

## ارزیابی تبخیر و تعرق با چند مدل ریاضی و سند ملی آب نسبت به داده‌های لایسیمتر در دشت مرتفع شهرکرد

علی مرشدی<sup>۱\*</sup>

استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، شهرکرد، ایران.

[a.morshedi@areo.ir](mailto:a.morshedi@areo.ir)

### چکیده

تبخیر و تعرق گیاه مرجع ( $ET_{ref}$ ) به روش مستقیم (لایسیمتری) و با به طور غیرمستقیم (مدل‌های ریاضی) تعیین می‌شود. در این تحقیق تبخیر و تعرق محاسبه شده با چند مدل ریاضی و سند ملی آب با نتایج یک لایسیمتر زهکش‌دار کشت شده یا بوئجه در دشت شهرکرد ارزیابی شده است. داده‌های تبخیر و تعرق برای یک دوره زمانی شش ماهه به صورت روزانه تهیه شده‌اند. به منظور ارزیابی و انتخاب مناسب‌ترین مدل پرآورد تبخیر و تعرق از شاخص‌های آماری  $d$ ،  $MAE$ ،  $NRMSE$  و  $R^2$  استفاده شد. نتایج نشان داد که بهترین مدل‌ها در بازه زمانی روزانه به ترتیب هارگریوز-سامانی (HS)، جنسن-هیوز (JH) و تورک (Turc) بودند. برای مدل HS مقادیر  $NRMSE$  و  $d$  به ترتیب ۰/۱۲۶ و ۰/۹۳۰ و  $MAE$  برابر با ۰/۴۷۷ میلی‌متر بر روز محاسبه شد. برای بازه زمانی ماهانه مناسب‌ترین مدل‌ها ASCE-PM HS و Turc معرفی شدند. بطور کلی مدل HS از بیشترین ضریب تبیین به میزان ۰/۹۸۵ و ۰/۹۹۸ در بازه‌های زمانی روزانه و ماهانه و مدل ASCE-PM از کمترین مقدار MBE نسبت به داده‌های لایسیمتری برخوردار بود. برای پرآورد تبخیر و تعرق کل در طول دوره رشد گیاه بوئجه به جز مدل‌های تورک و پرستنی-نیلور یغیه مدل‌ها  $ET_0$  را بیشتر پرآورد نمودند و نزدیک‌ترین مقدار، مربوط به مدل ASCE-PM برآیر یا ۱۱۶۱/۷ میلی‌متر و مقدار اندازه‌گیری شده از لایسیمتر ۱۱۵۷/۶ میلی‌متر بود. در گزارش بهینه‌سازی سند ملی الگوی مصرف آب کشاورزی ایران، نیاز آبی بوئجه در دشت شهرکرد به میزان ۶۴۹ میلی‌متر (در دوره زمانی مشابه) پرآورد شده که بسیار کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است.

واژه‌های کلیدی: اطلاعات هواشناسی، مدل‌های تبخیر و تعرق، هارگریوز-سامانی.

<sup>۱</sup> - آدرس نویسنده مسئول: شهرکرد، کیلومتر ۴ جاده فرخشهر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، بخش تحقیقات خاک و آب، صندوق پستی ۴۱۵.

\*- دریافت: بهمن ۱۳۹۳ و پذیرش: خرداد ۱۳۹۴

## مقدمه

در مناطق مرتفع و با توپوگرافی متنوع مانند دشت شهرکرد، تغییرات درجه حرارت و رطوبت زیاد است. اگرچه تغییرات رطوبت نسبت به ارتفاع نامنظم است ولی به طور کلی با افزایش ارتفاع، فشار بخار آب کاهش می‌یابد و نحوه تغییرات آن همانند تغییرات فشار با ارتفاع است (مهدوی، ۱۳۸۸). سرعت باد در اتمسفر رابطه مستقیم با گرادیان فشار دارد که برابر با نسبت اختلاف فشار بین دو نقطه به فاصله‌ای مشخص است، هر اندازه فاصله کمتر باشد گرادیان و در نتیجه سرعت باد بیشتر خواهد بود.

اصطکاک ناشی از یستی و بلندی‌های زمین باعث می‌شوند که سرعت باد بر روی خشکی‌های زمین ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش یابد. از طرفی با افزایش ارتفاع، سرعت باد به طور نمایی افزایش می‌یابد (مهدوی، ۱۳۸۸). تبخیر و تعرق با توجه به دشواری اندازه‌گیری دقیق در مزرعه، بطور معمول با استفاده از داده‌های هواشناسی برآورد شده و تا کنون بیش از ۵۰ روش تخمین تبخیر تعرق گیاه مرجع ( $ET_{ref}$ ) در قالب روش‌های ترکیبی، آنرویدینامیک و تجربی (دمایی، تشعشعی، تشت تبخیر) ارائه شده است، که اغلب با توجه به داده‌های هواشناسی نتایج متفاوتی دارند (گریسمر و همکاران، ۲۰۰۲). در گروه ترکیبی از دو جزء آنرویدینامیکی و توازن انرژی استفاده می‌شود. در گروه تجربی (دمایی) پارامتر اصلی درجه حرارت هوا می‌باشد و معمولاً برای ایستگاه‌هایی که فاقد آمار کامل هواشناسی هستند بکار می‌رود. روش هارگریوز-سامانی و بلینی-کریدل و بلینی-کریدل-فانو در این دسته قرار می‌گیرند (دورنباس و پروت، ۱۹۷۷). در گروه تشعشعی مانند مدل‌های ماکینگ، تورک، جنسن-هیز و دورنباس-پروت از انرژی تابشی خورشید به عنوان عامل اصلی در تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. داده‌های تشت تبخیر را نیز می‌توان با استفاده از ضرایب مناسب به تبخیر و تعرق گیاه مرجع تبدیل نمود (دورنباس و پروت، ۱۹۷۷).

از میان ۳۹۳ ایستگاه هواشناسی همدید کشور، تعداد ۲۵ ایستگاه هواشناسی در ارتفاع بالاتر از ۲۰۰۰ متر از سطح دریا مستقر هستند. برای ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ۲۲ درصد از ایستگاه‌های هواشناسی ایران دو روش بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی مناسب تشخیص داده شده است (زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۸۹). بررسی‌های دقیق‌تر نشان داده که توصیه دو روش مذکور برای مناطق شهرکرد، همدان و ارومیه با نتایج دین‌پژوه (۲۰۰۶) همخوانی دارد و صحت نتایج را تأیید می‌کند. واقع شدن این مناطق در ارتفاعات بالا و صاف بودن هوا با توجه به فقدان ذرات آبروسل ناشی از آلودگی کمتر هوا، موجب تأثیرپذیری تبخیر و تعرق از عامل تشعشع می‌گردد که در مدل هارگریوز-سامانی در نظر گرفته شده است. اهمیت پارامتر تابش برای فرآیند تبخیر و تعرق در مطالعات سبزی‌پرور و همکاران (۱۳۸۷) و ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) آمده است.

