرق در لایسیمتر

زمان آبیاری براساس خروج حدود ۵۰ درصد آب سهل‌الوصول خاک بوده و مقدار آن بر پایه اندازه‌گیری منظم میزان رطوبت خاک تا عمق ۱۸۰ سانتی‌متری در خاک لایسیمتر بود.

با اندازه‌گیری رطوبت خاک در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری تا عمق ۱۸۰ سانتی‌متر با نوترون‌متر (مدل CPN503-DR) و جبران کاهش رطوبت نسبت به ظرفیت زراعی با استفاده از معادله ۳، مقدار آب (حجم) لازم برای هر لایه ۱۰ سانتی‌متری از خاک محاسبه و با در نظر گرفتن تمام لایه‌ها، آب مورد نیاز (حجم کل آب) از طریق کنتور به داخل لایسیمتر افزوده می‌شد.

$$d_n = \sum_{i=1}^n (FC - \theta_i) \cdot D \cdot \rho_b \quad (3)$$

MBE، و RE برای آن کمترین بوده و مقدار شاخص‌های ME، d و R^2 به یک نزدیک‌تر باشند و همچنین عرض از مبدأ خط رگرسیون مربوط به مدل به صفر و شیب آن به یک نزدیک‌تر باشد.

نتایج و بحث

بررسی تغییرات زمانی تبخیر- تفرق مرجع روزانه (ET_0)

پس از محاسبه تابش خورشیدی از روش‌های ذکر شده در جدول ۱ تبخیر- تفرق روزانه گیاه مرجع چمن (ET_0) از معادله هارگریوز- سامانی برای هر روز محاسبه و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. سپس مقادیر تبخیر- تفرق مرجع تخمینی با تبخیر- تفرق اندازه‌گیری شده از طریق لایسیمتر مقایسه می‌شوند.

شکل ۴ تغییرات زمانی تبخیر- تفرق مرجع محاسبه‌ای نسبت به تبخیر- تفرق مرجع اندازه‌گیری شده لایسیمتری را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۲ ویژگی‌های خط رگرسیون و مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ و شکل ۴، معادله هارگریوز- سامانی براساس بیشتر معادله‌های تابش، نسبت به تبخیر- تفرق مرجع اندازه‌گیری شده دارای کم تخمینی بوده که این در توافق با نتایج پژوهش‌های قبلی است (تمسگن و همکاران، ۲۰۰۵؛ تراچکویک، ۲۰۰۵ و دپادیا و مارتینز، ۲۰۱۲). بیشترین اختلاف (کم تخمینی) مربوط به روش گودین و همکاران (۱۹۹۹) با نسبت تبخیر- تفرق مرجع محاسبه‌ای به اندازه‌گیری شده برابر با ۰/۴۴ بوده و روش ارتکین- یالدیز با نسبت ۰/۶۹ در رتبه بعدی قرار دارد. بنابراین از نظر اختلاف نسبت به داده‌های لایسیمتری، دو روش مذکور دارای ضعیف‌ترین نتایج بوده‌اند. تبخیر- تفرق محاسبه‌ای براساس معادله‌های تابش دورنباس- پروت و آلن با نسبت تخمینی به اندازه‌گیری شده برابر با ۰/۸۰ در رتبه بعد و دارای شرایط به طور تقریبی مشابه بوده‌اند. همچنین محاسبه تبخیر- تفرق مرجع براساس معادله تابش محمود- هابارد و معادله آناندل و همکاران به ترتیب با ۰/۸ و ۱۰٪ کم تخمینی دارای بهترین نتایج بوده‌اند. طبق شکل ۴ و جدول ۲ معادله هارگریوز- سامانی فقط براساس تابش تخمینی از معادله سامانی دارای میزان زیادی بیش تخمینی برابر با ۴۱٪ بوده است.

