

ارزیابی اثر مقاومت‌های آیرودینامیک و تاج گیاه بر برآورد تبخیر - تعرق مرجع به وسیله معادله پنمن مانتیس

عمران نعمت پور^۱، سید مجید میرلطیفی^{۲*}، کورش محمدی^۳

چکیده

اثر روش‌های مختلف محاسبه مقاومت تاج گیاه (r_c) و مقاومت آیرودینامیک (r_a) بر برآورد تبخیر-تعرق مرجع توسط معادله پنمن مانتیس با استفاده از ۷۰ روز داده ساعتی بررسی گردید. r_c با روش‌های پنمن مانتیس، پنمن مانتیس فائو، ASCE، Todorovic(1999) و به عنوان تابعی از تشعشعات خالص محاسبه شد. برای محاسبه r_a از روش‌های پنمن مانتیس و پنمن مانتیس فائو استفاده گردید. همچنین به منظور تصحیح r_a برای لحاظ نمودن اثر وضعیت پایداری اتمسفر از مدل‌های (Thom(1975)، Verma et al.(1976)، Hatfield et al.(1983)، Mahrt and Ek(1984)، Choudhury et al.(1986) و Choudhury and Monteith(1988) استفاده شد. محاسبات به دو روش مجموع تبخیر-تعرق ساعتی و تبخیر-تعرق روزانه انجام گرفت. با تلفیق روش‌های مختلف محاسبه r_c و r_a ، مجموع تبخیر-تعرق ساعتی از ۴۰ روش و تبخیر-تعرق روزانه از ۳ روش محاسبه گردید و با مقادیر لایسمتری مقایسه شد. در مدل‌های مجموع تبخیر-تعرق ساعتی، استفاده از روش ASCE برای محاسبه r_c ، بالاترین مقادیر r_a را تولید کرد. اما مدل Todorovic(1999) سبب گردید شیب خط رگرسیون در مقایسه با مدل ASCE بین ۱۰ تا ۱۷ درصد و عرض از مبدا خط رگرسیون بین ۳۱ تا ۶۳ درصد بهبود یابد. تصحیح r_a به دو روش Mahrt and Ek(1984) و Choudhury et al.(1986) دقت محاسبات تبخیر-تعرق را تا حد مطلوبی بهبود داد. از میان مدل‌های روزانه مدل Todorovic(1999) با r_a^2 ، شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۹۲ و ۰/۲۱ دقیق‌ترین نتایج را ارائه کرد. این روش سبب گردید r_a^2 ۵ درصد و شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون به ترتیب بین ۸ تا ۱۸ درصد و ۷۵ تا ۸۲ درصد در مقایسه با روش‌های پنمن مانتیس و ASCE بهبود یابد. دقت مدل‌های مجموع تبخیر-تعرق ساعتی بیشتر از مدل‌های تبخیر-تعرق روزانه برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: تبخیر - تعرق مرجع، مقاومت تاج گیاه، مقاومت آیرودینامیک، وضعیت پایداری اتمسفر

مقدمه

تبخیر-تعرق یکی از اجزای مهم چرخه هیدرولوژی است. با توجه به کاهش شدید ذخیره آبهای شیرین دنیا، برآورد دقیق تبخیر-تعرق و نیاز آبی گیاه ضروری به نظر می‌رسد. آمار مربوط به سال ۱۳۸۴ نشان می‌دهد در ایران حدود ۹۳٪ کل آب استحصالی، در بخش کشاورزی و باغداری مصرف می‌شود (Mohamadian et al., 2005).

یکی از پارامترهای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع به روش پنمن مانتیس، مقاومت تاج گیاه (r_c) است (Lecina et al., 2003). اندازه‌گیری و محاسبه دقیق r_c دشوار است. در سال ۱۹۹۸ سازمان خواربار و کشاورزی جهانی^۴ (FAO) در نشریه فنی شماره ۵۶

پیشنهاد کرد مقدار r_c ثابت و برابر ۷۰ ثانیه بر متر در نظر گرفته شود (Allen et al., 1998). اما مطالعات انجمن مهندسی عمران آمریکا^۵ (ASCE) نشان داد فرض ثابت در نظر گرفتن r_c در محاسبات ساعتی باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌شود. به همین دلیل این انجمن پیشنهاد کرد در محاسبات از معادله ساعتی پنمن مانتیس استفاده شود و مقدار r_c برای سطح مرجع چمن در طول روز ۵۰ ثانیه بر متر و در طول شب ۲۰۰ ثانیه بر متر فرض گردد. همچنین ASCE پیشنهاد کرد در صورت استفاده از معادله روزانه پنمن مانتیس، r_c ثابت و برابر با ۷۰ ثانیه بر متر در نظر گرفته شود (Allen et al., 2006). در کنار این فرضیات تحقیقات گسترده‌ای جهت شبیه‌سازی r_c با استفاده از مدل‌های ریاضی انجام گرفته و نتایجی نیز حاصل شده است. یکی از آنها مدل Todorovic(1999) است. این مدل مقدار r_c را به کمک داده‌های هواشناسی شبیه‌سازی می‌کند و با استفاده از معادله پنمن مانتیس مقدار تبخیر-تعرق مرجع

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد و دانشیاران گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه تربیت مدرس
* - نویسنده مسئول: (Email: mirlat_m@modares.ac.ir)

تبخیر-تعرق مرجع در طول شبانه‌روز به دو روش مجموع تبخیر-تعرق ساعتی و تبخیر-تعرق روزانه محاسبه شد. برای محاسبه مجموع تبخیر-تعرق ساعتی مقادیر ساعتی تبخیر-تعرق مربوط به یک شبانه‌روز محاسبه و با هم جمع گردیدند.

معادله پنمن مانتیس

رابطه (۱) فرم کامل معادله پنمن مانتیس را نشان می‌دهد (Allen et al., 1998).

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (1)$$

در این معادله λET : تبخیر-تعرق (w/m^2)، Rn : تشعشع خالص (w/m^2)، G : شار گرمایی خاک (w/m^2)، e_s : فشار بخار اشباع هوا (Pa)، e_a : فشار بخار واقعی هوا (Pa)، ρ_a : چگالی هوا (kg/m^3)، c_p : گرمای ویژه هوا (به طور میانگین برابر با 1.013×10^6) ($J/kg/^\circ C$)، Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دما ($Pa/^\circ C$)، γ : ثابت سایکرومتری ($Pa/^\circ C$)، r_c : مقاومت تاج گیاه (s/m) و r_a : مقاومت آبرودینامیک (s/m) است.

برای محاسبه پارامترهای مختلف معادله (۱) از روابط استفاده گردید (Allen et al., 1998).

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (2)$$

در این معادله T : دمای هوا ($^\circ C$) است.

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} * P \quad (3)$$

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (4)$$

در این معادله P : فشار هوا (kPa) و z : ارتفاع از سطح دریا (m) است.

$$\rho_a = \frac{P}{(T + 273)R} \quad (5)$$

در این رابطه R : عدد ثابت گازها و برابر با 2.87 ($kJ/kg/^\circ K$) است.

