

## توسعه یک چارچوب ریزمقیاس سازی به منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه: ۲- برآورد تبخیر-تعرق زیرروزانه با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه ریزمقیاس شده

فرزین پرجمی عراقی<sup>۱</sup> - سید مجید میرلطیفی<sup>۲\*</sup> - شجاع قربانی دشتکی<sup>۳</sup> - مجید وظیفه‌دوست<sup>۴</sup> - عدنان صادقی لاری<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۰۷

### چکیده

در کاربردهای مختلفی چون مدل‌سازی پویای زراعی-هیدرولوژیکی، نیاز به برآوردهای زیرروزانه تبخیر-تعرق مرجع (ET<sub>o</sub>) می‌باشد. با این حال، در بسیاری از مناطق، عدم دسترسی به داده‌های هواشناسی زیرروزانه مانع از کفی‌سازی ET<sub>o</sub> زیرروزانه گردیده است. در این مقاله، ET<sub>o</sub> زیرروزانه با استفاده از مدل‌های پنمن-مانتیت ASCE و فائو ۵۶ (به ترتیب، ASCE-PM و FAO56-PM) و اطلاعات هواشناسی زیرروزانه حاصل از چارچوب ریزمقیاس‌سازی توسعه یافته برآورد گردید. بدین منظور، از اطلاعات هواشناسی بلندمدت روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک آبادان (۵۹ ساله) و اهواز (۵۰ ساله) استفاده شد. نتایج حاکی از یک انطباق بسیار بالا بین مقادیر روزانه و برآوردهای مجموع ۲۴ ساعته ET<sub>o</sub> اشتقاق یافته از مدل‌های ASCE-PM (با ضریب کارایی مدل (EF) بین ۰/۹۹۰ تا ۰/۹۹۴) و FAO56-PM (با EF بین ۰/۹۹۲ تا ۰/۹۹۵) در مقیاس‌های زمانی مختلف بود. برآوردهای مجموع ۲۴ ساعته ET<sub>o</sub> زیرروزانه اشتقاق یافته از هر دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM، مقادیر ET<sub>o</sub> روزانه در مناطق آبادان و اهواز را به ترتیب، کم‌برآورد (به ترتیب، ۰/۰۸ و ۰/۵۸ درصد) و بیش‌برآورد (به ترتیب، ۱/۶۲ و ۰/۹۸ درصد) نمودند. عملکرد هر دو مدل فوق در بازسازی مقادیر روزانه مولفه آیرودینامیک، در مقایسه با مقادیر روزانه مولفه تشعشع بهتر بود. به‌طور کلی، با افزایش مقیاس زمانی، میزان انطباق بین مقادیر مجموع ۲۴ ساعته ET<sub>o</sub> با مقادیر روزانه فاقد روندی مشخص بود. نتایج نشان داد اتخاذ گام زمانی کوچکتر، لزوماً به بهبود انطباق مقادیر مجموع ۲۴ ساعته و روزانه ET<sub>o</sub> نمی‌انجامد.

واژه‌های کلیدی: پنمن-مانتیت، مقاومت پوشش گیاهی

### مقدمه

جریان بخار آب مدل‌سازی می‌شود (۳). از سوی دیگر، به‌منظور حصول یکپارچگی و دستیابی به یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیر-تعرق، مقادیر ثابتی برای پارامترهای این مدل فرض شده که بر این اساس، دو ویرایش از این مدل شامل، مدل پنمن-مانتیت فائو-۵۶ (FAO56-PM) و مدل پنمن-مانتیت ASCE (ASCE-PM) ارائه گردیده است. در مدل FAO56-PM (۱)، سطح مرجع به‌عنوان پوشش چمن فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، مقاومت پوشش گیاهی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب آلبیدوی ۰/۲۳ در نظر گرفته شده است (۱). مدل ASCE-PM (۳)، در سال ۱۹۹۹ و بنا به درخواست انجمن آبیاری ایالات متحده، توسط کمیته تبخیر-تعرق در آبیاری و هیدرولوژی-انجمن مهندسين عمران امریکا (ASCE-ET) برای دو سطح مرجع چمن (ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر) برای گیاهان کوتاه و یونجه (ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر) برای گیاهان بلند به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع روزانه و ساعتی ارائه گردیده است (۳). برای گام زمانی روزانه و سطح مرجع چمن (که سطح مرجع مورد نظر این پژوهش نیز می‌باشد)، مدل ASCE-PM کاملاً مشابه با مدل FAO56-PM بوده و

فرآیند تبخیر-تعرق یکی از مولفه‌های بنیادین چرخه‌ی آبی در طبیعت بوده و برآورد هر چه واقعی‌تر آن یکی از پیش‌نیازهای اساسی در راستای مدیریت منابع آب می‌باشد. اهمیت این فرآیند سبب گردیده است، مدل‌های فیزیکی و تجربی گوناگونی به‌منظور کمی نمودن آن ارائه گردد (۶، ۹، ۱۰، ۱۴، ۱۵ و ۱۹). از بین انبوه روش‌های موجود، می‌توان به مدل ترکیبی و فیزیکی-بنیان پنمن-مانتیت اشاره نمود که در آن، فرآیند تبخیر-تعرق با در نظر گرفتن نقش دو عامل انرژی آزاد موجود در سطح زمین برای تبدیل آب به بخار و شیب

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* نویسنده مسئول: (Email: mirlat\_m@modares.ac.ir)

۳- دانشیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۴- استادیار، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان

۵- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

مختصات جغرافیایی  $30^{\circ}22'$  شمالی و  $48^{\circ}15'$  شرقی و ارتفاع  $6/6$  متر از سطح دریا و اهواز (۵۰ سال) با مختصات جغرافیایی  $31^{\circ}20'$  شمالی و  $48^{\circ}40'$  شرقی و ارتفاع  $22/5$  متر از سطح دریا استفاده گردید. همچنین، به منظور محاسبه تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه، از اطلاعات هواشناسی ریزمقیاس سازی شده حاصل از چارچوب ریزمقیاس سازی توسعه یافته در مقاله نخست (۱۳) استفاده گردید. به گونه‌ای که مقادیر متغیرهای هواشناسی در هریک از مقیاس‌های زمانی زیرروزانه مورد بررسی بر اساس مقادیر زیرروزانه اشتقاق یافته برای مقیاس زمانی یک ثانیه تولید شد. در پژوهش یاد شده، داده‌های دو ایستگاه هواشناسی فوق به ترتیب، به عنوان مجموعه داده‌های واسنجی و اعتباریابی مدل‌های ریزمقیاس سازی متغیرهای هواشناسی مورد استفاده قرار گرفت. در پژوهش حاضر، اطلاعات هواشناسی ایستگاه اهواز به منظور ارزیابی قابلیت تعمیم پذیری مدل‌های ریزمقیاس سازی منتخب در پژوهش فوق در برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه مورد استفاده قرار گرفت.