جدول ۱- معادله‌های تابش استفاده شده در پژوهش

ردیف	نام	منبع
۱	هارگریوز- سامانی	هارگریوز و سامانی (۱۹۸۲)
۲	دورنباس و پروت	دورنباس و پروت (۱۹۷۷)
۳	تعدیل یافته هارگریوز- سامانی	آناندل و همکاران (۲۰۰۲)
۴	تعدیلی هارگریوز- سامانی	آلن (۱۹۹۵)
۵	تعدیلی هارگریوز- سامانی	سامانی (۲۰۰۰)
۶	گودین و همکاران	گودین و همکاران (۱۹۹۹)
۷	محمود و هابارد	محمود و هابارد (۲۰۰۲)
۸	ارتکین- یالدیز	ارتکین و یالدیز (۱۹۹۹)

محاسبه تبخیر- تفرق مرجع (ET_0)

در این پژوهش، هدف محاسبه تبخیر- تفرق مرجع چمن (ET_0) به وسیله معادله هارگریوز- سامانی (با کاربرد معادلات مختلف تابش) و مقایسه آن با تبخیر- تفرق اندازه‌گیری شده حاصل از لایسیمتر است. معادله تبخیر- تفرق ارائه شده توسط هارگریوز- سامانی (۱۹۸۵) به صورت زیر است:

$$ET_0 = 0.0023 R_a (T + 17.8)(TD)^{0.5} \quad (۶)$$

در این معادله ET_0 تبخیر- تفرق گیاه مرجع (mm/day) و T دمای میانگین هوا ($^{\circ}C$) و R_a تابش خارج از جو است.

تحلیل آماری و ارزیابی روش‌ها

شاخص‌های آماری مختلفی در ارزیابی مدل‌ها استفاده می‌شوند. در این پژوهش از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربع خطا^۱ (RMSE)، شاخص توافق^۲ (d)، میانگین انحراف خطا^۳ (MBE)، شاخص بازده مدل^۴ (ME)، میانگین خطای نسبی^۵ (RE) و ضریب تعیین^۶ (R^2) برای ارزیابی و مقایسه تبخیر- تفرق تخمینی از معادله هارگریوز- سامانی با مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده شد. همچنین بهترین خط رگرسیون از بین نقاط مربوط به تبخیر- تفرق تخمینی و اندازه‌گیری شده، عبور داده شده و شیب خط و عرض از مبدأ مشخص گردید. بهترین مدل پیش‌بینی آن است که مقادیر RMSE،

1- Root Mean Square Error
2- Index of agreement
3- Mean Bias Error
4- Model Efficiency
5- Relative Error
6- coefficient of determination

مقایسه آماری تبخیر- تعرق محاسبه و اندازه‌گیری شده

شکل ۵ تبخیر- تعرق مرجع (ET_0) محاسبه شده از معادله هارگریوز- سامانی براساس معادله‌های مختلف تابش را در برابر تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر نشان می‌دهد. جدول ۲ ویژگی‌های خط رگرسیون و مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه تبخیر- تعرق مرجع تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر- تعرق روزانه را نشان می‌دهد. براساس جدول ۲ تبخیر- تعرق محاسبه‌ای از معادله هارگریوز- سامانی با استفاده از مدل‌های تابش هارگریوز- سامانی، آناندل و همکاران و مدل تابش آلن نسبت به تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده، بیشترین ضریب تعیین (R^2) را داشته‌اند و از این لحاظ در رتبه نخست قرار دارند. روش‌های محمود-هابارد و ارتکین- یالدیز به ترتیب در رتبه‌های بعد قرار دارند و روش سامانی با ضریب تعیین به مقدار ۰/۳۳ در رتبه آخر می‌باشد.