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] \quad (6)$$

$$e_s = \frac{e^o(T \max) + e^o(T \min)}{2} \quad (7)$$

$$e_a = e^o(T_{dew}) \quad (8)$$

را محاسبه می‌نماید. مطالعات (Todorovic 1999) دقت مناسب این مدل را هم برای دوره روزانه و هم برای دوره ساعتی نشان داد.

یکی دیگر از عوامل اثرگذار بر تبخیر-تعرق مرجع، وضعیت پایداری اتمسفر است. وضعیت پایداری اتمسفر با تاثیر بر r_a بر مقدار تبخیر-تعرق مرجع اثر می‌گذارد. جهت تصحیح r_a برای اعمال اثر وضعیت پایداری اتمسفر مدل‌های مختلفی ارائه شده است. روش‌های مختلف محاسبه r_a با لحاظ نمودن تاثیر پایداری اتمسفر شامل روش‌های (Thom 1975)، (Verma et al. 1976)، (Hatfield et al. 1983)، (Mahrt and Ek 1984)، (Choudhury et al. 1986)، (XieXianqun 1988) و (Choudhury and Monteith 1988) مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر محاسباتی یا مقادیر اندازه‌گیری شده از دو روش همبستگی گردابی^۱ و روش تشتت تبخیر مقایسه شد. مطالعه مذکور روی زمین بدون پوشش گیاهی و زمین پوشیده از گیاه ذرت انجام گرفت. مشخص گردید که نتایج حاصل شده از روش Choudhury et al. (1986) دارای دقت بیشتری در مقایسه با دیگر روش‌ها بود (Liu et al., 2006).

در تحقیق حاضر، رفتار معادله پنمن مانتیس به ازای مقدار ثابت و مقادیر متغیر r_c در طول شبانه‌روز و همچنین به ازای روش‌های مختلف محاسبه و تصحیح r_a بررسی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق از داده‌های ایستگاه هواشناسی و لایسیمتری شهر کیمبرلی واقع در ایالت آیداهو در آمریکا (۴۲ درجه و ۱ دقیقه عرض شمالی و ۱۲۴ درجه و ۱۴ دقیقه طول غربی) استفاده شد. ارتفاع منطقه مورد مطالعه از سطح دریا ۱۱۹۵ متر است. شهر کیمبرلی از نظر آب و هوایی جزء مناطق گرم و خشک محسوب می‌شود. لایسمتر پوشیده از گیاه چمن با ارتفاع متوسط ۰/۱۲ متر و متعلق به وزارت کشاورزی آمریکا^۲ (USDA) بود (Mirlatifi S.M., 1991). داده‌ها مربوط به روزهای ۲۰ جولای تا ۹ اکتبر سال ۱۹۸۷ میلادی بود. در بین داده‌ها ۱۲ روز داده گمشده وجود داشت. بنابراین در این تحقیق از ۷۰ روز داده ساعتی استفاده شد. داده‌ها شامل تشعشع خالص Rn (w/m^2)، دمای هوا T_a ($^\circ C$)، دمای نقطه شبنم T_{dew} ($^\circ C$)، سرعت باد u (m/s)، شار گرمایی خاک G (w/m^2)، دمای تاج گیاه T_s ($^\circ C$)، ارتفاع گیاه چمن h (m) و تبخیر-تعرق از لایسیمتر ET_o (mm/hr) بود.

محاسبات

1 - Eddy correlation system

2 - United States Department of Agriculture

$$a \left(\frac{r_c}{r_i} \right)^2 + b \left(\frac{r_c}{r_i} \right) + c = 0 \quad (13)$$

$$a = \frac{\Delta + \gamma \left(\frac{r_i}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma} \left(\frac{r_i}{r_a} \right) (e_s - e_a) \quad (14)$$

$$b = -\gamma \left(\frac{r_i}{r_a} \right) \frac{\gamma (e_s - e_a)}{\Delta \Delta + \gamma} \quad (15)$$

$$c = -(\Delta + \gamma) \frac{\gamma (e_s - e_a)}{\Delta \Delta + \gamma} \quad (16)$$

معادله (۱۳) تنها یک ریشه مثبت دارد. این مدل مقدار r_c را در طول دوره روز شبیه‌سازی می‌نماید. اما قادر به شبیه‌سازی آن در طول دوره شب نیست. بنابراین مقدار r_c در طول دوره شب ثابت و برابر 200 (s/m) در نظر گرفته می‌شود (Lecina et al., 2003).

روش‌های مختلف محاسبه و تصحیح مقاومت آیرودینامیک

برای محاسبه r_a از دو روش پنمن مانتیس (Allen et al., 1998) و پنمن مانتیس فائو (Allen et al., 1998) استفاده شد. در این روش‌ها وضعیت پایداری اتمسفر خنثی فرض می‌شود. برای تصحیح r_a با در نظر گرفتن اثر وضعیت پایداری اتمسفر از روش‌های Thom (1975)، Verma et al. (1976)، Hatfield et al. (1983)، Mahrt and Ek (1984) و Choudhury et al. (1986) استفاده شد. در ادامه شرح مختصری از هر روش آورده می‌شود.

روش پنمن مانتیس: در این روش برای محاسبه r_a از روابط ذیل استفاده می‌شود.

$$r_a = \frac{\ln \left(\frac{z_m - d}{z_{om}} \right) * \ln \left(\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right)}{k^2 u_z} \quad (17)$$

$$d = 2/3 * h \quad (18)$$

$$z_{om} = 0.123 * h \quad (19)$$

$$z_{oh} = 0.1 * z_{om} \quad (20)$$

در این روابط z_m : ارتفاعی است که در آن سرعت باد اندازه‌گیری می‌شود (m)، z_h : ارتفاعی است که در آن رطوبت اندازه‌گیری می‌شود (m)، d : ارتفاع جابجایی سطح صفر (m)، z_{om} : طول زبری انتقال مومنت (m)، z_{oh} : طول زبری انتقال بخار آب و گرمای محسوس (m)، k : ضریب ون کارمن (بی‌بعد و ثابت، برابر با 0.41) و u_z : سرعت باد در ارتفاع z (m/s) است (Allen et al., 1998).

روش پنمن مانتیس فائو: اگر در محاسبه r_a به روش پنمن مانتیس ارتفاع گیاه چمن ثابت و برابر 0.12 متر فرض شود، روش

در این معادله‌ها $e^o(T)$: فشار بخار اشباع در دمای T درجه سانتیگراد (kPa)، $e^o(T \text{ max})$: فشار بخار اشباع هوا به ازای بیشترین دمای هوا در طول دوره شبانه‌روز (kPa)، $e^o(T \text{ min})$: فشار بخار اشباع هوا به ازای کمترین دمای هوا در طول دوره شبانه‌روز (kPa) و $e^o(T \text{ dew})$: فشار بخار واقعی هوا (kPa) است.

مقدار Rn قابل اندازه‌گیری است. اما اندازه‌گیری شار گرمایی خاک مشکل است. بنابراین برای دوره‌های ساعتی مقدار G در طول روز $0.1 * Rn$ و در طول شب $0.5 * Rn$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار G در یک دوره شبانه‌روز صفر در نظر گرفته می‌شود (Allen et al., 1998).