سبزی‌پرور و همکاران (۱۳۸۷) در تحقیق خود چهار مدل تبخیر و تعرق گیاه مرجع، یعنی جنسن-هیز اصلاح شده، جنسن-هیز، پن-من-مانتیث-فانو ۵۶، و پن-من-مانتیث-فانو با تابش ایرماک را برای تخمین تبخیر و تعرق روزانه چمن ( $ET_0$ ) در اقلیم سرد و نیمه‌خشک مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که مدل جنسن-هیز در مقایسه با سایر مدل‌ها، مقدار  $ET_0$  را با دقتی بهتر از مدل پن-من-مانتیث-فانو ۵۶ در اقلیم سرد نیمه‌خشک همدان برآورد می‌نماید. مطالعات فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۵) در سه منطقه باجگاه، جهرم و کوشک نشان داد که در شرایط کشت واحدی در ایران به علت وجود جریان افقی گرما، محاسبه تبخیر و تعرق به روش پن-من-مانتیث کارآیی لازم را ندارد و تخمین کمتری را از واقعیت ارائه می‌کند و در عوض، به نظر می‌رسد که روش جنسن-هیز (در بعضی شرایط) کارآیی بهتری داشته باشد.

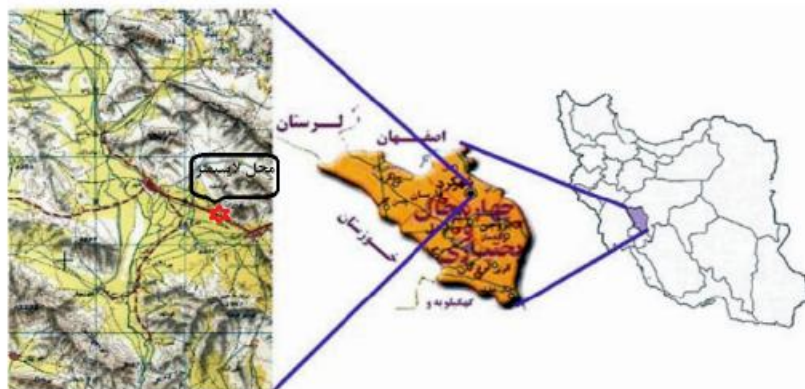
دخالت دارد و لذا به نظر می‌رسد کاربرد این قبیل معادلات در مناطق با ارتفاع بالا نیاز به بررسی دقیق‌تر دارد.

هدف از این تحقیق عبارت است از: برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از ۱۱ مدل در بازه‌های زمانی روزانه و ماهانه و گزینش مناسب‌ترین مدل بر اساس شاخص‌های آماری در دشت شهرکرد.

### مواد و روش‌ها

این مطالعه با استفاده از داده‌های یک لایسیمتر زهکش‌دار کشت شده با یونجه و اطلاعات و آمار هواشناسی در یک دوره زمانی شش ماهه حاصل از یک سامانه خودکار تحقیقات هواشناسی کشاورزی فرخ‌شهر در استان چهارمحال و بختیاری با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی و طول ۵۰ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۰۶۶ متر از سطح دریا انجام شد. لایسیمتر مورد استفاده به عمق ۱/۸ متر و قطر سه متر در وسط قطعه زمینی به ابعاد ۲۵ × ۴۰ متر (۱۰۰۰ متر مربع) واقع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی چهارتخته با وسعت ۱۵ هکتار و احاطه شده از محصولات مختلف زراعی، به عنوان بخشی از دشت شهرکرد قرار داشت شکل (۱).

سپاسخواه و رزاقی (۲۰۰۹) روش هارگریوز-سامانی (۱۹۸۲) را به دلیل وجود اطلاعات مربوط به دمای هوا در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی، مناسب دانسته و درصد خطای آن را اندک گزارش کرده‌اند. گلستانی و طباطبائی (۱۳۸۵) مقدار ET<sub>0</sub> را با استفاده از نرم‌افزار Ref-ET و بر اساس سه روش متداول بلینی-کریدل-فانو، پن-من-مانتیت-فانو و هارگریوز-سامانی تعیین نموده و نتیجه گرفتند که با توجه به اقلیم منطقه و استفاده رو به گسترش مدل‌هایی از قبیل پن-من-مانتیت به روش انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE-PM) لازم است ضرایب این روش در مناطق مختلف استان چهارمحال و بختیاری و اسنچی شود تا نتایج قابل قبولی از آن استخراج گردد. نورمهند و طباطبائی (۱۳۸۵) سه مدل بلینی-کریدل-فانو، پن-من-مانتیت-فانو و هارگریوز-سامانی را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که احتمالاً به دلیل کاربرد نابجای معادله ASCE در منطقه مورد بررسی (استان چهارمحال و بختیاری) این معادله میزان تبخیر و تعرق را بیش از مقدار مرجع تخمین زده است زیرا روش ASCE بر بنیان معادله پن-من-مانتیت-فانو استوار بوده و اساس این روش برای مناطق مرطوب توسعه داده شده، و لذا کاربرد آن در این منطقه بدون توجه به تناسب آن، سبب خطا شده است. همچنین در این معادله پارامتر شیب منحنی فشار بخار اشباع که تابعی از ارتفاع منطقه است



شکل ۱ موقعیت جغرافیائی منطقه مورد بررسی و محل نصب لایسیمتر

بود. اندازه‌گیری رطوبت خاک در لایه‌های ۱۰ سانتیمتری تا عمق ۱۸۰ سانتیمتر بوسیله نوترون متر (مدل CPN503-DR) و جبران کاهش رطوبت نسبت به ظرفیت زراعی

زمان آبیاری بر اساس خروج ۵۰ درصد آب سهل‌الوصول بوده و مقدار آن بر پایه اندازه‌گیری روزانه میزان رطوبت خاک تا عمق ۱۸۰ سانتیمتری

انجام شد. اطراف لایسیمتر پوشیده از گیاه یونجه بود که به طور هفتگی به صورت نواری آبیاری شد. برای هر لایه ۱۰ سانتیمتری از خاک با استفاده از معادله (۱) مقدار آب لازم محاسبه و سپس آب مورد نیاز (تمام لایه‌ها) از طریق کنتور حجمی به لایسیمتر افزوده شد. در این معادله  $d_n$  مقدار آب مورد نیاز گیاه (سانتی‌متر)، FC ظرفیت زراعی مزرعه (درصد)،  $\theta_i$  رطوبت لایه خاک قبل از آبیاری (درصد)،  $D_r$  عمق خاک (سانتی‌متر)،  $\rho_b$  وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و  $n$  تعداد لایه‌های خاک می‌باشد.