با بررسی سایر پارامترها می‌توان به قضاوت جامع و صحیح راجع به کارایی معادله‌های تابش در محاسبه تبخیر- تعرق مرجع (ET_0) با معادله هارگریوز- سامانی رسید. با مشاهده جدول ۲ مشخص می‌شود روش‌های محمود-هابارد، آناندل و همکاران و روش هارگریوز- سامانی به ترتیب با ۸٪، ۱۰٪ و ۱۳٪ کم تخمینی در تبخیر- تعرق مرجع محاسبه‌ای نسبت به اندازه‌گیری شده، دارای بالاترین دقت بوده‌اند. همین نتیجه‌ها در مورد خطای انحراف (MBE) نیز مشاهده می‌شود. مدل گودین و همکاران با MBE برابر با $-3/09 \text{ Mj}/(\text{m}^2.\text{day})$ ضعیف‌ترین نتیجه را در برآورد تبخیر- تعرق مرجع با معادله هارگریوز- سامانی داشته است.

باتوجه به مقادیر ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) در جدول ۲ مشخص می‌شود مدل‌های آناندل و همکاران و محمود-هابارد با RMSE به ترتیب برابر با $\text{Mj}/(\text{m}^2.\text{day})$ ۰/۹۱ و ۰/۹۲ بهترین مدل‌ها در محاسبه تبخیر- تعرق مرجع بوده و مدل هارگریوز- سامانی با RMSE معادل با $1/06 \text{ Mj}/(\text{m}^2.\text{day})$ در رتبه بعد قرار دارد. مدل گودین و همکاران با بیشترین مقدار RMSE دارای ضعیف‌ترین نتیجه است. از نظر میزان خطای نسبی (RE)، براساس ارقام جدول ۲ مدل‌های محمود-هابارد، آناندل و همکاران و مدل هارگریوز- سامانی به ترتیب دارای بهترین تأثیر در

محاسبه تبخیر- تعرق مرجع بوده و مدل گودین و همکاران دارای ضعیف‌ترین نتیجه بوده است.