روش‌های مختلف محاسبه مقاومت تاج گیاه

برای محاسبه r_c از چهار روش پنمن مانتیس (Allen et al., 1998)، پنمن مانتیس فائو (Allen et al., 1998)، پنمن مانتیس فائو (Allen et al., 1998) و Todorovic (1999) استفاده شد.

روش پنمن مانتیس: در این روش برای محاسبه مقدار r_c از روابط ذیل استفاده می‌شود (Allen et al., 1998).

$$r_c = \frac{r_l}{LAI_{Active}} \quad (9)$$

$$LAI_{Active} = 0.5 * LAI \quad (10)$$

$$LAI = 24 * h \quad (11)$$

در این روابط r_l : مقاومت روزنه در برگ که به خوبی در معرض تابش آفتاب است (S/m)، LAI_{Active} : شاخص سطح برگ‌هایی که فعال هستند و به خوبی در معرض تابش آفتاب قرار دارند، LAI : شاخص سطح برگ و h : ارتفاع گیاه (m) است.

روش پنمن مانتیس فائو: در این روش برای سطح مرجع چمن ثابت و برابر 70 ثانیه بر متر فرض می‌گردد (Allen et al., 1998).

روش ASCE: در این روش برای سطح مرجع چمن و محاسبات با استفاده از میانگین داده‌های روزانه، مقدار r_c در کل دوره شبانه‌روز ثابت و برابر 70 ثانیه بر متر در نظر گرفته می‌شود. اما برای محاسبات به روش مجموع ساعتی، برای سطح مرجع چمن، مقدار r_c در طول دوره روز برابر 50 ثانیه بر متر و در طول دوره شب برابر 200 ثانیه بر متر فرض می‌گردد (Allen et al., 2006).

روش Todorovic (1999): شرح کامل این مدل در مقاله Todorovic (1999) آورده شده است. در اینجا تنها روابط مورد نیاز برای شبیه‌سازی r_c آورده می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۲) مقاومت اقلیم (r_i) محاسبه می‌گردد.

$$r_i = \frac{\rho c_p (e_s - e_a)}{\gamma (Rn - G)} \quad (12)$$

سپس برای محاسبه r_c از روابط (۱۳) تا (۱۶) استفاده می‌شود.

معکوس معادله (۲۹) مقدار L بدست می‌آید. در حالت پایدار محاسبه L ابتدا مقدار Φ_m برآورد می‌گردد. سپس با استفاده از روابط ذیل مقدار L محاسبه می‌شود.

$$Ri = \frac{z-d}{L} \Phi_m^{-1} \Rightarrow Ri = \frac{z-d}{L} (1-5.2Ri) \Rightarrow L = (z-d) \frac{(1-5.2Ri)}{Ri} \quad (30)$$

روش Verma et al. (1976): بر اساس این روش، فرض می‌شود در حالت خنثی مقاومت در برابر انتقال بخار آب و گرمای محسوس یکسان است. در این وضعیت مقاومت آبرودینامیک از رابطه ذیل قابل محاسبه خواهد بود.

$$r_{an} = \frac{\left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{om}} \right) \right]^2}{k^2 u_z} \quad (31)$$

در این رابطه r_{an} مقاومت آبرودینامیک هوا در حالت خنثی است و برای تصحیح آن از روابط زیر استفاده می‌گردد.

$$r_a = \frac{K_M}{K_H} r_{an} \quad (32)$$

در حالت ناپایدار:

$$\frac{K_M}{K_H} = \frac{1}{(1-16Ri)^{0.25}} \quad (33)$$

در حالت پایدار:

$$\frac{K_M}{K_H} = 1 \quad (34)$$

در این روابط r_a مقاومت آبرودینامیک تصحیح شده، K_H ضریب انتقال گرما و K_M ضریب انتقال بخار آب است (Liu et al., 2006).

روش Hatfield et al. (1983): در این روش ابتدا مقدار مقاومت آبرودینامیک هوا در حالت خنثی (r_{an}) برآورد می‌گردد. سپس به کمک رابطه ذیل مقدار آن برای حالت‌های دیگر پایداری تصحیح می‌شود.

$$r_a = r_{an} \left[1 - n(z-d) \cdot g \cdot (T_s - T_a) / (T_a \cdot u_z^2) \right] \quad (35)$$

در این رابطه T_s : دمای تاج گیاه (°K) و T_a : دمای هوا (°K) است. n : ضریب تجربی و برابر 5 است. g : شتاب جاذبه زمین (9.8 (m/s²)). است (Hatfield et al., 1983).

روش Mahrt and Ek (1984): در این روش از رابطه زیر استفاده می‌گردد (Liu et al., 2006).

$$r_a = \frac{1}{c_{am} \cdot u_z} \quad (36)$$

در این رابطه c_{am} ضریب انتقال مومنتم است و با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود. در حالت ناپایدار:

پنمن مانتیس فائو حاصل خواهد شد. در این صورت r_a تنها تابعی از سرعت باد خواهد بود و از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود (Allen et al., 1998).

$$r_a = u_2 / 208 \quad (21)$$

روش Thom (1975): در این روش مقاومت در برابر انتقال گرمای محسوس و بخار آب تحت عنوان r_a بیان می‌شود.

$$r_a = \frac{1}{k^2 u_z} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{om}} \right) - \Psi_m \left(\frac{z-d}{L} \right) \right] \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{oh}} \right) - \Psi_h \left(\frac{z-d}{L} \right) \right] \quad (22)$$

در حالت ناپایدار:

$$\Psi_m = 2 \ln \left[\frac{(1+x)}{2} \right] + \ln \left[\frac{(1+x^2)}{2} \right] - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} \quad (23)$$

$$\Psi_h = 2 \ln \left[\frac{(1+x^2)}{2} \right] \quad (24)$$

در حالت پایدار:

$$\Psi_m = \Psi_h = -5\xi \quad (25)$$

$$\xi = \frac{z-d}{L} \quad (26)$$

$$x = (1-16\xi^2)^{1/4} \quad (27)$$

در این روابط L : طول پایداری مانین اباخف و Ψ_m و Ψ_h : به ترتیب فرم انتگرالی توابع تصحیح پایداری انتقال مومنتم و انتقال گرمای محسوس است (Liu et al., 2006). برای محاسبه پارامتر L از روابط (۲۸) و (۲۹) استفاده می‌شود. این روابط برای محاسبه عدد ریچاردسون (Ri) کاربرد دارند (Thom, 1975).

$$Ri = \frac{g \left(\frac{T_1 - T_2}{z_1 - z_2} \right)}{\left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) \left(\frac{u_1 - u_2}{z_1 - z_2} \right)^2} \quad (28)$$

$$Ri = \frac{(z-d) \Phi_h}{L \Phi_m^2} \quad (29)$$

در این روابط Φ_m و Φ_h : به ترتیب توابع تصحیح پایداری انتقال مومنتم و انتقال گرمای محسوس، T : دمای هوا (°K)، z : ارتفاع از سطح زمین (m)، u : سرعت باد (m/s) و g : شتاب ثقل (m/s²) است. اندیس 1 و 2 بیانگر دو ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد و دما می‌باشند. که اندیس 1 برای سطح زمین و اندیس 2 برای سطح اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در ارتفاع ۲ متری در نظر گرفته شد. در حالت ناپایدار $\Phi_h = \Phi_m^2$ است (Webb, 1970). بنابراین مقدار L در حالت ناپایدار از رابطه ساده‌تر $Ri = \frac{(z-d)}{L}$ قابل استخراج خواهد بود. ابتدا مقدار Ri از رابطه (۲۸) برآورد می‌گردد؛ سپس با حل

ساده زیر را ارائه کردند (Liu et al., 2006).

$$r_a = \frac{r_{an}}{(1 + \eta)^p} \quad (47)$$

$$\eta = 5(z - d)g \frac{(T_s - T_a)}{T_a u_z^2} \quad (48)$$

در این رابطه مقدار p در حالت پایدار 2 و در حالت ناپایدار $\frac{3}{4}$ است (Liu et al., 2006).