**محاسبه تبخیر-تعرق چمن مرجع:** تبخیر-تعرق مرجع روزانه و زیرروزانه با استفاده از مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM PM به ترتیب، بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط آلن و همکاران (۱) و آلن و همکاران (۳) محاسبه گردید. در مدل پنمن-مانتیث، نقش دو عامل مؤثر بر فرآیند تبخیر-تعرق، شامل انرژی آزاد موجود در سطح زمین برای تبدیل آب به بخار و شیب جریان بخار آب در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، میزان تبخیر-تعرق از دو بخش جداگانه، شامل مولفه تشعشع و مولفه آیرودینامیک که به ترتیب، ترم‌های اول و دوم رابطه زیر می‌باشند، تشکیل می‌گردد (۱):

$$ET_o = \frac{\Delta_v(R_n - G) + k_{p,air} c_{air} (e_{sat} - e_a) / r_a}{\lambda_w (\Delta_v + \gamma (1 + r_c / r_a))} \quad (1)$$

که در آن:  $ET_o$  تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر بر مقیاس زمانی)،  $R_n$  تشعشع خالص دریافتی در سطح تاج گیاه (مگاژول بر متر مربع بر مقیاس زمانی)،  $G$  شار حرارتی خاک (مگاژول بر متر مربع بر مقیاس زمانی) که در هر دو مدل در گام زمانی روزانه مقدار آن برابر با صفر و در محاسبات زیرروزانه، در ساعات روز (ساعتی که در آن  $R_n > 0$ ) و شب (ساعتی که در آن  $R_n \leq 0$ ) به ترتیب، برابر با  $0/1 R_n$  و  $0/5 R_n$  در نظر گرفته می‌شود،  $\Delta_v$  شیب منحنی فشار بخار اشباع در درجه حرارت متوسط اندازه‌گیری شده در بازه زمانی مورد نظر (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)،  $\lambda_w$  گرمای نهان تبخیر آب در درجه حرارت متوسط اندازه‌گیری شده در بازه زمانی مورد نظر (مگاژول بر کیلوگرم)،  $C_{p,air}$  گرمای ویژه‌ی هوای مرطوب (مگاژول بر گرم بر درجه سانتی‌گراد)،  $k$  ضریب تبدیل واحد و برابر با  $3600 \times dt$  که در آن  $dt$  گام زمانی (ساعت)،  $\gamma$  ضریب سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)،  $r_c$  مقاومت پوشش گیاهی (ثانیه بر متر) و  $r_a$  مقاومت آیرودینامیک (ثانیه بر متر) می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

در گام زمانی ساعتی تنها تفاوت این دو روش مقادیر انتخابی برای ترم مقاومت پوشش گیاهی است. به گونه‌ای که در مدل ASCE-PM مقادیر این ترم در طول ساعات روز (ساعتی که در آن  $R_n > 0$ ) و شب (ساعتی که در آن  $R_n \leq 0$ ) به ترتیب، برابر با ۵۰ و ۲۰۰ ثانیه بر متر در نظر گرفته شده است. سازمان فائو، مدل FAO56-PM را به عنوان یگانه روش محاسبه تبخیر-تعرق مرجع در شرایط موجود بودن داده‌های مورد نیاز آن توصیه نموده است (۱، ۳). این مدل نسبت به سایر روش‌های برآورد تبخیر-تعرق مرجع دارای دو مزیت است. نخست اینکه این روش به دلیل اساس فیزیکی آن، بدون نیاز به واسنجی می‌تواند در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گیرد. ثانیاً، مطالعات لایسیمتری متعدد صورت گرفته به منظور اعتباریابی این روش، آن را به عنوان یک روش معتبر برآورد تبخیر-تعرق مرجع توصیه نموده‌اند (۲، ۱۱، ۱۷، ۲۰، ۲۱). با وجود قابلیت مدل پنمن-مانتیث در برآورد تبخیر-تعرق مرجع، بزرگترین چالش در به کارگیری آن، خصوصاً در مقیاس زمانی ساعتی، موجود بودن داده‌های هواشناسی متعددی است که در شرایط کشور ما جز در مواردی انگشت شمار، در مقیاس زمانی روزانه و نهایتاً سه ساعته در دسترس پژوهشگران قرار دارد و در عمل، دسترسی به داده‌های هواشناسی موجود، به مقادیر روزانه حداقل و حداکثر دمای هوا، بارندگی، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی محدود می‌شود. همچنین، پژوهش‌های انگشت شمار صورت گرفته در داخل کشور به منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه، تنها به استفاده از داده‌های هواشناسی ساعتی و مقایسه برآوردهای تبخیر-تعرق مرجع ساعتی و مجموع ۲۴ ساعته حاصل از دو مدل FAO56-PM (به ترتیب،  $ET_o^{h,FAO56}$  و  $ET_o^{SOH,FAO56}$ ) و ASCE-PM (به ترتیب،  $ET_o^{SOH,ASCE}$  و  $ET_o^d$ ) با یکدیگر و یا با برآوردهای ویرایش روزانه مدل‌های یاد شده ( $ET_o^d$ ) محدود گردیده است (۴ و ۱۶). تاکنون تلاشی در جهت امکان‌سنجی برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه با استفاده از اطلاعات روزانه‌ی ایستگاه‌های هواشناسی کشور و ارزیابی درجه اعتبار برآوردهای فوق صورت نگرفته است. در این راستا، چارچوبی فیزیکی-بنیان به منظور ریزمقیاس سازی متغیرهای هواشناسی مورد نیاز برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از مدل پنمن-مانتیث توسعه یافت که شرح آن در مقاله نخست ارائه گردید. هدف از پژوهش حاضر، امکان‌سنجی برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه با استفاده از مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM و مقادیر ریزمقیاس سازی شده‌ی متغیرهای هواشناسی روزانه بوده است.

## مواد و روش‌ها

به منظور محاسبه تبخیر-تعرق مرجع روزانه از اطلاعات هواشناسی بلندمدت روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک آبادان (۵۹ سال) با

جزء بندی آماره میانگین مربعات خطا (MSE) تعیین گردید (۷). همین طور، به دلیل موجود نبودن مقادیر اندازه گیری شده ی تشعشع خورشیدی زیرروزانه، تنها گزینه ی پیش رو، استفاده از مقادیر  $ET_0^{d,aero}$ ،  $ET_0^{d,rad}$  و  $ET_0^d$  به عنوان معیار مقایسه بود.

## نتایج و بحث

مقادیر متوسط درازمدت روزانه متغیرهای هواشناسی مورد نیاز برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع در دو ایستگاه هواشناسی آبادان و اهواز در شکل های ۱-الف و ۱-ب نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، الگوی تغییرات زمانی متغیرهای هواشناسی مورد بررسی در دو ایستگاه از تشابه بالایی با یکدیگر برخوردار می باشند.

به گونه ای که در هر دو منطقه مورد مطالعه، حداکثر مقادیر متوسط روزانه سرعت باد و تشعشع خورشیدی در ماه ژوئن و حداکثر مقادیر متوسط روزانه فشار بخار واقعی و دمای هوا به ترتیب، در ماه های آگوست و جولای رخ داده است. همین طور، در هر دو منطقه ی مورد مطالعه، حداکثر مقادیر متوسط روزانه دمای هوا بعد از گذشت حدود یک ماه از زمان وقوع متوسط روزانه تشعشع خورشیدی حداکثر رخ داده است. بر اساس شکل ۱-ج، حداکثر تبخیر-تعرق مرجع روزانه کل و نیز متوسط روزانه مولفه آیرودینامیک در منطقه اهواز و آبادان به ترتیب، در روزهای ۲۹ و ۳۰ ژوئن رخ داده اند. این در حالی است که حداکثر مقدار مولفه تشعشع در هر دو منطقه در روز ۲۲ جولای رخ داده است که این تاریخ با زمان وقوع دمای حداکثر در دو منطقه مورد مطالعه منطبق است.

## آنالیز حساسیت

مقادیر متوسط روزانه ضرایب حساسیت  $ET_0^{d,aero}$ ،  $ET_0^{d,rad}$  و  $ET_0^d$  نسبت به متغیرهای هواشناسی دمای هوای متوسط، سرعت باد در ارتفاع دو متری، فشار بخار واقعی و تشعشع خورشیدی در مناطق مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس مقادیر ضرایب حساسیت  $S_x^{ET_0^d}$  می توان گفت به طور متوسط و بسته به روز از سال، یک تغییر ۱۰ درصدی در مقادیر دمای هوا، سرعت باد، فشار بخار واقعی و تشعشع خورشیدی به ترتیب، منجر به یک تغییر ۶/۳۰ تا ۱۶/۵۶، ۱/۵۱ تا ۳/۳۱، ۲/۷۲ تا ۳۱/۱۵ و ۰/۲۹ تا ۱/۴۰ درصدی در مقدار  $ET_0^d$  در منطقه ی آبادان و یک تغییر به ترتیب، ۵/۹۰ تا ۱۶/۲۳، ۱/۸۲ تا ۳/۸۸، ۲/۰۸ تا ۳۱/۷۷ و ۰/۲۸ تا ۱/۹۲ درصدی در مقدار  $ET_0^d$  در منطقه ی اهواز می شود.