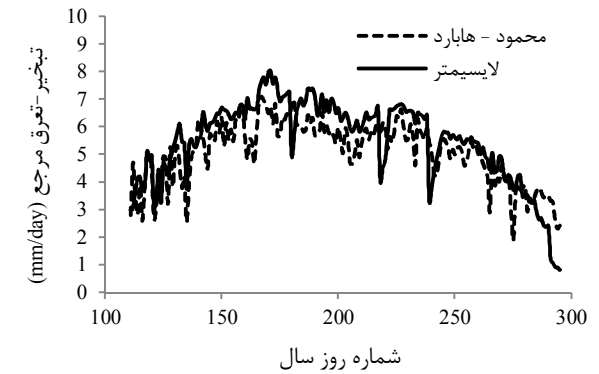
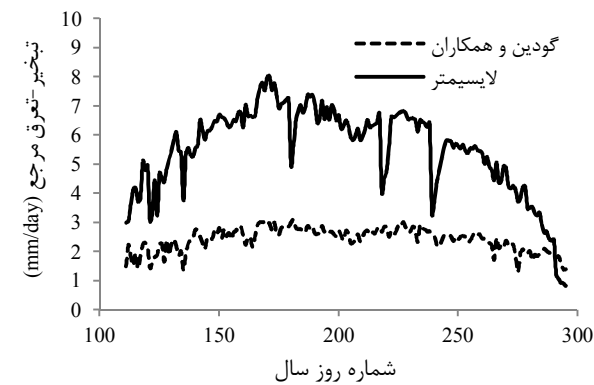
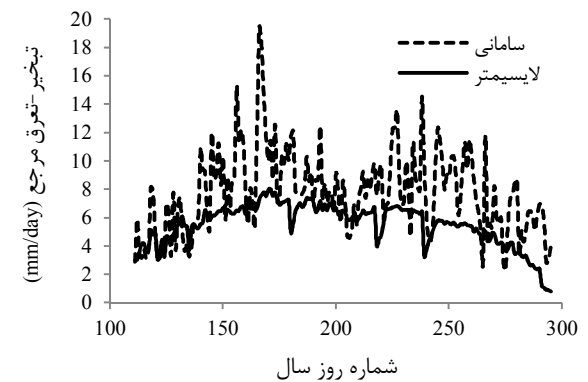
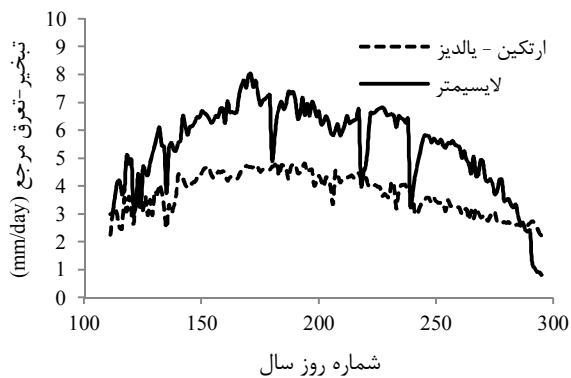
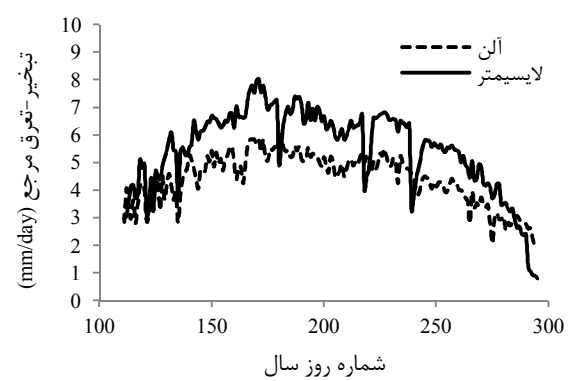
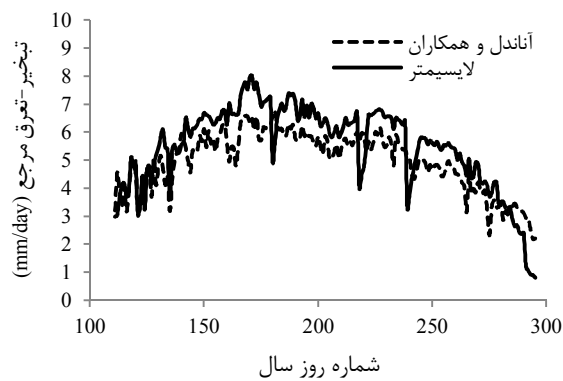
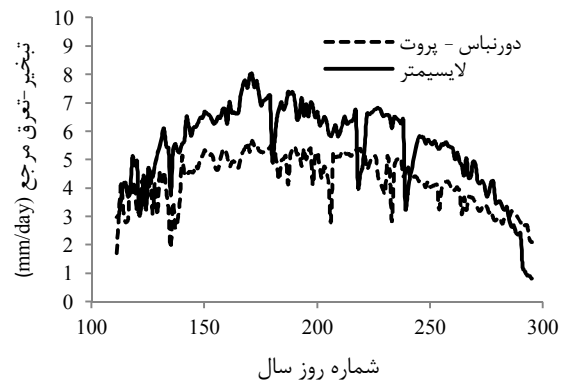
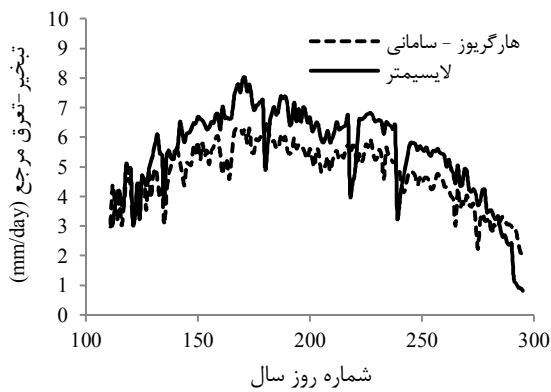
درنهایت با مشاهده شاخص توافق (d) و بازده مدل (ME) در جدول ۲ معلوم می‌شود که مدل محمود-هابارد و مدل آناندل و همکاران با شاخص توافق و بازده مدل مساوی و به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۶۲ دارای بهترین نتیجه از نظر تأثیر در برآورد تبخیر- تعرق بوده و مدل هارگریوز- سامانی با شاخص توافق به میزان ۰/۹۹ و بازده مدل به میزان ۰/۵۰ در رتبه سوم قرار دارد و مدل سامانی با شاخص توافق و بازده به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۳/۸۸- و مدل گودین و همکاران با شاخص توافق و بازده مدل به ترتیب معادل با ۰/۹۳ و ۳/۹۲- دارای ضعیف‌ترین نتایج بوده‌اند.