کاوش

با توجه به تاثیر Rn بر r_c سعی شد رابطه‌ای ساده بین این دو پارامتر استخراج گردد. داده‌ها به دو بخش تقسیم شدند؛ داده‌های روزهای ۲۰۱ تا ۲۴۴ در دسته داده‌های آموزش و داده‌های روزهای ۲۴۵ تا ۲۸۲ در دسته داده‌های آزمون قرار گرفت. سپس در گروه داده‌های آموزش مقادیر ساعتی r_c به وسیله حل معکوس فرم کامل معادله پنمن مانیتس محاسبه شد. پس از حذف داده‌های پرت، خط رگرسیون نمایی بر آن برآزش داده شد و معادله آن استخراج گردید (شکل ۱). سپس تبخیر-تعرق داده‌های آزمون محاسبه شد. در این مرحله برای محاسبه r_c از رابطه استخراج شده در مرحله آموزش و برای محاسبه r_a از کلیه روش‌هایی که پیش از این معرفی شد استفاده گردید. از علامت اختصاری $f(Rn)$ برای نشان دادن روش مذکور در محاسبه r_c استفاده شد.

تحلیل آماری

برای مقایسه مقادیر محاسباتی با مقادیر لایسیمیتری از رگرسیون خطی ساده ($y = b_0 + b_1 x$) استفاده گردید؛ که در آن مقادیر لایسیمیتری به عنوان متغیر مستقل (x) و مقادیر محاسباتی به عنوان متغیر وابسته (y) در نظر گرفته شد. از پارامتر آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز برای مقایسه استفاده گردید. پارامتر آماری RMSE از رابطه (۴۹) قابل محاسبه است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (49)$$

در این رابطه x_i i امین مقدار لایسیمیتری y_i i امین مقدار محاسباتی، و n : تعداد زوج داده‌ها است (Lecina et al., 2003).

نتایج

مجموع تبخیر - تعرق ساعتی

با ترکیب هشت روش محاسبه و تصحیح r_a و پنج روش محاسبه r_c مجموع تبخیر-تعرق ساعتی از ۴۰ روش مختلف محاسبه گردید.

$$c_{am} = \left[\frac{k}{\ln\left(\frac{z - z_{om}}{z_{om}}\right)} \right]^2 \left(1 - \frac{15 Ri}{1 + c(-Ri)^{1/2}} \right) \quad (37)$$

$$c = \frac{75k^2 \left(\frac{z + z_{om}}{z_{om}} \right)^{1/2}}{\left[\ln\left(\frac{z + z_{om}}{z_{om}}\right) \right]^2} \quad (38)$$

در حالت پایدار

$$c_{am} = \left[\frac{k}{\ln\left(\frac{z - z_{om}}{z_{om}}\right)} \right]^2 \left(\frac{1}{(1 + 15 Ri)(1 + 5 Ri)^{1/2}} \right) \quad (39)$$

روش Choudhury et al. (1986): برای تصحیح r_a روابطی توسط Choudhury et al. (1986) ارائه شد. آنها برای تصحیح r_a روش‌های عددی و تحلیلی ارائه کردند که در اینجا تنها روش تحلیلی معرفی می‌گردد. در حالت پایدار:

$$r_a = \frac{\left[\ln\left(\frac{z - d}{z_{oh}}\right) - \Psi \right] \left[\ln\left(\frac{z - d}{z_{om}}\right) - \Psi \right]}{k^2 u_z} \quad (40)$$

در حالت‌های خنثی و ناپایدار:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z - d}{z_{oh}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z - d}{z_{om}}\right)}{k^2 u_z (1 + \eta)^{3/4}} \quad (41)$$

$$\Psi = \frac{[b - (b^2 - 4ac)^{1/2}]}{2a} \quad (42)$$

$$a = 1 + \eta \quad (43)$$

$$b = \ln\left(\frac{z - d}{z_{oh}}\right) + 2\eta \ln\left(\frac{z - d}{z_{om}}\right) \quad (44)$$

$$c = \eta \left[\ln\left(\frac{z - d}{z_{om}}\right) \right]^2 \quad (45)$$

$$\eta = 5(z - d)g \frac{(T_s - T_a)}{T_a u_z^2} \quad (46)$$

در روابط فوق زمانی که $\Psi < -5$ بدست آید $\Psi = -5$ فرض می‌شود.

روش Choudhury and Monteith (1988): برای محاسبه r_a در حالت‌های غیرخنثی، Choudhury and Monteith (1988) رابطه

بحث

مجموع تبخیر-تعرق ساعتی

با توجه به اینکه در این تحقیق مقادیر واقعی r_c و r_a در دسترس نبود، نمی‌توان بر دقت روش‌های مختلف محاسبه این دو پارامتر هیچگونه ادعایی کرد. بلکه تنها می‌توان با توجه به تاثیر این روش‌ها بر برآورد تبخیر-تعرق مرجع، که مقادیر واقعی آن در دسترس است اظهار نظر نمود. برای مقایسه روش‌های مختلف محاسبه r_c ، مقادیر برآوردی تبخیر-تعرق توسط مدل‌هایی که در آنها از روش‌های مختلفی برای محاسبه این پارامتر استفاده شده بود، اما روش محاسبه r_a در همه آنها یکسان بود، با هم مقایسه شدند. به عنوان مثال زمانی که r_a به روش FAO محاسبه شد، با محاسبه r_c به روش $f(Rn)$ ضریب تعیین، شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون به ترتیب برابر با ۰/۸۹، ۰/۴۲ و ۰/۸۹ حاصل گردید؛ که در مقایسه با دیگر روش‌های محاسبه r_c از دقت مناسبی برخوردار بود (شکل ۲).

بررسی پارامترهای آماری $RMSE$ ، a^2 ، شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون نشان داد در میان روش‌های مختلف محاسبه r_c دو روش ASCE و Todorovic (1999) منجر به برآورد دقیق‌تری از مجموع تبخیر-تعرق ساعتی شدند (جدول ۱).