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

که در آن:  $Z_m$ : ارتفاع سطح اندازه گیری سرعت باد (متر)،  $z_h$ : ارتفاع سطح اندازه گیری رطوبت هوا (متر)،  $Z_{om}$ : طول زبری موثر برای انتقال اندازه حرکت (متر) و  $Z_{oh}$ :  $Z_{om} = 0.123 h_c$  که در آن  $h_c$ : ارتفاع گیاه مرجع (متر) است،  $Z_{oh}$ : طول زبری موثر برای انتقال گرما و بخار آب (متر) و  $Z_{om} = 0.1 Z_{oh}$ ،  $d$ : ارتفاع جابجایی سطح مرجع (متر) و  $d = 2/3 h_c$ ،  $u$ : متوسط سرعت باد در طول ساعات ۷:۰۰ تا ۱۹:۰۰ (متر بر ثانیه) و  $u_0 = 1.33 u$  که در آن  $u_0$ : متوسط روزانه ی سرعت باد است و  $k$ : ثابت ون-کارمن و برابر با ۰/۴۱ (-) می باشد.

## آنالیز حساسیت: به منظور داشتن ایده ای در خصوص اهمیت

هریک از متغیرهای هواشناسی در برآوردهای روزانه مولفه آیرودینامیک ( $ET_0^{d,aero}$ )، مولفه تشعشع ( $ET_0^{d,rad}$ ) و  $ET_0^d$ ، حساسیت برآوردهای فوق نسبت به متغیرهای هواشناسی، شامل دمای متوسط روزانه، فشار بخار واقعی، سرعت باد و تشعشع خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ضرایب حساسیت بدون بعد مربوط به هر یک از متغیرهای هواشناسی مذکور، بر اساس مشتقات جزئی مدل پنمن-ماتیتث نسبت به هر یک از متغیرهای هواشناسی مورد بررسی به صورت زیر محاسبه گردید (۵):

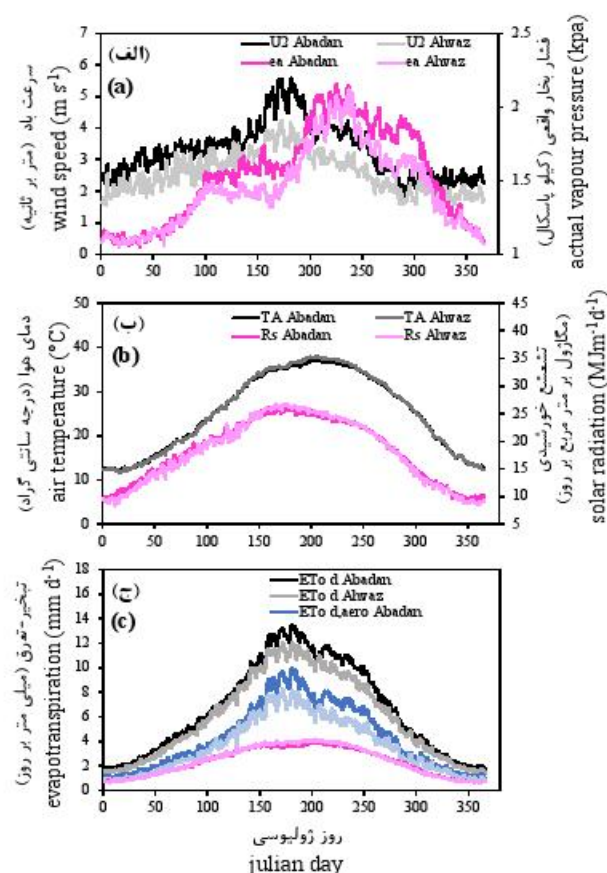
$$S_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta y/y}{\Delta x/x} \right) = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y} \quad (3)$$

که در آن:  $S_x$ : ضریب حساسیت متغیر وابسته  $y$  شامل  $ET_0^{d,aero}$ ،  $ET_0^{d,rad}$  و  $ET_0^d$  نسبت به متغیر مستقل  $x$  شامل متغیرهای هواشناسی دمای هوای متوسط، سرعت باد در ارتفاع دو متری، فشار بخار واقعی و تشعشع خورشیدی می باشد. مقادیر ضرایب حساسیت برای هر چهار متغیر هواشناسی فوق به صورت روزانه محاسبه و سپس، متوسط بلندمدت آنها برای هر روز از سال تعیین گردید.

## ارزیابی برآوردهای ساعتی مدل های ASCE-PM و

### FAO56-PM

به منظور ارزیابی و مقایسه میزان انطباق برآوردهای زیرروزانه و روزانه ی مولفه های تشعشع، آیرودینامیک و تبخیر-تعرق مرجع کل محاسبه شده از طریق مدل های ASCE-PM و FAO56-PM با یکدیگر از آماره های میانگین خطا (ME)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ضریب همبستگی پیرسون (r) و ضریب کارایی مدل (EF) استفاده شد (۱۲). به منظور سهولت مقایسه مدل های مورد بررسی، با توجه به آماره های MAE، RMSE و ضریب همبستگی پیرسون، رتبه ای به هر یک از مدل های مورد بررسی داده شد که میانگین این رتبه ها، به عنوان رتبه نهایی هر یک از مدل ها در نظر گرفته شد. همچنین، سهم هر یک از منابع عدم انطباق مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده با استفاده از روش



شکل ۱ متوسط درازمدت روزانه متغیرهای هواشناسی سرعت باد در ارتفاع دو متری (U2) و فشار بخار واقعی (e<sub>a</sub>) و دمای هوای متوسط (TA) و تشعشع خورشیدی (R<sub>s</sub>) و تیخیر نمرج روزانه و مولفه‌های آبرودینامیک و تشعشع (به ترتیب، ET<sub>o</sub><sup>d</sup>، ET<sub>o</sub><sup>d,aero</sup> و ET<sub>o</sub><sup>d,rad</sup>) (ج) در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

Figure 1- Long term daily average of meteorological variables, wind speed at 2 m height (U2) and actual vapour pressure (e<sub>a</sub>) (a), air temperature (TA) and solar radiation (R<sub>s</sub>), and evapotranspiration and aerodynamic and radiation components (ET<sub>o</sub><sup>d</sup>, ET<sub>o</sub><sup>d,aero</sup> and ET<sub>o</sub><sup>d,rad</sup>, respectively) (c) in studied meteorological stations

و  $S_{TA}^{ET_d,rad}$  از الگوی تغییرات دمای هوا در طول سال (شکل ۱-ب) تبعیت می‌کند. این امر بیانگر آن است که الگوی تغییرات ضرایب فوق به طور عمده توسط دمای هوا تعیین می‌شوند. بر اساس شکل‌های فوق، در فصول سرد سال،  $ET_o^d$ ،  $ET_o^{d,aero}$  و  $ET_o^{d,rad}$  حساسیت کمتری به دمای هوا داشته و این حساسیت در فصول گرم سال به تدریج افزایش یافته و در تابستان به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این الگو در مورد حساسیت  $ET_o^{d,rad}$  نسبت به تشعشع خورشیدی نیز صادق است. همان‌طور که در شکل‌های ۲-الف و ۲-د و شکل‌های ۲-ب و ۲-ه مشاهده می‌شود، ضرایب حساسیت  $S_{e_a}^{ET_o^{d,aero}}$  و  $S_{e_a}^{ET_o^d}$  نیز از الگوی تغییرات مشابهی تبعیت می‌کنند. مقادیر منفی ضرایب حساسیت  $S_{e_a}^{ET_o^d}$  و  $S_{e_a}^{ET_o^{d,aero}}$  بیانگر آن است که افزایش فشار بخار