با دیدن تمام پارامترهای آماری، نتیجه‌گیری می‌شود دقیق‌ترین مدل تابش از نظر تأثیر بر محاسبه تبخیر- تعرق توسط معادله هارگریوز- سامانی در منطقه مورد بررسی، مدل محمود-هابارد بوده و مدل آناندل و همکاران در رتبه دوم قرار دارد. همچنین مدل‌های گودین و همکاران و سامانی دارای بدترین نتایج بوده که مدل گودین و همکاران با ضعیف‌ترین نتیجه در رتبه آخر قرار دارد. حسینی و همکاران (۱۳۹۰) نیز در ارزیابی نتایج چند مدل تابش و اثر آن‌ها بر معادله تبخیر- تعرق پنمن-مانتیت- فائو ۵۶ در استان زنجان، مدل تابش آناندل و همکاران را بهترین و مدل سامانی را دارای ضعیف‌ترین نتایج معرفی کردند. همچنین نتایج دپادیا و مارتینز (۲۰۱۲) در کالیفرنیا نشان داد که دقت معادله تبخیر- تعرق تورک (۱۹۶۱) با کاربرد تابش حاصل از ضریب‌های اولیه هارگریوز- سامانی، کمتر از دقت حاصل از معادله کالیبره شده تورک است. مدل تابش محمود-هابارد دارای پایه‌ای فیزیکی بوده و تحت شرایط متنوع و براساس داده‌های ۹ ساله به دست آمده است (محمود و هابارد، ۲۰۰۲)، به همین دلیل بهترین نتایج را در محاسبه تبخیر- تعرق داشته است.