جهت تعیین روش محاسبه r_a و r_c از علائم اختصاری استفاده شد و به صورت اندیس، جلوی ET_o قرار گرفت. اندیس اول مربوط به روش محاسبه r_c و اندیس دوم مربوط به روش محاسبه r_a می‌باشد. پیشوند sh نشان دهنده مجموع ساعتی بودن محاسبات است. برای محاسبه تبخیر-تعرق ساعتی از رابطه (۱) استفاده شد (جدول‌های ۱ و ۲).

تبخیر-تعرق روزانه

برای محاسبه تبخیر-تعرق روزانه از سه روش استفاده شد. در روش اول r_a به روش پنمن مانتیس (رابطه ۱۷) و r_c به روش پنمن مانتیس (رابطه ۹) محاسبه شد. در روش دوم r_a به روش پنمن مانتیس فائو (رابطه ۲۱) محاسبه شد و r_c ثابت و برابر ۷۰ ثانیه بر متر فرض گردید. در روش سوم برای محاسبه r_a از روش پنمن مانتیس (رابطه ۱۷) استفاده گردید و مقدار r_c از روابط (۱۳) تا (۱۶) شبیه‌سازی شد. از پیشوند $daily$ برای نشان دادن روزانه بودن محاسبات استفاده گردید و روش به کار رفته برای محاسبه r_c به صورت اندیس، جلوی ET_o آورده شد (جدول ۳).

جدول ۱- مقایسه مجموع تبخیر - تعرق ساعتی محاسباتی با داده‌های لایسیمتر*

Model	b_0	b_1	r^2	RMSE (mm/day)	Model	b_0	b_1	r^2	RMSE (mm/day)
<i>sh_EToFAO_FAO</i>	۱/۰۹	۰/۶۱	۰/۹۱	۱/۲۱	<i>sh_EToASCE_FAO</i>	۰/۹۸	۰/۶۵	۰/۹۳	۱/۰۷
<i>sh_EToFAO_PM</i>	۰/۹۸	۰/۶۳	۰/۹۱	۱/۱۹	<i>sh_EToASCE_PM</i>	۰/۸۸	۰/۶۸	۰/۹۴	۱/۰۴
<i>sh_EToFAO_Ver et al.</i>	۱/۲۷	۰/۶۸	۰/۸۶	۰/۸۰	<i>sh_EToASCE_Ver et al.</i>	۱/۱۰	۰/۷۳	۰/۹۱	۰/۶۳
<i>sh_EToFAO_Thom</i>	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۹۴	۱/۲۸	<i>sh_EToASCE_Thom</i>	۰/۶۲	۰/۷۰	۰/۹۶	۱/۱۲
<i>sh_EToFAO_Hat et al.</i>	۰/۸۳	۰/۶۹	۰/۹۲	۱/۰۲	<i>sh_EToASCE_Hat et al.</i>	۱/۲۴	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۹۴
<i>sh_EToFAO_ME</i>	۰/۵۴	۰/۶۸	۰/۹۵	۱/۳۳	<i>sh_EToASCE_ME</i>	۰/۵۰	۰/۷۲	۰/۹۶	۱/۰۹
<i>sh_EToFAO_Ch et al.</i>	۰/۷۵	۰/۶۲	۰/۹۵	۱/۴۴	<i>sh_EToASCE_Ch et al.</i>	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۹۶	۱/۲۹
<i>sh_EToFAO_ChM</i>	۱/۱۵	۰/۶۱	۰/۸۱	۱/۲۱	<i>sh_EToASCE_ChM</i>	۰/۸۴	۰/۵۰	۰/۸۷	۱/۰۱
<i>sh_EToPM_FAO</i>	۰/۸۸	۰/۶۵	۰/۹۲	۱/۱۷	<i>sh_EToTodo_FAO</i>	۰/۵۹	۰/۷۲	۰/۹۵	۱/۰۳
<i>sh_EToPM_PM</i>	۰/۷۷	۰/۶۸	۰/۹۰	۱/۱۴	<i>sh_EToTodo_PM</i>	۰/۴۴	۰/۷۶	۰/۹۵	۰/۹۹
<i>sh_EToPM_Ver et al.</i>	۰/۹۵	۰/۷۴	۰/۸۴	۰/۷۶	<i>sh_EToTodo_Ver et al.</i>	۰/۵۱	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۴۴
<i>sh_EToPM_Thom</i>	۰/۴۹	۰/۷۰	۰/۹۳	۱/۲۳	<i>sh_EToTodo_Thom</i>	۰/۲۶	۰/۷۷	۰/۹۶	۱/۰۵
<i>sh_EToPM_Hat et al.</i>	۰/۵۷	۰/۷۵	۰/۸۹	۰/۹۷	<i>sh_EToTodo_Hat et al.</i>	۰/۸۳ ^a	۱/۰۳ ^b	۰/۴۵	۱/۸۴
<i>sh_EToPM_ME</i>	۰/۳۰	۰/۷۳	۰/۹۳	۱/۲۸	<i>sh_EToTodo_ME</i>	۰/۱۸ ^a	۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۸۹
<i>sh_EToPM_Ch et al.</i>	۰/۵۷	۰/۶۶	۰/۹۴	۱/۴۰	<i>sh_EToTodo_Ch et al.</i>	۰/۳۴	۰/۷۳	۰/۹۶	۱/۲۱
<i>sh_EToPM_ChM</i>	۰/۹۱	۰/۶۶	۰/۸۴	۱/۱۹	<i>sh_EToTodo_ChM</i>	۰/۵۸ ^a	۰/۸۱	۰/۶۱	۱/۱۱

*: b_0 : عرض از مبدا خط رگرسیون، b_1 : شیب خط رگرسیون و a^2 : ضریب تعیین را نشان می‌دهد.

a: عدم اختلاف معنی‌دار b_0 با صفر در سطح احتمال ۹۵ درصد.

b: عدم اختلاف معنی‌دار b_1 با یک در سطح احتمال ۹۵ درصد.

(جدول ۲) - مقایسه مجموع تبخیر-تعرق ساعتی داده‌های آزمون با داده‌های لایسیمتر*

Model	b_0	b_1	r^2	RMSE (mm/day)
$sh_ETO_{f(Rn)}_{FAO}$	۰/۴۲ ^a	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۲۷
$sh_ETO_{f(Rn)}_{PM}$	۰/۴۸ ^a	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۳۰
$sh_ETO_{f(Rn)}_{Ver et al.}$	۰/۴۹ ^a	۱/۰۴ ^b	۰/۸۵	۰/۷۴
$sh_ETO_{f(Rn)}_{Thom}$	۰/۱۸ ^a	۰/۹۰ ^b	۰/۸۵	۰/۴۱
$sh_ETO_{f(Rn)}_{Hat et al.}$	-۲/۷۲ ^a	۲/۰۴ ^b	۰/۰۳	۹/۶۱
$sh_ETO_{f(Rn)}_{ME}$	۰/۰۶ ^a	۰/۹۶ ^b	۰/۷۲	۰/۴۹
$sh_ETO_{f(Rn)}_{Ch et al.}$	۰/۴۴ ^a	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۵۱
$sh_ETO_{f(Rn)}_{ChM}$	۰/۴۶ ^a	۰/۹۲ ^b	۰/۷۱	۰/۴۸

*: b_0 : عرض از مبدا خط رگرسیون، b_1 : شیب خط رگرسیون و r^2 : ضریب تعیین را نشان می‌دهد.

a: عدم اختلاف معنی‌دار b_0 با صفر در سطح احتمال ۹۵ درصد.

b: عدم اختلاف معنی‌دار b_1 با یک در سطح احتمال ۹۵ درصد.