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقادیر ضرایب حساسیت محاسبه شده در طول سال دارای نوسانات قابل توجه می‌باشند. این نکته توسط گونگ و همکاران (۸) نیز گزارش شده است. همچنین، الگوی تغییرات زمانی تمامی ضرایب حساسیت در هر دو منطقه مورد مطالعه از تشابه بالایی با یکدیگر برخوردار است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود،  $ET_o^d$  و  $ET_o^{d,aero}$  نسبت به متغیرهای دمای هوا و فشار بخار واقعی، همواره دارای بیشترین حساسیت بوده‌اند. همچنین،  $ET_o^{d,rad}$  نسبت به متغیرهای دمای هوا، تشعشع خورشیدی و سرعت باد، در مقایسه با فشار بخار واقعی از حساسیت بیشتری برخوردار بوده است. همان‌طور که در شکل‌های ۲-الف و ۲-د و شکل‌های ۲-ج و ۲-ه مشاهده می‌شود، در هر دو منطقه مطالعاتی، الگوی تغییرات ضرایب حساسیت  $S_{T_A}^{ET_o^d}$ ،  $S_{T_A}^{ET_o^{d,aero}}$

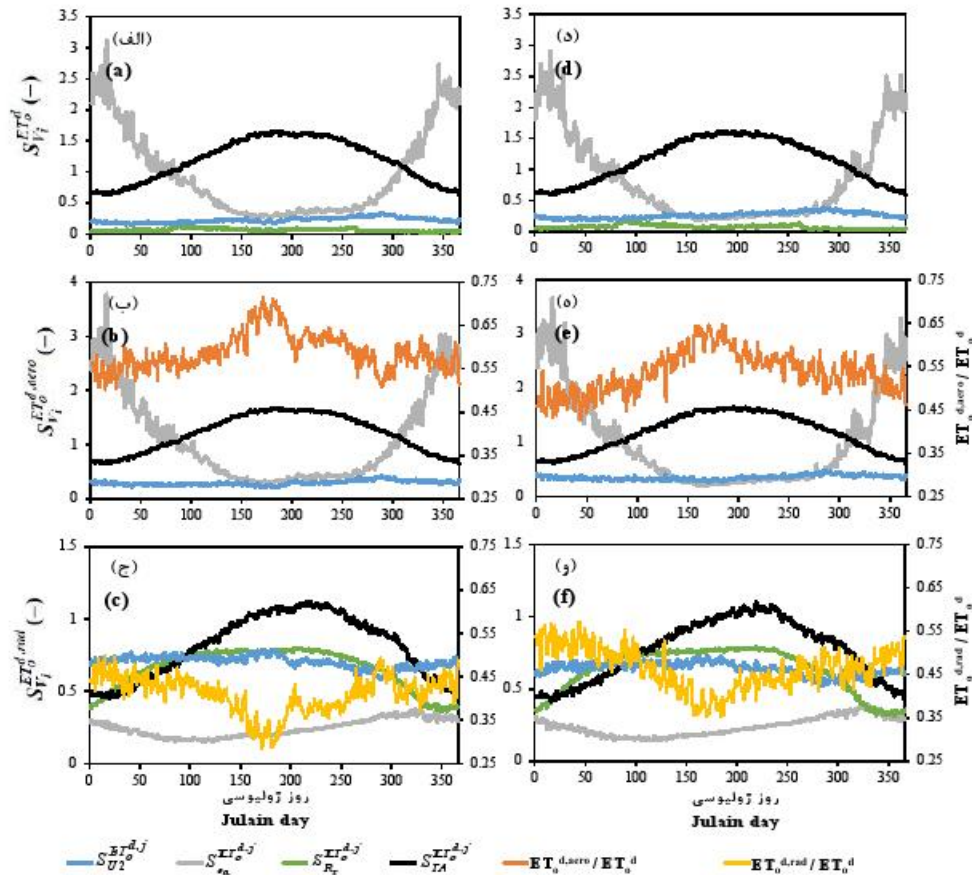
در دو منطقه (شکل ۱-ب) و کاهش ضریب حساسیت  $S_{ET_0^{FAO56}}^{ET_0^{aero}}$  در فصول گرم سال و در نتیجه، نمود یافتن نقش متغیر سرعت باد در فرآیند تبخیر-تعرق در ایام یاد شده (شکل‌های ۲-ب و ۲-ه) نسبت داد.

### بررسی انطباق برآوردهای $ET_0^{SOH,FAO56}$ و $ET_0^{SOH,ASCE}$ با مقادیر $ET_0^d$

مقادیر آماره‌های ارزیابی به منظور بررسی میزان انطباق برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56}$  و  $ET_0^{SOH,ASCE}$  با مقادیر  $ET_0^d$  در جدول ۱ ارائه گردیده است. رتبه‌های ارزیابی ارائه شده در جدول ۱ حاکی از آن است که در هر دو منطقه مورد مطالعه، در مقایسه با مدل ASCE-PM، مجموع ۲۴ ساعته برآوردهای اشتقاق یافته از مدل FAO56-PM از انطباق بیشتری با مقادیر روزانه نظیر خود برخوردار بوده‌اند. همچنین، بر اساس آماره EF می‌توان گفت که عملکرد هر دو مدل در بازسازی مقادیر  $ET_0^{aero}$  بهتر از عملکرد آنها در بازسازی مقادیر  $ET_0^{rad}$  بوده است که این نکته از شکل‌های ۳ و ۴ نیز قابل استنباط می‌باشد. اما همان‌طور که در شکل‌های فوق نیز مشخص است، از آنجا که سهم  $ET_0^{rad}$  در  $ET_0^d$  در مقایسه با سهم  $ET_0^{aero}$  کمتر بوده است، این نارسایی، در میزان عدم انطباق کل مقادیر مجموع ۲۴ ساعته و روزانه تبخیر-تعرق مرجع، نمود کمتری یافته است. از سوی دیگر، همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، بر اساس آماره ME، در هر دو منطقه مورد مطالعه، هر دو برآورد  $ET_0^{SOH,ASCE,rad}$  و  $ET_0^{SOH,FAO56,rad}$  مقادیر  $ET_0^{rad}$  را بیش برآورد نموده‌اند. همچنین، بر اساس مقادیر آماره ME مشخص است که این بیش برآوردگری در مورد برآوردهای  $ET_0^{SOH,ASCE,rad}$  در مقایسه با برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56,rad}$  مشهودتر بوده و این عامل بیش برآوردگری (آماره RSB بین ۴۹/۵۵۲ تا ۷۸/۰۱۹ درصد) دارای بیشترین سهم در عدم انطباق کل بین مقادیر یاد شده بوده است. دلیل این امر ناشی از مقادیر اتخاذ شده برای پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM می‌باشد. از آنجا که پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در مخرج مولفه تشعشع نیز حضور دارد (رابطه ۱) و از آنجا که در طول ساعات روز، مقدار این پارامتر در مدل FAO56-PM (۰.۷۰) ثابته بر متر) بیشتر از مدل ASCE-PM (۰.۵۰ ثابته بر متر) بوده و از طرف دیگر، مقدار پارامتر نسبت شار گرمایی خاک به تشعشع خالص در هر دو مدل یکسان است، لذا می‌توان گفت برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56,rad}$  همواره کمتر از برآوردهای  $ET_0^{SOH,ASCE,rad}$  خواهند بود.