داده‌های هواشناسی مورد نیاز در یک دوره ۱۸۵ روزه (اول اردیبهشت تا پایان مهر ۱۳۹۰) شامل رطوبت نسبی حداقل و حداکثر ( $RH_{min}$  و  $RH_{max}$ )، دمای حداقل و حداکثر هوا ( $T_{min}$  و  $T_{max}$ )، سرعت باد ( $U_2$ )، مقدار بارش، مقدار تبخیر، ساعات آفتابی، فشار هوا، نقطه شبنم و تابش خورشیدی ( $R_s$ ) از ایستگاه هواشناسی کشاورزی فرخشهر به صورت سه ساعتی تهیه و به روزانه تبدیل شد. داده‌های ماهانه از میانگین داده‌های روزانه برای هر ماه تهیه شد. با توجه به اینکه دقت محاسبه  $ET_{ref}$  تحت تأثیر کیفیت داده‌های هواشناسی می‌باشد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ ایتنیسو و همکاران، ۲۰۰۳). لذا کیفیت داده‌های هواشناسی (شامل  $RH_{min}$ ،  $RH_{max}$ ،  $T_{min}$ ،  $T_{max}$  و  $R_s$ ) برای محاسبه  $ET_{ref}$  بر اساس توصیه منابع (آلن، ۱۹۹۶؛ آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ جنسن و همکاران، ۱۹۹۰؛ تمسگن و همکاران، ۱۹۹۹) مورد ارزیابی قرار گرفت. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از ۱۱ روش و با استفاده از نرم‌افزار REF-ET محاسبه گردید (آلن، ۲۰۰۶). روش‌ها عبارتند از:

سپس مقدار تبخیر و تعرق از لایسیمتر با استفاده از معادله (۲) تعیین شد. در این معادله ET تبخیر و تعرق واقعی گیاه، I مقدار آب آبیاری، P میزان بارش، D مقدار آب زهکش،  $PW_1$  رطوبت خاک زمان گذشته و  $PW_2$  رطوبت خاک زمان اندازه‌گیری بوده که با نوترون‌متر بدست آمده‌اند (همه پارامترها بر حسب میلی‌متر هستند).

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

این معادله (۲) مانتیث به روش انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE-PM):

$$ET = I + P - D \pm \sum_{i=1}^n (PW_1 - PW_2) \quad (2)$$

(۳) یمن-مانتیث به روش انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE-PM):

$$ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + K_w \rho_a \times C_p \times \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left( \frac{T_s}{r_a} \right)} / \lambda$$

(۴) یمن-مانتیث استاندارد شده به روش انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE-stPM):

$$ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} \times U_2 (e_s - e_a)}{[\Delta + \gamma(1 + C_d U_2)]}$$

(۵) یمن اصلاح شده به روش فانو ۲۴ (F24P):

$$ET_o = C \times [0.408 \times W \times R \times R_n + (1 - W) \times 0.27 \times f_u \times (e_s - e_a)]$$

(۶) یمن-مانتیث اصلاح شده به روش فانو ۵۶ (F56PM):

$$ET_o = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T_m + 273} \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times U_2)}$$

(۷) جنسن - هیز اصلاح شده (JH) :

$$ET_o = 0.408 \times C_T (T_m - T_x) K_T \times R_a \times TD^{0.5}$$

(۸) تابش به روش فانو ۲۴ (F24Rad) :

$$ET_o = a + bWR_s$$

(۹) تبخیر از تشتک به روش فانو ۲۴ (F24Pan) :

$$ET_o = K_p \times E_{pan}$$

(۱۰) بلینی-کریدل اصلاح شده به روش فانو ۲۴ (F24BC) :

$$ET_o = A + B[p(0.4 \times T_m + 8.13)]$$

(۱۱) هارگریوز-سامانی (HS) :

$$ET_o = 0.0023 \times 0.408 \times (T_m + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times R_a$$

(۱۲) پریستلی - تیلور (PT) :

$$ET_o = \alpha_1 \left[ \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \right] \times \left[ \frac{R_n - G}{\lambda} \right]$$

(۱۳) تورک (Turc) :

$$ET_o = \alpha_T \times 0.013 \times \left[ \frac{T_m}{T_m + 15} \right] \times (R_s + 50)$$

به منظور ارزیابی و بررسی روش‌های مورد استفاده در برآورد  $ET_o$ ، از معیارهای متداول آماری شامل ضریب تبیین ( $R^2$ , Coefficient of Determination)، میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error, MAE)، میانگین خطای اریب (Mean Bias Error, MBE) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (Normalized Root Mean Square Error, NRMSE) و شاخص توافق (d) استفاده شد. همچنین معادله رگرسیون خطی بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده به صورت  $Y = a.X$  برقرار گردید که  $Y$  عبارت است از مقدار  $ET_o$  برآورد شده توسط مدل‌های مختلف،  $X$  مقادیر اندازه‌گیری شده  $ET_o$  توسط لایسیمتر و  $a$  نیز ضریب رگرسیون می‌باشد. برای انتخاب مناسب‌ترین معادله، روش‌های برآورد  $ET_o$  بر اساس ارزیابی کلی از مقادیر مربوط به شیب خط ( $a$ )، ضریب تبیین ( $R^2$ )، شاخص‌های MAE، NRMSE و MBE و  $d$  استفاده شد.