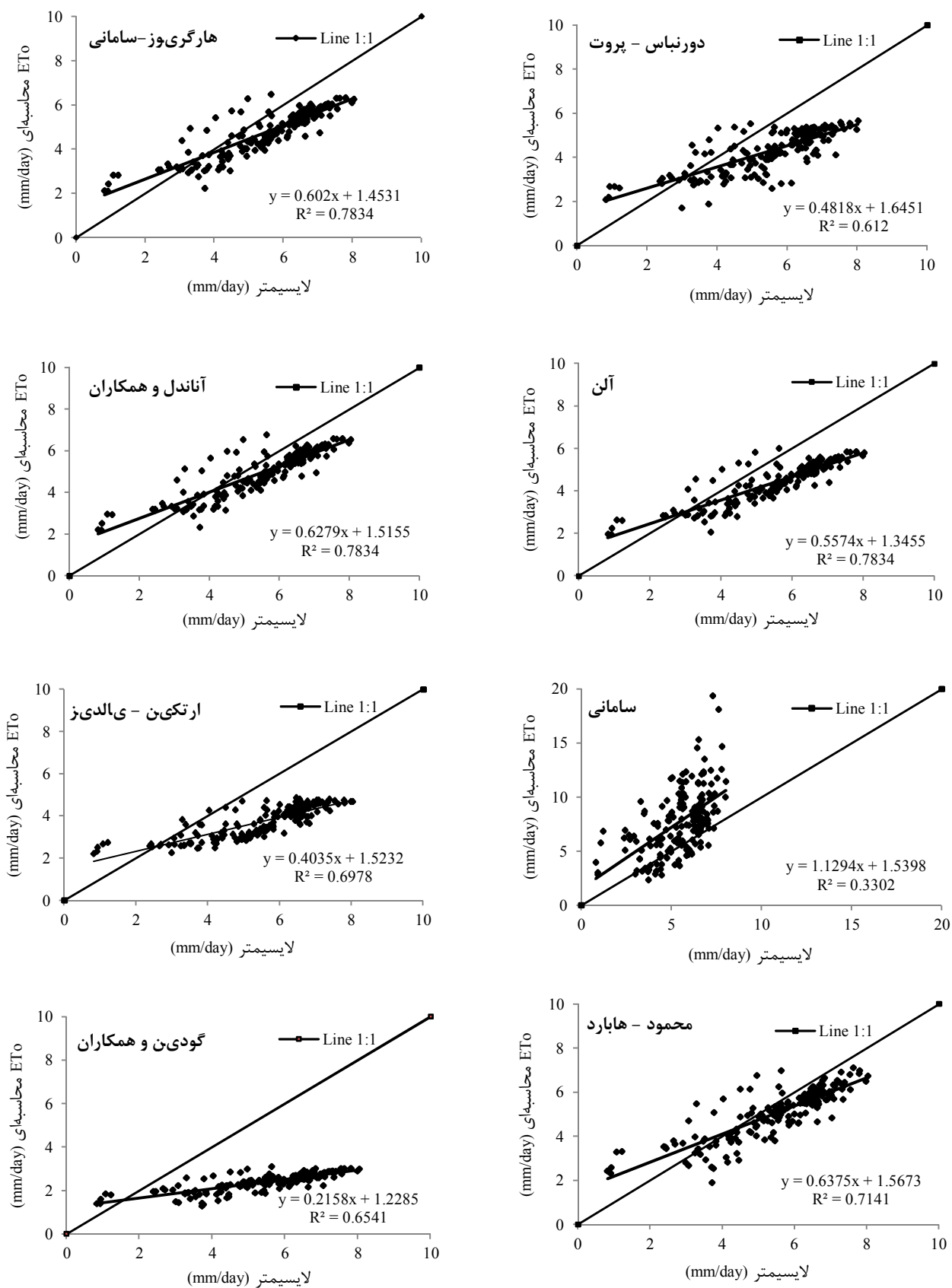
همچنین مدل تعدیلی آناندل و همکاران اثر ارتفاع و کاهش ضخامت اتمسفر را بر مدل اولیه هارگریوز- سامانی در نظر می‌گیرد و از آنجا که منطقه مورد پژوهش (دشت شهرکرد) از منطقه‌های مرتفع محسوب می‌شود، بنابراین به‌عنوان مدلی مناسب در رتبه دوم از لحاظ تأثیر بر محاسبه تبخیر- تعرق بوده است. نتایج ضعیف مدل گودین و همکاران بر محاسبه تبخیر- تعرق مرجع نیز به

علت آن است که ضریب‌های مربوط به این مدل در شرایط

محدود به دست آمده‌اند (محمود و هابارد، ۲۰۰۲).



شکل ۴- تغییرات زمانی تبخیر-تفرق مرجع روش هارگریوز-سامانی براساس مدل‌های مختلف تابش به همراه تبخیر-تفرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر



شکل ۵- تبخیر - تعرق مرجع محاسبه شده از معادله هارگریوز - سامانی براساس مدل‌های مختلف تابش در برابر تبخیر - تعرق مرجع اندازه‌گیری شده با لایسیمتر

جدول ۲- ویژگی‌های خط رگرسیون و شاخص‌های آماری حاصل از مقایسه تبخیر- تعرق مرجع تخمینی از معادله هارگریوز- سامانی براساس معادله‌های مختلف تابش و تبخیر- تعرق مرجع اندازه‌گیری شده لایسیمیتری