واقعی موجب کاهش برآوردهای  $ET_0^d$  و  $ET_0^{aero}$  می‌شود. در پژوهش‌های گذشته نیز نتایج مشابهی حاصل گردیده و رطوبت هوا یک عامل محدود کننده عمده برای فرآیند تبخیر-تعرق بوده است (۸، ۲۲). همچنین، در هر دو منطقه مطالعاتی،  $ET_0^{rad}$  نسبت به سرعت باد و فشار بخار واقعی از حساسیت کم و بیش ثابتی برخوردار بوده و مقادیر منفی این ضریب حاکی از کاهش برآوردهای  $ET_0^{rad}$  با افزایش سرعت باد است (شکل‌های ۲-ج و ۲-و).

از سوی دیگر، بر اساس شکل‌های ۲-ب و ۲-ه و مقادیر متوسط روزانه کسر مولفه آیرودینامیک  $(ET_0^{aero}/ET_0^d)$ ، سهم این مولفه در  $ET_0^d$  محاسبه شده در فصول گرم سال افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین، می‌توان گفت سهم این مولفه در  $ET_0^d$  در شرایطی به حداکثر مقدار می‌رسد که حساسیت آن نسبت به فشار بخار واقعی و دمای هوا به ترتیب، به حداقل و حداکثر مقدار خود رسیده است. همچنین، سهم مولفه تشعشع در  $ET_0^d$  ( $ET_0^{rad}/ET_0^d$ ) در روزهایی از سال که  $ET_0^{rad}$  دارای بیشترین حساسیت نسبت به دمای هوا، تشعشع خورشیدی و فشار بخار واقعی بوده است، به حداقل مقدار خود رسیده است. همان‌طور که در شکل‌های ۲-ج و ۲-و مشاهده می‌شود، سهم این مولفه در  $ET_0^d$  محاسبه شده در فصول سرد بیشتر از فصول گرم سال بوده است. بر این اساس و با توجه به شکل ۱-ج و شکل‌های ۲-ب، ۲-ه، ۲-ج و ۲-و می‌توان گفت بخش اعظم کل تبخیر-تعرق محاسبه شده در طول سال به مولفه آیرودینامیک تعلق دارد. چراکه در فصول گرم سال که در آن  $ET_0^d$  به حداکثر مقدار خود می‌رسد (شکل ۱-ج)، کسر مولفه آیرودینامیک بخش عمده  $ET_0^d$  را به خود اختصاص داده است (شکل‌های ۲-ب و ۲-ه). متقابلاً در فصول سرد سال که در آن کسر مولفه تشعشع نسبت به کسر مولفه آیرودینامیک غالب است، مقدار کل  $ET_0^d$  محاسبه شده در مقایسه با مقدار آن در فصول گرم سال به‌طور قابل توجهی کمتر می‌باشد. این امر سبب گردید تا سهم مولفه‌های آیرودینامیک و تشعشع در مقدار مجموع سالانه مقادیر متوسط روزانه  $ET_0^d$  در منطقه‌ی آبادان به ترتیب، برابر با ۶۴/۸۵ و ۳۹/۱۵ درصد و در منطقه‌ی اهواز به ترتیب، برابر با ۶۰/۲۶ و ۳۹/۷۴ درصد باشد. این نکته در شکل ۱-ج نیز به‌وضوح قابل مشاهده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر مولفه تشعشع در هر دو منطقه بسیار مشابه با یکدیگر می‌باشد. در حالی که در فصول گرم سال، مقادیر ترم آیرودینامیک منطقه‌ی آبادان به‌میزان اندکی بیشتر از منطقه‌ی اهواز می‌باشد که دلیل آن را می‌توان به برآیند عواملی چون بیشتر بودن مقادیر متوسط روزانه سرعت باد در منطقه‌ی آبادان در تمامی ایام سال، نزدیکی مقادیر متوسط روزانه‌ی دمای هوا



شکل ۲ مقادیر متوسط روزانه کسر مولفه‌های آبرودینامیک  $(ET_0^{aero}/ET_0^d)$ ، تشعشع  $(ET_0^{rad}/ET_0^d)$  و ضرایب حساسیت  $S_{V_i}^{ET_0^{d,j}}$  که در آن  $V_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) به ترتیب، میانگر متغیرهای هواشناسی دمای هوای متوسط (TA)، سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $U_2$ )، فشار بخار واقعی (ea) و تشعشع خورشیدی ( $R_s$ ) و  $ET_0^{d,j}$  ( $j=1, 2, 3$ ) به ترتیب، میانگر  $ET_0^{rad}$ ،  $ET_0^{aero}$  و  $ET_0^d$  می‌باشد، در ایستگاه‌های هواشناسی آبادان (به ترتیب،

الف تا ج) و اهواز (به ترتیب، د تا و). به منظور سهولت مقایسه، مقادیر ضرایب  $S_{U_2}^{ET_0^{d,j}}$ ،  $S_{e_a}^{ET_0^{d,j}}$  و  $S_{R_s}^{ET_0^{d,j}}$  در -۱ ضرب شده‌اند

**Figure 2- Long term daily average of aerodynamic  $(ET_0^{aero}/ET_0^d)$  and radiation  $(ET_0^{rad}/ET_0^d)$  fractions and sensitivity coefficients  $S_{V_i}^{ET_0^{d,j}}$  where  $V_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) represents air temperature (TA), wind speed at 2 m height ( $U_2$ ), actual vapour pressure (ea) and solar radiation ( $R_s$ ), respectively and  $ET_0^{d,j}$  ( $j=1, 2, 3$ ) stands for  $ET_0^{rad}$ ,  $ET_0^{aero}$  and  $ET_0^d$ , respectively for Abadan (a to c, respectively) and Ahvaz (d to f, respectively) weather stations.  $S_{U_2}^{ET_0^{d,j}}$ ,  $S_{e_a}^{ET_0^{d,j}}$  and  $S_{R_s}^{ET_0^{d,j}}$  coefficients are multiplied by -1 to facilitate visual comparison**

از سوی دیگر، بر اساس آماره ME (جدول ۱)، در هر دو منطقه مورد مطالعه، برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56,aero}$  و  $ET_0^{SOH,ASCE,aero}$  کمتر از مقادیر  $ET_0^{d,aero}$  برآورد گردیده و مقایسه آماره‌های ME و MAE حاکی از آن است که این کم‌برآوردگری به‌صورت سیستماتیک رخ نداده است. با این حال، همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بر اساس آماره RSB این عامل کم‌برآوردگری دارای بیشترین سهم در عدم انطباق کل بین مقادیر یاد شده بوده است (آماره RSB بین ۴۸/۲۹۵ تا ۵۹/۹۴۹ درصد).

چراکه میزان تبخیر-تعرق برآورد شده از طریق مولفه تشعشع در طول ساعات شب بسیار کمتر از مقدار آن در طول ساعات روز می‌باشد و مقدار بیشتر پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در طول ساعات شب در مدل ASCE-PM (۲۰۰ ثانیه بر متر) نسبت به مدل FAO56-PM (۷۰ ثانیه بر متر) قادر به تغییر جهت اختلاف در برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56,rad}$  و  $ET_0^{SOH,ASCE,rad}$  نخواهد بود. این نکته در شکل ۵ به وضوح قابل مشاهده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56,rad}$  همواره کمتر از برآوردهای  $ET_0^{SOH,ASCE,rad}$  بوده‌اند.