### نتایج و بحث

برآورد  $ET_o$  در بازه زمانی روزانه

در معادله‌های بالا  $ET_o$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلیمتر بر روز)،  $R_n$  تابش خالص ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ )،  $G$  شار گرمای خاک ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ )،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دما ( $kPa \ ^\circ C^{-1}$ )،  $\gamma$  ضریب سایکرومتری ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ )،  $C_n$  و  $C_a$  از جداول مربوطه،  $e_p$  فشار بخار اشباع ( $kPa$ )،  $e_a$  فشار بخار واقعی ( $kPa$ )،  $U_2$  سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری از سطح زمین ( $ms^{-1}$ )،  $T_m$  میانگین دمای روزانه هوا در ارتفاع دو متری ( $^\circ C$ )، پارامترهای  $C_T$ ،  $T_x$ ،  $T_m$ ،  $K_T$  استخراج از جداول جنسن و همکاران (۱۹۹۰)،  $a$  و  $b$  ضرایب اصلاحی،  $W$  ضریب وابسته به دما،  $f_u$  تابع سرعت باد،  $C$  ضریب تصحیح،  $T_{max}$  حداکثر دمای روزانه ( $^\circ C$ )،  $T_{min}$  حداقل دمای روزانه ( $^\circ C$ )،  $R_a$  تابش فرازمینی ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ )،  $TD$  تفاوت دمای حداکثر و حداقل روزانه ( $^\circ C$ )،  $\alpha_1$  ضریب تجربی بدون بعد،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ )،  $p$  درصد متوسط ساعات روشنایی روزانه در طول ماه،  $K_p$  ضریب تشت تبخیر و  $E_{pan}$  نیز مقدار تبخیر از تشت تبخیر (میلیمتر بر روز) می‌باشند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ والتر و همکاران، ۲۰۰۵؛ دورنباس و پروت، ۱۹۷۷ و جنسن و همکاران، ۱۹۹۰).



MAE و MBE به ترتیب برابر ۰/۸۲۴ و ۰/۱۴۱ میلی‌متر بر روز و در رتبه سوم مدل Turc با مقادیر NRMSE و d برابر با ۰/۱۸۸ و ۰/۸۵۸ و مقادیر MAE و MBE به ترتیب برابر ۰/۸۵۸ و منفی ۰/۱۲۵ میلی‌متر بر روز قرار گرفته‌اند. نتایج مشابهی توسط سپاسخواه و رزاقی (۲۰۰۹) صورت گرفته است، آنها با اصلاح مدل HS در پژوهش خود دقت برآورد ET<sub>0</sub> را در منطقه مورد مطالعه افزایش دادند. هارگریوز و آلن (۲۰۰۳) با مقایسه نتایج ET<sub>0</sub> هارگریوز سامانی نسبت به داده‌های حاصل از لایسمتر وزنی در آیداهو نتیجه گرفتند که مقادیر برآورد شده توسط مدل HS پس از اصلاح به ۰/۹۷ مقادیر اندازه‌گیری شده با نتایج لایسمتری رسیده است. اگر چه رزاقی و سپاسخواه (۲۰۱۰) در برآورد ET روش HS را بسیار مناسب‌تر از روش پن‌من - مانیتیت گزارش کردند ولی از روش تابش (F24Rad) نتیجه بهتری گرفته‌اند.

مقایسه و رتبه‌بندی مدل‌های مورد استفاده برای برآورد ET<sub>0</sub> در قیاس با نتایج حاصل از داده‌های لایسمتری برای بازه زمانی روزانه بر اساس نتایج تحلیل‌های آماری و خط رگرسیون (معادله خطی) در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. جدول (۱) نشان می‌دهد مدل‌های ASCE-PM و ASCE-stPM در انتهای جدول رتبه‌بندی برای بازه زمانی روزانه قرار گرفته‌اند. شیب خط تبخیر و تعرق مرجع (لایسمتر ET<sub>r</sub>) نسبت به ET<sub>0</sub> مدل‌های HS، JH و Turc به ترتیب برابر با ۱/۰۱۳، ۱/۰۱۲ و ۰/۹۵۹ می‌باشد. بالاترین ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) مربوط به مدل HS برابر ۰/۹۸۵ می‌باشد. برای مدل HS مقادیر NRMSE و d برابر با ۰/۱۲۶ و ۰/۹۳۰ و مقادیر MAE و MBE به ترتیب برابر ۰/۴۷۷ و ۰/۲۰۶ میلی‌متر بر روز می‌باشد که بر اساس آماره‌ها بهترین مدل است. در رتبه دوم مناسب‌ترین مدل‌ها، مدل JH، با مقادیر NRMSE و d برابر با ۰/۱۸۴ و ۰/۸۸۳

جدول ۱ رتبه‌بندی مدل‌های مورد استفاده برای برآورد ET<sub>0</sub> برای بازه زمانی روزانه

شاخص	a	R <sup>2</sup>	n	NRMSE	MAE	MBE	d	مدل
	---	---	---	---	mm/day	mm/day	---	
HS	۱/۰۱۳	۰/۹۸۵	۱۸۵	-۱/۱۲۶	-۱/۴۷۷	-۱/۲۰۶	۰/۹۳۰	
JH	۱/۰۱۲	۰/۹۶۹	۱۸۵	-۱/۱۸۴	-۱/۸۲۴	-۱/۱۴۱	۰/۸۸۳	
Turc	۰/۹۵۹	۰/۹۶۸	۱۸۵	-۱/۱۸۸	-۱/۸۵۸	-۱/۱۲۵	۰/۸۵۸	
F56PM	۱/۰۰۱	۰/۹۴۷	۱۸۵	-۱/۲۳۸	۱/۲۰۶	۰/۱۸۵	۰/۷۷۲	
PT	-۱/۸۰۸	۰/۹۷۸	۱۸۵	-۱/۲۸۴	۱/۳۲۹	-۱/۰۹۱	۰/۷۷۲	
F24BC	۱/۱۲۵	۰/۹۶۳	۱۸۵	-۱/۲۲۹	۱/۲۸۹	۰/۹۳۵	۰/۷۸۶	
F24Pan	۱/۰۵۱	۰/۹۴۹	۱۸۵	-۱/۲۳۹	۱/۲۴۴	۰/۴۸۴	۰/۷۶۷	
F24P	۱/۱۵۲	۰/۹۵۹	۱۸۵	-۱/۲۴۸	۱/۴۷۵	۱/۱۸۲	۰/۷۲۱	
F24Rad	۱/۲۶۳	۰/۹۶۴	۱۸۵	-۱/۲۸۶	۲/۰۲۱	۱/۸۷۶	۰/۶۵۴	
ASCE-PM	۰/۹۶۰	۰/۹۱۱	۱۸۵	-۱/۳۱۲	۱/۵۸۸	-۱/۰۲۲	۰/۶۲۴	
ASCE-stPM	۱/۱۶۲	۰/۹۲۰	۱۸۵	-۱/۳۲۹	۲/۰۳۰	۱/۲۶۵	۰/۶۲۰	