ME	MBE	d	RE	RMSE	R ²	b	a	$\frac{\overline{ET_{Oest}}}{\overline{ET_{Omeas}}}$	$\overline{ET_{Oest}}$	معادله تابش استفاده شده در محاسبه ET _o
۰/۵۰	-۰/۷۴	۰/۹۹	-۸/۰۳	۱/۰۶	۰/۷۸	۰/۶۰	۱/۴۵	۰/۸۷	۴/۷۷	هارگریوز- سامانی
-۰/۷۵	-۱/۱۱	۰/۹۷	-۱۳/۸۰	۱/۹۸	۰/۶۱	۰/۴۸	۱/۶۵	۰/۸۰	۴/۳۹	دورنباس- پروت
۰/۶۲	-۰/۵۳	۰/۹۹	-۴/۰۸	۰/۹۱	۰/۷۸	۰/۶۳	۱/۵۲	۰/۹۰	۴/۹۷	آناندل و همکاران
-۱/۱۲	-۱/۶۹	۰/۹۶	-۲۴/۴۵	۲/۱۷	۰/۷۰	۰/۴۰	۱/۵۲	۰/۶۹	۳/۸۱	ارتکین- یالدیز
۰/۱۸	-۱/۰۹	۰/۹۸	-۱۴/۸۴	۱/۳۵	۰/۷۸	۰/۵۶	۱/۳۵	۰/۸۰	۴/۴۱	آن
-۳/۸۸	۲/۲۵	۰/۸۵	۴۹/۳۷	۳/۳	۰/۳۳	۱/۱۳	۱/۵۴	۱/۴۱	۷/۷۶	سامانی
-۳/۹۲	-۳/۰۹	۰/۹۳	-۵۱/۹۱	۳/۳۱	۰/۶۵	۰/۲۲	۱/۲۳	۰/۴۴	۲/۴۲	گودین و همکاران
۰/۶۲	-۰/۴۳	۰/۹۹	-۱/۷۳	۰/۹۲	۰/۷۱	۰/۶۴	۱/۵۷	۰/۹۲	۵/۰۸	محمود- هابارد

$\overline{ET_{Oest}}$: میانگین تبخیر- تعرق تخمینی (Mj/(m².day))، $\overline{ET_{Omeas}}$: میانگین تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده (Mj/(m².day))، a: عرض از مبدأ خط رگرسیون (Mj/(m².day))، b: شیب خط رگرسیون.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر ۸ معادله تابش بر تبخیر- تعرق مرجع محاسبه شده با معادله هارگریوز- سامانی از طریق مقایسه با تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمیتری بررسی شد. نتایج نشان دادند تبخیر- تعرق مرجع محاسبه شده حاصل از مدل تابش محمود- هابارد با ۸٪ تخمین کمتری دارای بهترین نتیجه نسبت به تبخیر- تعرق حاصل از اندازه‌گیری لایسیمیتری بوده و مدل تابش آناندل و همکاران در مرتبه دوم قرار دارد. همچنین مدل تابش سامانی و مدل گودین و همکاران دارای بدترین نتیجه‌ها بودند که مدل گودین و همکاران با بیشترین کم تخمینی به میزان ۵۸٪ دارای ضعیف‌ترین نتیجه بود.

سپاس‌گزاری

پژوهش‌گران این مقاله از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی شهرکرد به خاطر همکاری در اجرای طرح و از اداره هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های هواشناسی تشکر می‌کنند.

منابع

- Allen R. G. Pereira L. S. Raes D. and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome. 301 p.
- Allen R. G. 1995. Evaluation of procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. Report submitted to the

- حسینی س. ح. جعفری ج. و ناظمی ا. ح. ۱۳۹۰. بررسی عملکرد روش‌های دمایی در برآورد تابش خورشیدی ماهانه و تعیین تبخیر و تعرق مرجع.

- یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، ۱۸ الی ۲۰ بهمن ماه ۱۳۹۰.
- سبزی‌پرور ع. تفضلی ف. زارع ابیانه ح. بانژاد ح. موسوی بایگی م. غفوری م. محسنی موحد ا و میرحانی ز. ۱۳۸۷. مقایسه چند مدل برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه‌خشک، به منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۲(۲): ۳۲۸-۳۴۰.
- مرشدی ع. ۱۳۹۱. تخمین و پهنه‌بندی میزان تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در دشت شهرکرد. پایان‌نامه دکتری رشته خاک‌شناسی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ۲۰۱ ص.
- مهدوی ع. نوری امامزاده‌ئی م. ر. مهدوی نجف‌آبادی ر. و طباطبائی س. ح. ۱۳۹۰. مکان‌یابی عرصه‌های مناسب تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی به روش منطق فازی در حوضه آبریز دشت شهرکرد. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۵(۵۶): ۶۳-۷۶.