(جدول ۳) - مقایسه تبخیر-تعرق محاسباتی روزانه با داده‌های لایسیمتر*

Model	b_0	b_1	r^2	RMSE (mm/day)
$daily_ETO_{PM}$	۰/۸۴	۰/۶۸	۰/۸۷	۱/۰۷
$daily_ETO_{FAO}$	۱/۱۷	۰/۶۱	۰/۸۷	۱/۱۵
$daily_ETO_{Todo}$	۰/۲۱ ^a	۰/۷۴	۰/۹۲	۱/۲۷

*: b_0 : عرض از مبدا خط رگرسیون، b_1 : شیب خط رگرسیون و r^2 : ضریب تعیین را نشان می‌دهد.

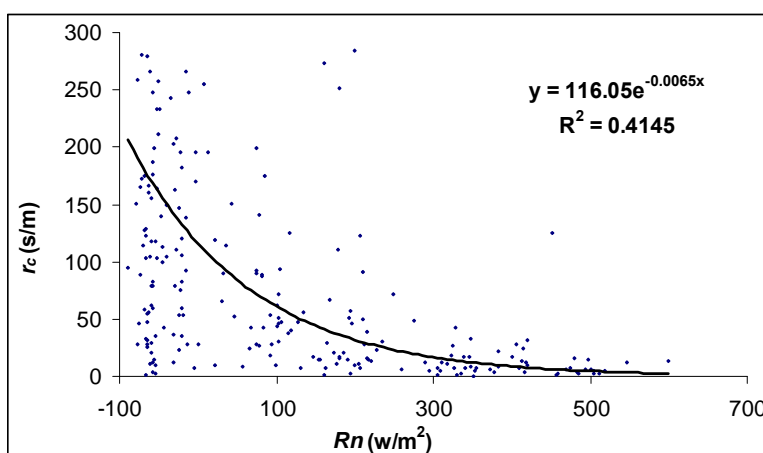
a: عدم اختلاف معنی‌دار b_0 با صفر در سطح احتمال ۹۵ درصد.

RMSE برابر با ۱/۳۳ میلی‌متر بر روز از دقت بالاتری برخوردار بود. زمانی که برای محاسبه r_c از روش پنمن مانیتس استفاده شد، مدل $sh_ETO_{PM_ME}$ با r^2 برابر ۹۳ درصد و شیب خط رگرسیون ۰/۷۳ از دقت مناسب‌تری برخوردار بود. هنگامی که برای محاسبه r_c از روش ASCE استفاده شد بیشترین مقدار r^2 مربوط به مدل‌های $sh_ETO_{ASCE_Thom}$ و $sh_ETO_{ASCE_Ch et al.}$ و به میزان ۹۶ درصد بود.

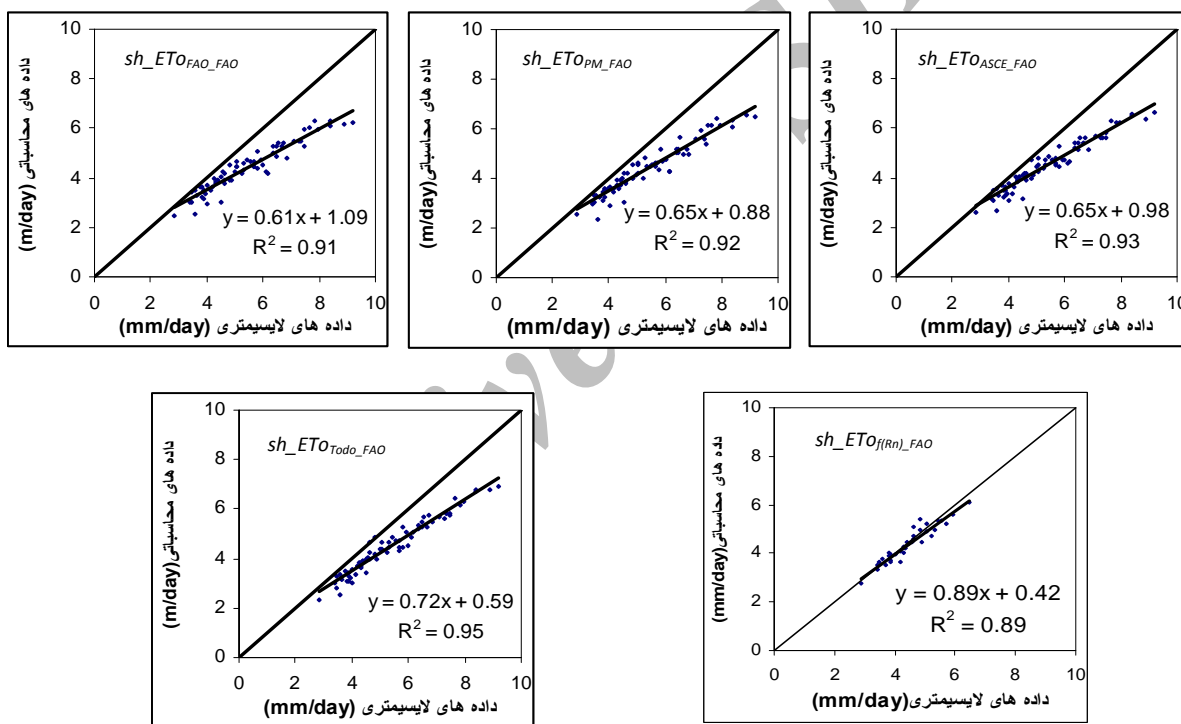
با مقایسه پارامترهای آماری RMSE، شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون مدل $sh_ETO_{ASCE_ME}$ به عنوان دقیق‌ترین مدل انتخاب شد. زمانی که برای محاسبه r_c از روش Todorovic(1999) استفاده شد بیشترین مقدار r^2 مربوط به مدل‌های $sh_ETO_{Todo_Thom}$ و $sh_ETO_{Todo_Ch et al.}$ و به میزان ۹۶ درصد بود. روش $sh_ETO_{Todo_Ch et al.}$ دارای ضریب تعیین، شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون به ترتیب برابر با ۰/۹۶، ۰/۷۳ و ۰/۳۴ می‌باشد و از دقت مناسبی برخوردار بود. مقایسه دو روش Verma et al.(1976) در محاسبه r_a باعث شده است ضریب تعیین ۴ درصد کاهش یابد. اما شیب خط رگرسیون ۱۶ درصد بهبود یافته است. بنابراین مدل $sh_ETO_{Todo_Ver et al.}$ با r^2 RMSE، شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون به ترتیب برابر با ۰/۹۲، ۰/۴۴، ۰/۸۹ و ۰/۵۱ به عنوان دقیق‌ترین مدل انتخاب شد.