تحقیق حاضر تفاوت معنی‌داری در شیب رابطه خطی بین مقادیر برآورد شده ET<sub>0</sub> حاصل از مدل F24P، F56PM و ASCE-stPM (که پارامتر  $\tau_c$  در این مدل‌ها ثابت فرض شده) نسبت به مقادیر ET<sub>0</sub> برآورد شده از مدل ASCE-PM (که در آن پارامتر  $\tau_c$  تابعی از ارتفاع گیاه است) در

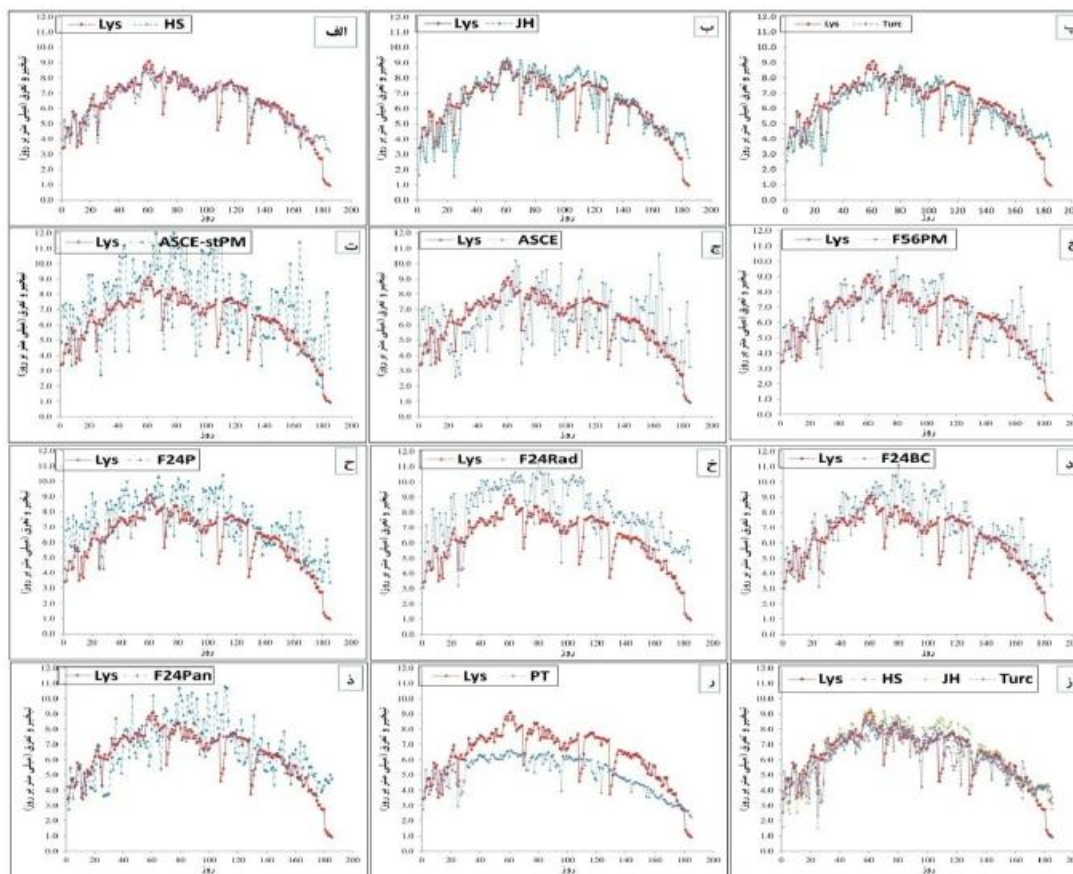
نتایج لسینا و همکاران (۲۰۰۳) نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری از برآورد ET<sub>0</sub> روزانه با فرض ثابت بودن پارامتر مقاومت ظاهری گیاه ( $\tau_c$ ) در مدل پن‌من - مانیتیت در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده ET<sub>0</sub> روزانه با لایسمتر وزنی در اسپانیا مشاهده نشده است، اما در

برآورد  $ET_0$  در بازه زمانی ماهانه

مقایسه برآوردهای  $ET_0$  ماهانه مدل‌های HS، F56PM و Turc با داده‌های لایسیمتری در بازه زمانی مذکور و بر مبنای شاخص‌های آماری  $R^2$ ، NRMSE، MAE، MBE و d نشان می‌دهد که سه مدل مذکور به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم به منظور برآورد  $ET_0$  در بازه زمانی ماهانه قرار دارند (جدول ۲). مقدار MBE برای مدل HS در طول رشد برابر با ۰/۲۰۸ میلی‌متر بر روز می‌باشد که به طور کلی برآورد  $ET_0$  با استفاده از مدل HS اندکی بیش‌برآورد نسبت به داده‌های  $ET_0$  لایسیمتر را نشان می‌دهد. بنابر نظر ویلموت و ماتسورا (۲۰۰۵) در دوره زمانی بلند مدت (کل دوره) شاخص MBE مناسب‌تر می‌باشد. گرچه مدل HS در بازه زمانی ماهانه نیز مناسب‌ترین مدل می‌باشد اما مدل ASCE-PM با MBE برابر با ۰/۰۳۱ میلی‌متر بر روز نزدیک‌ترین مقدار  $ET_0$  کل را نسبت به داده‌های لایسیمتری نشان می‌دهد و بنابراین از حداقل میزان اریب (برای کل  $ET_0$  در دوره رشد) برخوردار می‌باشد. مدل F56PM در جدول رتبه‌بندی مدل‌ها در دوره زمانی ماهانه در رتبه دوم قرار گرفت که بیانگر آن است که این مدل در برآورد  $ET_0$  در دوره زمانی ماهانه از شایستگی و کارایی خوبی برخوردار است. البته با این فرض که در این مدل بایستی ارتفاع پوشش گیاهی مدنظر قرار گرفته و در محاسبات اعمال گردد (شرایط واقعی گیاه یونجه)، در غیر این صورت با فرض ثابت بودن پارامترهای  $T_c$  و  $T_a$  به مانند مدل ASCF-stPM در انتهای جدول رتبه‌بندی قرار خواهد گرفت.