20. Iziomon M. G. and Mayer H. 2002. Assessment of some global solar radiation parameterizations. 64(2): 1631-1643.
21. Jensen M. E. 1985. Personal communication, ASAE national conference, Chicago, IL.
22. Mahmood, R. and Hubbard K. G. 2002. Effect the time of temperature observation and estimation of daily solar radiation for the Northern Great Plains, USA. *Agronomy Journal*. 94(4): 723-733.
23. Martinez C. J. and Thepadia M. 2010. Estimating reference evapotranspiration with minimum data in Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 136(7): 494-501.
24. Ruiz-Canales A. 2007. Calibration of Hargreaves Equation for estimating reference evapotranspiration in the Southeast of Spain, en INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING. CIGR-AGENG 2012. , Valencia, Julio, 2012.
25. Samani Z. A. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 126(4): 265-267.
26. Temesgen, B. Eching S. Davidoff B. and Frame, K. 2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(1): 73-84.
27. Thepadia M. and Martinez C. J. 2012. Regional Calibration of Solar Radiation and Reference Evapotranspiration Estimates with Minimal Data in Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138(2): 111-119.
28. Trajkovic S. 2005. Temperature- based approaches for estimating reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(4): 316-323.
29. Turc L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a journal of *Agronomy*. 12(1): 13-49.
- United Nations Food and Agricultural Organization (FAO), Rome Italy.
7. Allen R. G. 1989. A penman for all seasons. *J. Irrig. and Drain Engr., ASCE*. 112(4):349-368.
8. Annandale J. G. Jovanic N. Z. Benade N. and Allen R. G. 2002. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrigation Science*. 21(2): 57-67.
9. Bautista D. Bautista F. and Delgado-carranza C. 2009. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications *Atmosfera*. 22(4): 331-348.
10. Blaney H. F. and Criddle W. D. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA/SCS, SCS-TP 96.
11. Doorenbos J. and Pruitt W. O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 24. Rome: FAO.
12. Ertekin C. and Yaldiz O. 1999. Estimation of monthly average daily global radiation on horizontal surface for Antalya (Turkey). *Renewable Energy*. 17: 95-102.
13. Ghamarnia H. Rezvani V. Khodaei E. and Mirzaei H. 2012. Time and Place Calibration of the Hargreaves Equation for Estimating Monthly Reference Evapotranspiration under Different Climatic Conditions. *Journal of Agricultural Science*. 4(3): 111-122.
14. Goodin D. G. Hutchinson J. M. S. Vanderlip R. L. and Knapp M. C. 1999. Estimating solar irradiance for crop modelling using daily air temperature data. *Agronomy Journal*. 91(5): 845-851.
15. Hansen V. E. Israelsen O. W. and Stringham G. E. 1979. *Irrigation principles and practices*. John Wiley and Sons, New York.
16. Hargreaves G. H. and Samani Z. A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 108(IR3): 223-230.
17. Hargreaves G. H. and Samani Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Transaction of ASAE*. 1(2): 96-99.
18. Irmak S. Payero J. O. Martin D. L. Irmak A. and Howell T. A. 2006. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of the standardized ASCE-Penman-Monteith equation to climate variables. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 132(6): 564-578.
19. Irmak S. Odhiambo L. and Mutibwa, D. 2011. Evaluating the Impact of Daily Net Radiation Models on Grass and Alfalfa- Reference Evapotranspiration Using the Penman-Monteith Equation in a Subhumid and Semiarid Climate. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*. 1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000278, 59-72.