مقایسه مقادیر محاسباتی تبخیر-تعرق مدل‌هایی که در آنها r_c به دو روش ASCE و Todorovic(1999) محاسبه شده بود با داده‌های لایسیمتری نشان داد، در برخی موارد روش ASCE نسبت به روش Todorovic(1999) ضرائب تعیین بالاتری تولید کرد. اما روش Todorovic(1999) در همه موارد منجر به افزایش دقت شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون شد. بنابراین عملکرد روش Todorovic(1999) برای برآورد مقاومت تاج گیاه در مقایسه با دیگر روش‌های مورد استفاده مطلوب‌تر می‌باشد. روش‌های ASCE، پنمن مانیتس و پنمن مانیتس فائو به ترتیب در درجات بعدی قرار گرفتند. مقایسه دو روش $f(Rn)$ و Todorovic(1999) در محاسبه r_c نشان داد روش $f(Rn)$ شیب خط رگرسیون را بین ۱۰ تا ۱۹ درصد نسبت به مدل Todorovic(1999) بهبود داد. اما مقدار r^2 در روش $f(Rn)$ بین ۵ تا ۱۷ درصد کمتر از روش Todorovic(1999) بود. به همین دلیل استفاده از روش $f(Rn)$ در محاسبه r_c توصیه نمی‌شود.

برای مقایسه روش‌های مختلف محاسبه r_a ، مدل‌هایی که در آنها از روش‌های مختلفی برای محاسبه این پارامتر استفاده شده بود، اما روش محاسبه r_c در همه آنها یکسان بود، مورد بررسی قرار گرفتند که نمونه‌ای از آنها در شکل ۳ آورده شده است. زمانی که r_c از روش FAO محاسبه شد بیشترین مقدار r^2 مربوط به مدل‌های $sh_ETO_{FAO_ME}$ و $sh_ETO_{FAO_Ch et al.}$ و به میزان ۹۵ درصد بود. از میان این دو مدل، مدل $sh_ETO_{FAO_ME}$ با



(شکل ۱) - خط رگرسیون و معادله برازش داده شده بین r_c و Rn

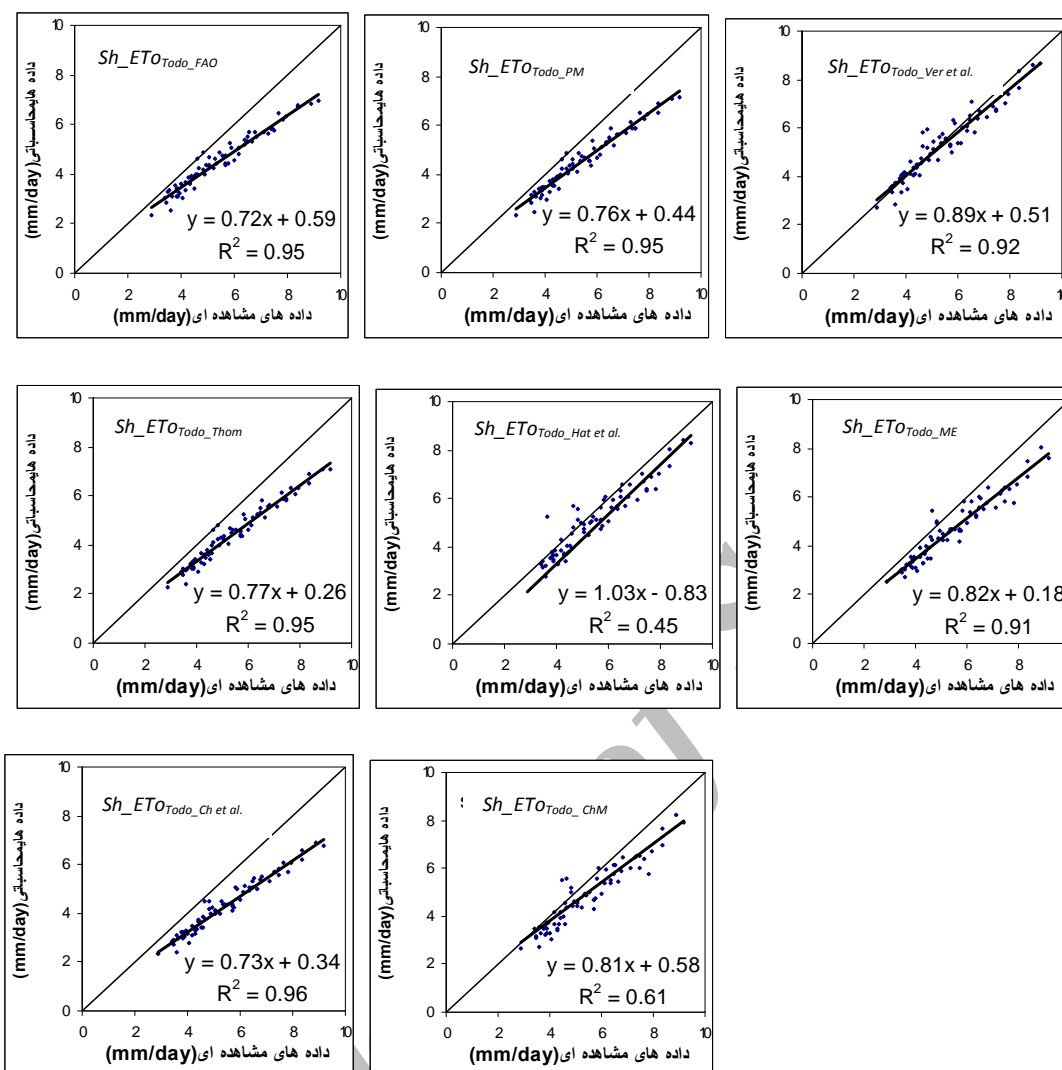


(شکل ۲) - مقایسه مدل‌های مجموع ساعتی که در آنها r_a به روش فائو محاسبه شده است با داده‌های لایسیمتر

تبخیر-تعرق روزانه

مقایسه محاسبات تبخیر-تعرق روزانه با مقادیر لایسیمتری نشان داد بیشترین دقت مربوط به مدل $daily_ETO_{Todo}$ با r^2 ، شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون به ترتیب برابر با ۰/۹۲، ۰/۷۴ و ۰/۲۱ بود. دو مدل $daily_ETO_{FAO}$ و $daily_ETO_{PM}$ با r^2 برابر ۰/۸۷ از دقت کمتری برخوردار بودند.

زمانی که r_c از روش $f(Rn)$ محاسبه شد، دقیق‌ترین نتیجه مربوط به مدل $sh_ETO_{f(Rn)_FAO}$ بود که بالاترین مقدار ضریب تعیین را به میزان ۰/۸۹ به خود اختصاص داد. هر چند در روش اخیر مقادیر شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون تا حد بسیار خوبی بهبود پیدا کرد اما مقادیر ضریب تعیین کاهش یافت.