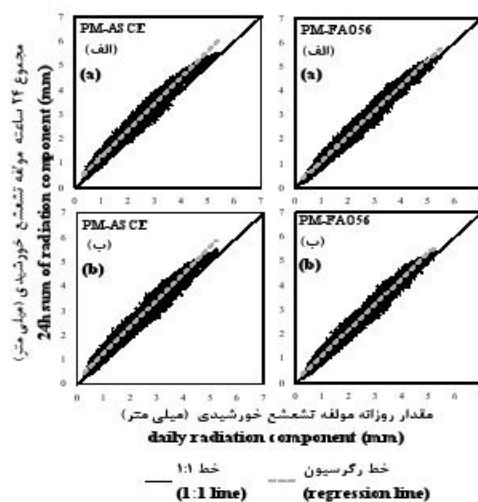
جدول ۱ مقادیر آماره‌های ارزیابی مورد استفاده به منظور بررسی میزان انطباق مجموع ۲۴ ساعته برآوردهای ساعتی مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM با مقادیر روزانه تبخیر تعرق مرجع و مولفه‌های آیرودینامیک و تشعشع (میلی‌متر)<sup>(۴)</sup>

Table 1- Evaluation statistics used to compare the degree of agreement between 24h sum of hourly and daily estimates of reference evapotranspiration and aerodynamic and radiation components derived from ASCE-PM and FAO56-PM models (mm)<sup>(۴)</sup>

	نام مدل (Model)	آماره‌های ارزیابی (Evaluation statistics)									رتبه نهایی (Final rank)	
		ME	MAE	RMSE	r	EF	MSE	RSB	RNU	RLC		
مجموعه داده‌های آبدان (Calibration data set (Abadan Station))	مولفه تشعشع (Radiation component)	ASCE-PM	0.399	0.404(2)	0.452(2)	0.990(2)	0.863	0.204	78.019	4.514	17.467	2
		FAO56-PM	0.176	0.212(1)	0.249(1)	0.991(1)	0.958	0.062	49.552	2.999	47.449	1
	مولفه آیرودینامیک (Aerodynamic component)	ASCE-PM	-0.419	0.421(2)	0.541(2)	0.999(2)	0.977	0.293	59.949	29.080	10.971	2
		FAO56-PM	-0.232	0.238(1)	0.301(1)	0.999(1)	0.993	0.091	59.412	12.460	28.127	1
	تبخیر-تعرق مرجع (Reference evapotranspiration)	ASCE-PM	-0.006	0.269(2)	0.345(2)	0.997(2)	0.994	0.119	0.027	25.367	74.606	2
		FAO56-PM	-0.039	0.230(1)	0.294(1)	0.998(1)	0.995	0.086	1.717	12.833	85.450	1
مجموعه داده‌های اهواز (Validation data set (Ahvaz Station))	مولفه تشعشع (Radiation component)	ASCE-PM	0.401	0.407(2)	0.457(2)	0.991(2)	0.871	0.209	76.757	5.681	17.563	2
		FAO56-PM	0.213	0.243(1)	0.283(1)	0.991(1)	0.951	0.080	56.529	4.364	39.107	1
	مولفه آیرودینامیک (Aerodynamic component)	ASCE-PM	-0.320	0.323(2)	0.444(2)	0.998(2)	0.980	0.198	51.727	34.619	13.655	2
		FAO56-PM	-0.174	0.182(1)	0.250(1)	0.999(1)	0.994	0.063	48.295	19.393	32.312	1
	تبخیر-تعرق مرجع (Reference evapotranspiration)	ASCE-PM	0.098	0.275(2)	0.345(2)	0.997(2)	0.992	0.119	8.076	13.766	78.158	2
		FAO56-PM	0.059	0.236(1)	0.298(1)	0.997(1)	0.994	0.089	3.925	8.818	87.257	1

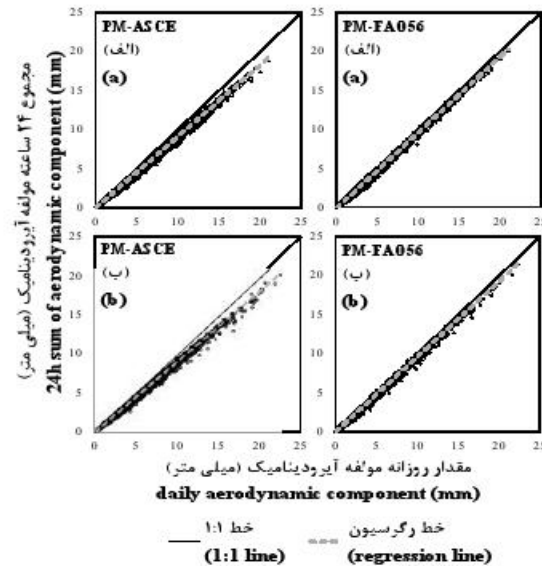
<sup>(۴)</sup> اعداد داخل پرانتز در این جدول، بیانگر رتبه‌ی عملکرد هر مدل بر اساس آماره‌ی مربوطه می‌باشد.

<sup>(۴)</sup> Rank of each model based on the calculated statistic is given in the parenthesis



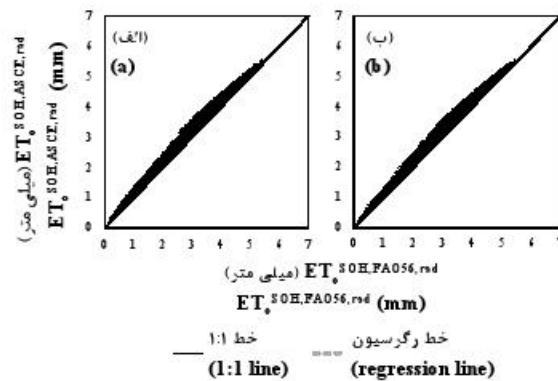
شکل ۳ مقایسه مقادیر روزانه با مقادیر مجموع ۲۴ ساعته برآوردهای مولفه تشعشع تبخیر تعرق مرجع حاصل از مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM در مناطق آبدان (الف) و اهواز (ب)

Figure 3- Comparison of daily vs. 24h sum of hourly radiation component of the reference evapotranspiration derived from ASCE-PM and FAO56-PM models in Abadan (a) and Ahvaz (b) regions



شکل ۴ مقایسه مقادیر روزانه مولفه آیرودینامیک با مقادیر مجموع ۲۴ ساعته برآوردهای مولفه آیرودینامیک ساعتی حاصل از مدل‌های ASCE-PM و PM در مناطق آبادان (الف) و اهواز (ب)

Figure 4- Comparison of daily vs. 24h sum of hourly aerodynamic component of the reference evapotranspiration derived from ASCE-PM and FAO56-PM models in Abadan (a) and Alvaz (b) regions



شکل ۵ مقایسه مقادیر مجموع ۲۴ ساعته مولفه تشعشع تبخیر تعرق مرجع ساعتی حاصل از مدل‌های FAO56-PM ( $ET_0^{SOH,FAO56,rad}$ ) و ASCE-PM ( $ET_0^{SOH,ASCE,rad}$ ) در مناطق آبادان (الف) و اهواز (ب)

Figure 5- Comparison of the 24h sum of hourly radiation component of the reference evapotranspiration derived from ASCE-PM ( $ET_0^{SOH,ASCE,rad}$ ) and FAO56-PM ( $ET_0^{SOH,FAO56,rad}$ ) models in Abadan (a) and Alvaz (b) regions