قیاس با مقادیر  $ET_0$  اندازه‌گیری شده از لایسیمتر مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد با توجه به نوع پوشش گیاهی (چمن) در پژوهش‌های رزاقی و سپاسخواه (۲۰۱۰) و لسینا و همکاران (۲۰۰۳)، پارامتر  $T_c$  ثابت فرض شده و مغایرت در نتایج حاصل از مدل‌های مورد استفاده خود را ناشی از حرکت افقی گرما (advection) می‌دانند. در تحقیق موجود که پوشش گیاهی یونجه بوده و بالطبع ارتفاع گیاه در طول زمان، متغیر و لذا  $T_c$  و  $T_a$  هم نسبت به زمان متفاوت بوده‌اند.

مدل ASCE-PM از شیب نزدیک‌تر به واحد نسبت به مدل‌های مشابه و مشتق شده از مدل اولیه پن‌من (یعنی F56PM و F24P) و حتی مدل ASCE-stPM که  $T_c$  را ثابت فرض می‌کند، برخوردار بوده است، ضمن آن‌که حرکت افقی گرما می‌تواند بر همه مدل‌ها مؤثر بوده باشد. در مجموع مدل HS مناسب‌ترین و مدل پن‌من-مانیت استاندارد شده به روش انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE-stPM) نامناسب‌ترین مدل می‌باشد. تغییرات  $ET_0$  مدل‌ها نسبت به زمان در شکل (۲) نشان داده شده است. در شکل (۲-الف) تغییرات  $ET_0$  از مدل HS به تغییرات  $ET_0$  از لایسیمتر در طول دوره رشد یونجه نشان داده شده و ملاحظه می‌گردد که تغییرات  $ET_0$  مدل HS از مشابهت بیشتری با تغییرات  $ET_0$  لایسیمتر برخوردار می‌باشد. در شکل‌های (۲-ب) تا (۲-ر) تغییرات  $ET_0$  سایر مدل‌ها نسبت به تغییرات  $ET_0$  لایسیمتر را به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲ تغییرات روزانه تبخیر و تعرق برآورد شده در مدل‌های مختلف نسبت به داده‌های لایسیمتر

جدول ۲ رتبه‌بندی مدل‌های مورد استفاده برای برآورد  $ET_e$  برای یازده ماهه

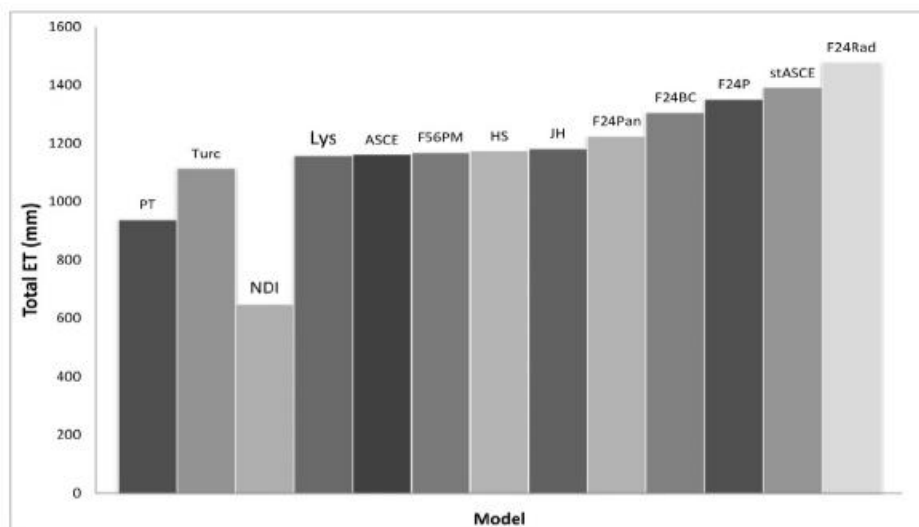
شاخص	a	$R^2$	n	NRMSE	MAE	MBE	d
مدل	---	---	---	---	mm/day	mm/day	---
HS	۱/۰۲۶	-۰/۹۹۸	۶	-۰/۰۵۴	-۰/۲۷۷	-۰/۲۰۸	-۰/۹۸۴
F56PM	۱/۰۱۷	-۰/۹۹۵	۶	-۰/۰۷۲	-۰/۳۵۲	-۰/۱۸۹	-۰/۹۶۷
Turc	-۰/۹۷۴	-۰/۹۹۳	۶	-۰/۰۹۱	-۰/۴۲۲	-۰/۱۲۰	-۰/۹۵۸
JH	۱/۰۲۴	-۰/۹۹۲	۶	-۰/۰۹۵	-۰/۵۰۹	-۰/۱۴۲	-۰/۹۵۹
ASCE-PM	-۰/۹۷۸	-۰/۹۸۲	۶	-۰/۱۳۸	-۰/۶۷۱	-۰/۰۳۱	-۰/۸۳۸
F24Pan	۱/۰۶۸	-۰/۹۸۵	۶	-۰/۱۴۱	-۰/۸۰۹	-۰/۴۹۰	-۰/۸۸۸
F24BC	۱/۱۴۲	-۰/۹۹۴	۶	-۰/۱۴۹	-۰/۹۳۸	-۰/۹۳۸	-۰/۸۷۸
F24P	۱/۱۷۱	-۰/۹۹۵	۶	-۰/۱۶۵	۱/۱۸۵	-۰/۱۸۵	-۰/۸۲۷
PT	-۰/۸۲۱	-۰/۹۹۸	۶	-۰/۲۲۶	۱/۰۸۷	-۱/۰۸۷	-۰/۸۲۷
ASCE-stPM	۱/۱۸۵	-۰/۹۹۳	۶	-۰/۱۷۹	۱/۲۶۹	۱/۲۶۹	-۰/۷۹۵
F24Rad	۱/۲۸۴	-۰/۹۹۵	۶	۱/۲۳۶	۱/۸۷۹	۱/۸۷۹	-۰/۶۹۳