(شکل ۳) - مقایسه مدل‌های مجموع ساعتی که در آنها r_c به روش Todorovic(1999) محاسبه شده است با داده‌های لایسیمتر

نتیجه

مدل‌های مجموع تبخیر-تعرق ساعتی دقیق‌تر از مدل‌های روزانه بود. از میان روش‌های مختلف محاسبه r_c دو روش ASCE و Todorovic(1999) منجر به برآوردهای دقیق‌تری از تبخیر-تعرق شدند. هر چند محاسبه r_c به روش ASCE کمی منجر به افزایش r^2 گردید، اما روش Todorovic(1999) شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون را تا حد بسیار خوبی بهبود بخشید. از میان روش‌های مختلف محاسبه و تصحیح مقاومت آیرودینامیک دو روش Mahrt and Ek(1984) و Choudhury et al.(1986) منجر به برآوردهای دقیق‌تری از تبخیر-تعرق شدند. روش Mahrt and Ek(1984) به ازای کلیه روش‌های محاسبه r_c تخمین بسیار دقیقی از تبخیر-تعرق ارائه نمود. به طوری که وقتی r_c با روش‌های پنمن مانیتیس فائو،

پنمن مانیتیس و ASCE محاسبه شد، محاسبه r_a به روش Mahrt and Ek(1984) and دقیق‌ترین مقادیر را برآورد کرد. بنابراین روش Mahrt and Ek(1984) به عنوان مناسب‌ترین روش تصحیح r_a معرفی می‌شود. روش Choudhury et al.(1986) نیز از دقت بسیار قابل قبولی برخوردار بود.

از میان مدل‌های مختلف برآورد مجموع تبخیر-تعرق ساعتی مدل $sh_ETOTodo_Ver\ et\ al.$ به عنوان مدل برتر انتخاب شد. زیرا شیب خط رگرسیون این مدل به میزان ۰/۸۹ بسیار مناسب بود و باعث شد کمتر بودن ضریب تعیین این مدل نسبت به برخی مدل‌های دیگر جبران شود. بر اساس نتایج حاصله پیشنهاد می‌شود برای برآورد تبخیر-تعرق از مدل $sh_ETOTodo_Ver\ et\ al.$ استفاده گردد. در صورت عدم دسترسی به داده‌های مورد نیاز تصحیح وضعیت پایداری، استفاده

- Liu, S., Mao, D. and Lu, L. (2006). Measurement and estimation of the aerodynamic resistance. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 3: 681-705.
- Mahrt, L. and Ek, M. (1984). The influence of atmospheric stability on potential evaporation. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23: 222-234.
- Mirlatifi, S.M. (1991). Quantification of aerodynamic and canopy resistance terms for estimating reference evapotranspiration, Supervised by: Richard G. Allen. THESES (Ph.D.) Univ. of Utah state, U.S.A.
- Mohamadian, A., Alizadeh, A. and Javanmard, S. (2005). Adjusting the amount of overestimation reference evapotranspiration calculated by non reference data in Iran, *Journal of agricultural engineering research*, 6(23): 67-84
- Thom, A. S. (1975). Momentum, mass and heat exchange of plant communities, in: Monteith J. L. (ED.), *Vegetation and the atmosphere*, Vol. 1, Academic press, London-New York -San Francisco, 1975, pp. 57-109.
- Todorovic, M. (1999). Single layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125(5): 235-245.
- Verma, S. B., Rosenberg, N. J., Blad, B. L., and Baradas, M. W. (1976). Resistance-energy balance method for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. *Agronomy Journal*, 68: 776-782.
- Webb, E. K. (1970). Profile relationship: The log-linear range, and extension to strong stability. *Quarterly journal of royal meteorological society*, 96: 67-90.
- Xie Xiaqun (1988). An improved energy balance-aerodynamic resistance model used estimation of evapotranspiration on the wheat field. *Acta Meteorology Sinica*, 46: 102-106.
- از مدل $sh_ETO_{Todo_PM}$ نتایج مناسبی ارائه می‌کند. در صورت عدم دسترسی به داده‌های ساعتی استفاده از مدل $daily_ETO_{Todo}$ پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R. L., Itenfisu, D., Steduto, P., Brengena, J., Yrisarry, J. B., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I. and Elliot, R. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural water management*, 319(1-2): 1-22.
- Allen, R. G., Perrier, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirement*. FAO Irrigation and Drainage. Paper No. 56. Rome Italy: United Nations FAO.
- Choudhury, B. J., Reginato, R. J., and Idso, S. B. (1986). An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux, *Agric. For. Meteorol.*, 37: 75-88.
- Choudhury, B. J. and Monteith, J. L. (1988). A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 11: 373-398.
- Hatfield, J.L., Perrier, A. and Jackson, R. D. (1983). Estimate of evapotranspiration at one time of day using remotely sensed surface temperature. *Agricultural water management*, 7: 341-350.
- Lecina, S., Martines-Cob, A., Peres, P. J., Villalobos, F. J. and Baselga, J. J. (2003). Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid condition. *Agricultural water management*, 60: 181-198.

تاریخ دریافت: ۸۷/۵/۶

تاریخ پذیرش: ۸۸/۹/۱۸

Investigating effects of aerodynamic and canopy resistances on estimates of reference evapotranspiration by Penman Monteith equation

E. Nematpoor¹, M. Mirlatifi^{2*}, K. Mohamadi³

Abstract

Effects of various calculation methods of aerodynamic and canopy resistances on estimates of reference evapotranspiration (ET_o) by Penman-Monteith (PM) equation for 70 days of lysimeter-weather data was evaluated. Canopy resistance (r_c) was computed according to PM, FAO PM, ASCE PM and Todorovic(1999) methods and as a function of net radiation. Aerodynamic resistance (r_a) was computed and modified based on atmospheric stratification according to eight methods including PM, FAO PM, Thom(1975), Verma et al.(1976), Hatfield et al.(1983), Mahrt and Ek(1984), Chouhury et al.(1986) and Choudhury and Monteith(1988). Daily ET_o was computed using daily climatological data and from the sum of hourly computed ET_o values. Considering the combinations of various methodologies for computation of r_c and r_a in PM equation, hourly ET_o was computed from 40 methods and compared with lysimeter data. Three methods namely PM, FAO PM, and Todorovic(1999) were used to compute daily ET_o . Computing r_c according to ASCE method gave the highest r^2 value for calculation of daily ET_o as the sum of hourly values. Todorovic(1999) method gave r^2 value close to the ASCE method and was ranked as second method based on r^2 values. But, Todorovic(1999) method when compared with ASCE method improved slope and the Y-intercept of the regression line. ET_o estimates were improved when r_a was corrected for stability by Mahrt and Ek(1984) and Chouhury et al.(1986) methods as compared to other stability correction methods. In regard to daily methods, Todorovic(1999) method had r^2 , slope and Y-intercept values equal to 0.92, 0.74 and 0.21 respectively and had the best performance. Todorovic(1999) method when compared with PM and ASCE methods improved r^2 , slope and Y-intercept of the regression line. The performances of sum of hourly methods were generally better than computations from average daily data.

Keywords: Reference evapotranspiration, Canopy resistance, Aerodynamic resistance, Atmospheric stability condition

1– Graduate student, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University

(*– Corresponding author Email: Mirlat_m@modares.ac.ir)

2– Associate professor, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University

3– Associate professor, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University