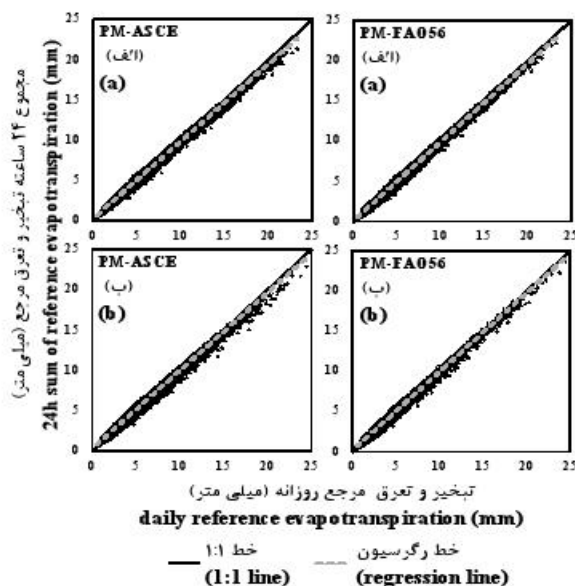
ثانیه بر متر در ساعات شب) موجب قابلیت کمتر این مدل در بازسازی نوسانات  $ET_0^{d,aero}$  در مقایسه با مدل FAO56-PM گردیده است که دلیل اصلی این امر مقدار انتخابی در این مدل برای پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در ساعات شب می‌باشد. به گونه‌ای که این امر سبب کاهش قابل توجه مقدار مولفه آیرودینامیک در طول ساعات شب و در نتیجه محدود شدن تغییرپذیری برآوردهای  $ET_0^{SOH,ASCE,aero}$  در مقایسه با برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56,aero}$  شده است. این امر منجر به ضریب تغییرات کمتر برآوردهای  $ET_0^{SOH,ASCE,aero}$  در مقایسه با

همچنین، پس عامل کم‌برآوردگری، در مورد مدل ASCE-PM، عامل عدم توانایی برآوردهای  $ET_0^{SOH,ASCE,aero}$  در بازسازی نوسانات  $ET_0^{d,aero}$  (آماره RNU بین ۲۹/۰۸۰ تا ۳۴/۶۱۹ درصد) و در مورد مدل FAO56-PM، عامل کمبود همبستگی بین برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56,aero}$  و مقادیر  $ET_0^{d,aero}$  (آماره RLC بین ۲۸/۱۲۷ تا ۳۲/۳۱۲ درصد) بیشترین سهم را در عدم انطباق کل داشته‌اند. بر این اساس، می‌توان گفت مقادیر اتخاذ شده برای پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در مدل ASCE-PM (۵۰ ثانیه بر متر در ساعات روز و ۲۰۰



۶ نیز قابل استنباط است. این امر بیانگر قابلیت تعمیم‌پذیری مناسب مدل‌های ریزمقیاس سازی منتخب در برآورد تبخیر-تعرق مرجع ساعتی در منطقه اهواز (مجموعه داده صحت‌یابی) نیز می‌باشد. بر اساس رتبه‌های ارزیابی ارائه شده در جدول ۱، در هر دو منطقه مورد مطالعه، در مقایسه با مقادیر  $ET_0^{SOH,ASCE}$ ، برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56}$  از انطباق بیشتری با مقادیر  $ET_0^d$  برخوردار بوده است. این نتیجه با نتیجه پژوهش‌های گذشته (۴، ۱۶، ۱۸) مطابقت دارد.

برآوردهای  $ET_0^{SOH,FAO56,metro}$  (به ترتیب، ۸۳/۷۷۵ و ۸۴/۴۵۰ درصد در آبادان و ۸۷/۰۳۴ و ۸۷/۷۰۳ درصد در اهواز) گردید. این نکته از شکل ۴ نیز قابل استنباط می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، این نارسایی در مدل ASCE-PM منجر به دوران بیشتر خط رگرسیون نسبت خط ۱:۱ در مقایسه با مدل FAO56-PM گردیده است. همچنین، مقادیر آماره EF ارائه شده در جدول ۱ حاکی از انطباق بسیار خوب هر دو برآورد  $ET_0^{SOH,FAO56}$  و  $ET_0^{SOH,ASCE}$  با مقادیر  $ET_0^d$  در هر دو منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این نکته از شکل



شکل ۶ مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق مرجع روزانه ( $ET_0^d$ ) با مقادیر مجموع ۲۴ ساعته برآوردهای تبخیر-تعرق مرجع ساعتی حاصل از مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM در مناطق آبادان (الف) و اهواز (ب)

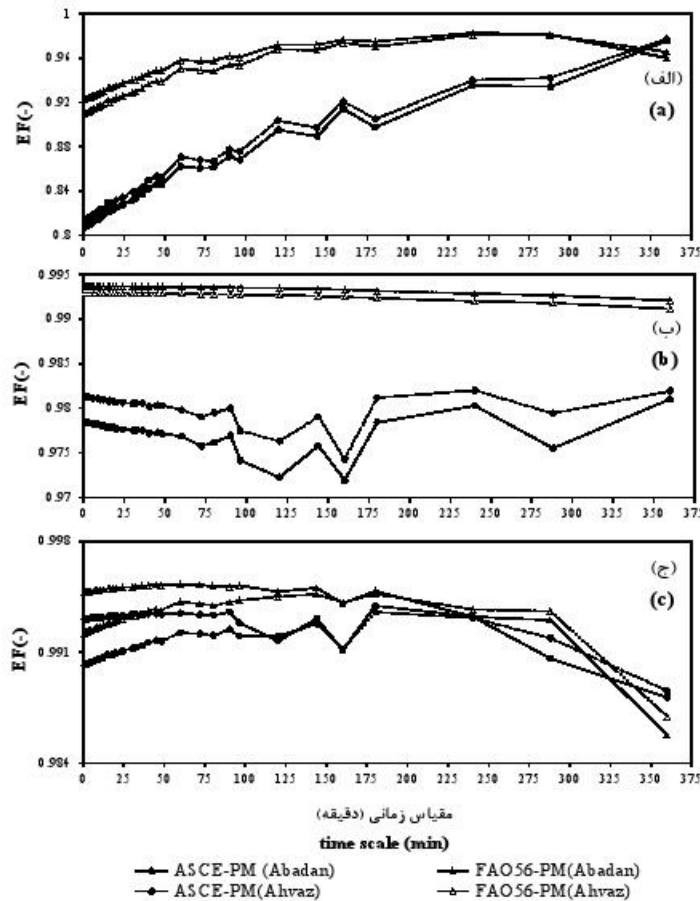
Figure 6- Comparison of daily vs. 24h sum of hourly reference evapotranspiration derived from ASCE-PM and FAO56-PM models in Abadan (a) and Ahvaz (b) regions

روزانه و مجموع ۲۴ ساعته مولفه تشعشع از یک روند افزایشی تبعیت نموده است. این در حالیست که مقادیر آماره EF حاصل از مقایسه مقادیر روزانه و مجموع ۲۴ ساعته مولفه آیرودینامیک در مورد برآوردهای مدل FAO56-PM از یک روند کم و بیش ثابت و در مورد مدل ASCE-PM تا مقیاس زمانی ۸۰ دقیقه دارای روندی کاهشی بوده و در مقیاس‌های زمانی بزرگتر از مقیاس زمانی یاد شده فاقد روندی مشخص می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷-ج مشاهده می‌شود، در اکثر مقیاس‌های زمانی مورد بررسی، مقادیر مجموع شبانه‌روزی تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه حاصل از مدل FAO56-PM از انطباق بیشتری با مقادیر روزانه تبخیر-تعرق مرجع برخوردار بوده است. همچنین، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، عملکرد هر دو مدل یاد شده در بازسازی مقادیر روزانه مولفه

ارزیابی عملکرد چارچوب توسعه یافته در برآورد تبخیر-تعرق مرجع در مقیاس‌های زمانی زیرروزانه دیگر: مقادیر آماره ضریب کارایی مدل حاصل از مقایسه مقادیر روزانه و مجموع شبانه‌روزی تبخیر-تعرق مرجع و مولفه‌های آیرودینامیک و تشعشع در برخی از گام‌های زمانی زیرروزانه در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۷-ج مشاهده می‌شود، در هر دو منطقه مطالعاتی و در همه مقیاس‌های زمانی مورد بررسی، برآوردهای مجموع شبانه‌روزی تبخیر-تعرق مرجع، از انطباق بسیار بالایی با مقادیر روزانه برخوردار بوده‌اند. همچنین، تغییرات مقادیر آماره EF در گام‌های زمانی مختلف در هر دو منطقه مطالعاتی از الگوی مشابهی پیروی نموده است. بر اساس این شکل می‌توان گفت که به‌طور کلی، با افزایش مقیاس زمانی، مقادیر آماره EF حاصل از مقایسه مقادیر