## برآورد تبخیر و تعرق در کل دوره رشد

شکل (۳) برآورد کلی تبخیر و تعرق به کمک مدل‌های مختلف و مقادیر اندازه‌گیری شده در لایسیمتر را در طول دوره رشد گیاه یونجه در دشت شهرکرد نشان می‌دهد. به جز مدل‌های تورک و پریستلی-تیلور بقیه مدل‌ها  $ET_0$  را بیش‌برآورد نموده‌اند و نزدیک‌ترین برآورد مربوط به مدل ASCE-PM می‌باشد که برابر با ۱۱۶۱/۷ در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده ۱۱۵۷/۶ میلی‌متر می‌باشد. اگر چه مدل ASCE-PM به جز در بازه زمانی ماهانه از نظر همستگی و یا سایر شاخص‌های آماری مورد نظر از عملکرد مطلوبی برخوردار نبود، اما در کل نزدیک‌ترین مقدار  $ET_0$  به داده‌های لایسیمتر را نشان می‌دهد. در پژوهش حقیقتی (۱۳۸۵) نیاز آبی یونجه در دشت شهرکرد بطور متوسط ۹۶۹/۹ میلی‌متر گزارش شده، در آزمایشی دیگر ابراهیمی‌پاک (۱۳۷۸) آب مورد نیاز یونجه در شهرکرد را ۱۳۷۹ میلی‌متر بر اساس انواع

متفاوت دور آبیاری یونجه بدست آورده است. در گزارش بهینه‌سازی سند ملی الگوی مصرف آب کشاورزی ایران (علیزاده، ۱۳۸۲) نیاز خالص آبیاری گیاه یونجه در دشت شهرکرد (National Document of Irrigation, NDI) به میزان ۶۴۹ میلی‌متر (در دوره زمانی مشابه) برآورد شده است که بسیار کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. در این گزارش از مدل فائو-پنمن-مانتیث و آمار سی ساله ایستگاه‌های هواشناسی نیاز خالص آبیاری گیاه یونجه برآورد شده است. در مرحله واسنجی مدل مذکور (فائو-پنمن-مانتیث) در ایستگاه لایسیمتری جهاد دانشگاهی کرمان مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع در شرایط استاندارد کمتر از مقداری که با لایسیمتر وزنی اندازه‌گیری شده بدست آمده است که دلیل این امر را احتمالاً اثرات خشکی و واحه‌ای بودن منطقه و وجود باد اعلام می‌دارد (علیزاده، ۱۳۸۲).



شکل ۳ مقدار کل تبخیر و تعرق مدل‌های مختلف در دوره رشد گیاه یونجه در دشت شهرکرد

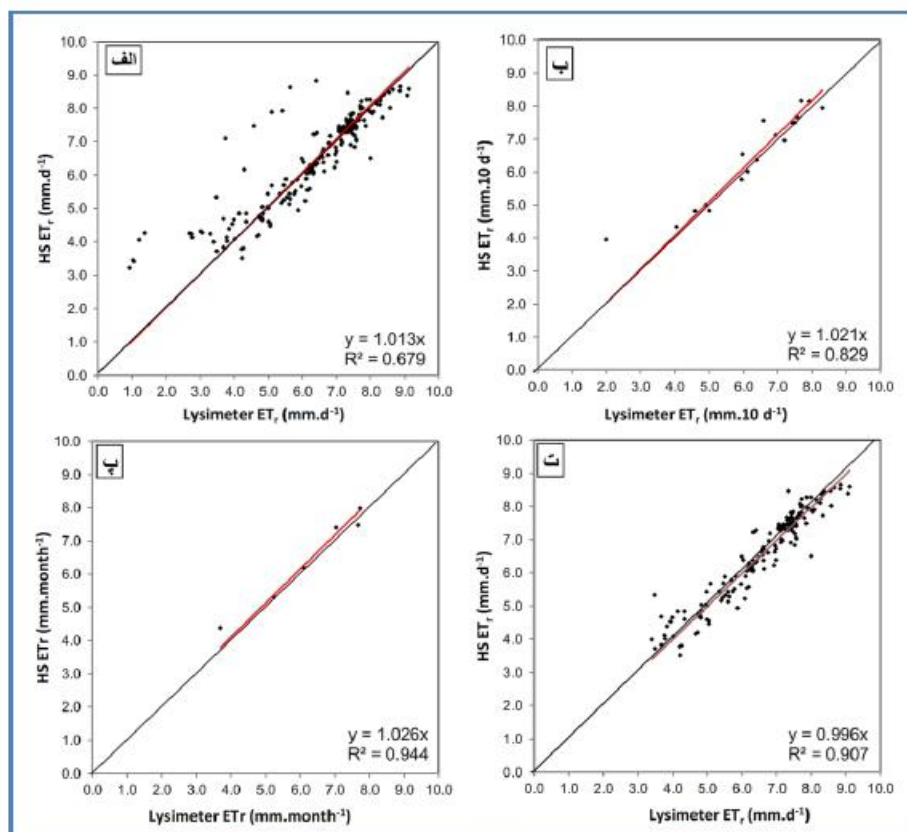
## ارزیابی مدل هارگریوز-سامانی

ماهانه) در شکل (۴ الف، ب و پ) نمایش داده شده است. شیب خط رگرسیون نزدیک به واحد بود و مقدار  $R^2$  نسبتاً بالا و کیفیت این شاخص‌ها در دوره‌های زمانه ۱۰ روزه و ماهانه افزایش نشان داد. در صورتی‌که نقاط پرت (مربوط به زمان‌های پس از چین برداری گیاه یونجه) از معادله رگرسیون حذف شوند شکل (۴-ت) معادله رگرسیون بسیار بهبود یافته و از ضریب  $R^2$  بهتری

با توجه به این که مدل HS در دوره‌های مختلف زمانی این تحقیق نتایج مناسبی ارائه نمود جزئیات بیشتری از این مدل بررسی گردید. رابطه بین مقادیر  $ET_0$  برآورد شده توسط مدل HS و مقادیر اندازه‌گیری شده  $ET_0$  حاصل از داده‌های لایسیمتری (روزانه، ده روزه و

اما از سوی دیگر این احتمال نیز داده می‌شود که در مدل‌های ارزیابی شده پارامتر تابع باد در مرحله اول و در مرحله دوم مقدار تابش خالص ( $R_s$ ) از اهمیت زیادتری برخوردار بوده و احتمالاً با اصلاح آنها می‌توان نتایج بهتری از مدل‌های مشتق شده از مدل اولیه پنمن و پنمن-مانیتث انتظار داشت.

برخوردار خواهد شد. در این مدل فقط به پارامترهای  $T_{min}$  و  $T_{max}$  از آمار هواشناسی نیاز بوده که در تمامی ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشد. بنابراین با اصلاح ضرایب، مدل HS می‌تواند با خطای قابل قبولی مورد استفاده قرار گیرد. به نظر می‌رسد در منطقه مورد بررسی (دشت شهرکرد) اثر حرکت افقی انرژی گرمایی (advection) مانند برخی مناطق دیگر ایران مطرح بوده



شکل ۴ روابط رگرسیون خطی بین تبخیر و تعرق برآورد شده با مدل هارگربوز-سامانی نسبت به تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر در بازه‌های زمانی الف روزانه، ب ده‌روزه، پ ماهانه و ت حذف نقاط پرت

### نتیجه‌گیری

ماهانه در جدول رتبه‌بندی وضعیت بهتری پیدا می‌کند، یعنی برآوردهای  $ET_0$  با این روش در دوره زمانی ماهانه مناسب‌تر از دوره روزانه می‌باشد. مدل HS بیشترین همبستگی را در دوره روزانه با مقادیر اندازه‌گیری شده  $ET_0$  از لایسیمتر نشان داد. مدل پن-من-مانیتث (ASCE-PM) از نظر برآورد مقدار کل  $ET_0$  نزدیک‌ترین مقدار نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده از لایسیمتر را نشان داد و در مراحل بعدی مدل‌های HS، پن-من-مانیتث (F56PM) و جنسن-هیز اصلاح شده (JH) قرار گرفتند که تا

در بازه زمانی روزانه مقدار برآورد شده  $ET_0$  به روش‌های Turc HS و جنسن-هیز اصلاح شده مناسب‌ترین مدل‌ها ارزیابی می‌شوند. در بازه زمانی ماهانه میانگین‌های برآورد شده از  $ET_0$  نشان می‌دهد که مدل‌های HS، پن-من-مانیتث (ASCE-PM)، Turc و جنسن-هیز اصلاح شده در رتبه‌های اول تا چهارم مناسب‌ترین مدل‌ها قرار می‌گیرند. مدل پن-من-مانیتث (ASCE-PM) با افزایش بازه زمانی یعنی از روزانه به

حدودی بیش برآورد نشان می‌دهند. در این بررسی استاندارد شده (ASCE-stPM) ارزیابی شدند. نامناسب‌ترین مدل‌ها تابش (F24Rad) و پن‌من - مانیت

### فهرست منابع

۱. ابراهیمی‌پاک، ن. ۱۳۷۸. گزارش نهائی طرح تحقیقاتی تعیین آب مورد نیاز و دور آبیاری یونجه در ایستگاه تحقیقات چهارتخته شهرکرد. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. وزارت جهاد کشاورزی. ایران. ۷۲ ص.
۲. حقیقتی، ب. ۱۳۸۵. تأثیر تنش آبی بر عملکرد محصول یونجه. گزارش نهائی طرح تحقیقاتی. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. وزارت جهاد کشاورزی. ایران. ۱۰ ص.
۳. زارع ایبانه، ح. م. بیات ورکشی، ع. ا. سبزی‌پور، ص. معروفی و ع. قاسمی. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر تفرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، ص ۹۵-۱۱۰.
۴. سبزی‌پور، ع. ا. تفضلی، ح. زارع ایبانه، ح. ر. باقرنژاد، م. موسوی‌بایگی، م. غفوری، ا. محسنی موحد و ز. مریانجی. ۱۳۸۷. مقایسه چند مدل برآورد تبخیر - تفرق 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.
۵. علیزاده، ا. ۱۳۸۲. بهینه‌سازی سند ملی الگوی مصرف آب کشاورزی ایران. نیاز خالص آبیاری محصولات زراعی و باغی ایران. جلد ۷: استان چهارمحال و بختیاری. سازمان هواشناسی کشور - وزارت جهاد کشاورزی. ایران.
۶. گلستانی، س. و س. ح. طباطبائی. ۱۳۸۵. تعیین حداکثر و حداقل حجم تبخیر و تفرق پتانسیل در استان چهارمحال و بختیاری بر اساس دوره‌های ترسالی و خشکسالی. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود. دانشگاه شهرکرد. شهرکرد. ۲۰۳۲ ص.
۷. مهدوی، م. ۱۳۸۸. هیدرولوژی کاربردی. جلد اول. انتشارات دانشگاه تهران. ۳۴۲ ص.
۸. نورمهند، ن. و س. ح. طباطبائی. ۱۳۸۵. تعیین حجم تبخیر و تفرق در استان اصفهان در زمان‌های خشکسالی و ترسالی. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود. دانشگاه شهرکرد. شهرکرد. ۲۰۳۲ ص.
9. Allen, R. G. 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 122: 97-106.
10. Allen, R. G. 2006. Available at <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et>.
11. Allen, R. G., L.-S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*.
12. Dinpashoh, Y. 2006. Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran. *Agricultural Water Management*. 84: 123-129.
13. Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24 (revised), Rome.
14. Fooladmand, H. R. and A. R. Sepaskhah. 2005. Evaluation and calibration of three evapotranspiration equations in a semi-arid region. *Iran-Water Resources Research*. 1(2): 123-128.
15. Grismer, M., M. Orang and S. Matyac. 2002. Pan evaporation to evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 128(3): 180-184.

16. Hargreaves, G. H. and R. G. Allen. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129: 53-63.
17. Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1982. Estimating potential Evapotranspiration. Technical Note. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 108: 225-230.
18. Irmak, S., A. Irmak, R. G. Allen and J. W. Jones. 2003. Solar and net radiation based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129: 336-347.
19. Itenfisu, D., R. L. Elliot, R. G. Allen and I. A. Walter. 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129: 440-448.
20. Jensen, M. E., R. D. Burman and R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, ASCE, New York.
21. Lecina, S., A. Martí nezCob, P. J. Pérez, F. J. Villalobos and J. J. Baselga. 2003. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*. 60: 181-198.
22. Razzaghi, F. and A. R. Sepaskhah. 2010. Assessment of nine different equations for  $ET_0$  estimation using lysimeter data in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 56: 1-12.
23. Sepaskhah, A. R. and F. Razzaghi. 2009. Evaluation of the adjusted Thornthwaite and Hargreaves- Samani methods for estimation of daily  $ET_0$  in a semi-arid region of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 55: 51-66.
24. Temesgen, B., R. G. Allen and D. T. Jensen. 1999. Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 125: 26-33.
25. Walter, I. A., R. G. Allen, R. Elliott, M. E. Jensen, D. Itenfisu and T. A. Mecham Howell. 2005. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. Proc., 4<sup>th</sup> National Irrig. Symp. ASAE, Phoenix, AZ. USA.
26. Willmott, C. J. and K. Matsuura. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*. 30: 79-82.