دارای عملکردی قابل قبول بود. بنابراین، می‌توان گفت یکی از دلایل انطباق بهتر مجموع شبانه‌روزی و مقادیر روزانه مولفه آیرودینامیک در مقایسه با مولفه تشعشع عملکرد بسیار خوب مدل ریزمقیاس‌سازی دمای هوا بوده است. این در حالیست که بر اساس شکل ۲، سرعت باد یکی از متغیرهای هواشناسی تاثیرگذار بر مولفه تشعشع بوده و همان‌طور که در مقاله نخست (۱۳) نشان داده شد، در مقایسه با سایر مدل‌های ریزمقیاس‌سازی مورد بررسی، مدل ریزمقیاس‌سازی سرعت باد دارای قابلیت کمتری در تبیین تغییرات زمانی متغیر فوق طی ساعات شبانه‌روز بود. لذا یکی از دلایل نارسایی برآوردهای مجموع شبانه‌روزی مولفه تشعشع در بازسازی مقادیر روزانه این مولفه را می‌توان به انتشار خطای ریزمقیاس‌سازی سرعت باد در محاسبه مولفه تشعشع نسبت داد.

آیرودینامیک بهتر از عملکرد آن‌ها در بازسازی مقادیر روزانه مولفه تشعشع بوده است. همان‌طور که در بخش نتایج آنالیز حساسیت نشان داده شد، مولفه آیرودینامیک، نسبت به دمای هوا (خصوصاً در فصول گرم سال که مقدار تبخیر-تعرق به حداکثر مقدار خود می‌رسد) و فشار بخار واقعی (خصوصاً در فصول سرد سال که مقدار تبخیر-تعرق به حداقل مقدار خود می‌رسد) دارای بیشترین حساسیت بوده و حساسیت سایر متغیرهای هواشناسی دیگر نسبت به متغیرهای یاد شده بسیار اندک بوده است. همان‌طور که در مقاله نخست (۱۳) نشان داده شد، ریزمقیاس‌سازی دمای هوا، در مقایسه با سایر متغیرهای هواشناسی مورد نیاز برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه با خطای کمتری ریزمقیاس‌سازی گردید و مدل ریزمقیاس‌سازی فشار بخار واقعی نیز



شکل ۷- مقایسه مقادیر روزانه و مجموع شبانه‌روزی مقادیر زیرروزانه مولفه‌های تشعشع (الف)، آیرودینامیک (ب) و تبخیر تعرق مرجع کل (ج) در گام‌های زمانی زیرروزانه مختلف مناطق آبادان و اهواز

Figure 7- Comparison of daily vs. 24h sum of subdaily radiation (a), aerodynamic (b) components and the reference evapotranspiration (c) derived from ASCE-PM and FAO56-PM models at different subdaily time scales in Abadan and Ahvaz regions

## نتیجه گیری کلی

شده در مدل های FAO56-PM و ASCE-PM برای تعیین واقع شدن هر بازه زمانی در ساعات شب و روز نسبت داد. چراکه در مقایسه با ساعات روز، رفتار برآوردگری مدل طی ساعات شب به طور جدی دستخوش تغییر گردیده و از طرف دیگر، زمان طلوع و غروب آفتاب عملاً دارای مقیاس زیرروزانه می باشد. به عبارت دیگر، بر اساس این معیار حتی در صورتی که در یک بازه زمانی خاص، تشعشع خورشیدی دارای مقداری بزرگتر از صفر باشد، تخصیص بازه زمانی فوق به ساعات واقع در طول روز، موقوف به برآورده شدن معیار لحاظ شده برای این منظور است و عکس این امر نیز برای تشخیص ساعات شب مصداق دارد. این امر می تواند تخصیص یک بازه زمانی خاص به ساعات واقع در طول روز یا شب و لذا هر دو برآورد مولفه تشعشع و آیرودینامیک را متأثر نماید. با این حال، از آنجا نتایج ارائه شده در این پژوهش متأثر از انتشار خطای ریزمقیاس سازی متغیرهای هواشناسی در محاسبات تبخیر-تعرق مرجع می باشد، لذا در این خصوص نمی توان قضاوتی قطعی ارائه نمود. بررسی بیشتر این موضوع، نیازمند انجام یک آزمایش محاسباتی است تا بدین طریق، اثرات اریب کننده ناشی از انتشار خطای ریزمقیاس سازی متغیرهای هواشناسی حذف گردد.

به طور کلی، نتایج این پژوهش حاکی از امیدبخش بودن عملکرد چارچوب توسعه یافته به منظور ریزمقیاس سازی داده های هواشناسی روزانه و برآورد تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از داده های هواشناسی ریزمقیاس سازی شده در مناطق مورد مطالعه بود. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، در هر دو منطقه مطالعاتی در طول فصول گرم سال که در آن ها تبخیر-تعرق به حداکثر مقدار خود می رسد، دمای هوا دارای بیشترین تأثیر بر تبخیر-تعرق برآورد شده خواهد بود. لذا، ریزمقیاس سازی بسیار رضایت بخش دمای هوا از دلایل اصلی عملکرد موفقیت آمیز چارچوب توسعه یافته در مناطق مطالعاتی که در مجاورت بسیاری از طرح های آبیاری و زهکشی، خصوصاً طرح های توسعه کشت نیشکر قرار دارند، بوده است. همچنین، نتایج صحت یابی مدل های واسنجی شده حاکی از آن است که مدل های ریزمقیاس سازی واسنجی شده می توانند با اعتمادپذیری بالایی در طرح های یاد شده که در مجاورت مناطق مطالعاتی قرار دارند، مورد استفاده قرار گیرند. همان طور که نشان داده شد به طور کلی، با افزایش گام زمانی، قابلیت مدل های FAO56-PM و ASCE-PM در بازسازی مقادیر روزانه تبخیر-تعرق مرجع کل فاقد روندی مشخص بود. دلیل اصلی این امر را می توان به معیار به نظر گرفته

## 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, FAO, Rome, Italy, 301 pp.
- Allen R.G., Pruitt W.O., Businger J.A., Fritschen L.J., Jensen M.E., and Quinn F.H. 1996. Evaporation and transpiration. In: Heggen R.J. (Ed.), ASCE Handbook of Hydrology. American Society of Civil Engineers, New York.
- Allen R.G., Walter I.A., Elliott R.L., Howell T.A., Itenfisu D., Jensen M.E., and Snyder R.L. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 192 pp.
- Bakhtari B., Khalili A., Liaghat A.M., and Khanjani M.J. 2009. Comparison of Daily with Sum-of-Hourly Reference Evapotranspiration in Kerman Reference Weather Station. Journal of Water and Soil, 23(1): 45-56. (in Persian with English abstract).
- Beven K.J. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. Journal of Hydrology, 44(3): 169-190.
- Blaney H.F., and Criddle W.D. 1950. Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data, US Department of Agriculture. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Paper No. 96.
- Gauch H.G., Hwang J.T., and Fick G.W. 2003. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. Agronomy Journal, 95(6): 1442-1446.
- Gong L., Xu C., Chen D., Halldin S., and Chen Y.D. 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. Journal of Hydrology, 329(3): 620-629.
- Guitjens J.C. 1982. Models of Alfalfa Yield and Evapotranspiration. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 108(IR3): 212-222.
- Harbeck J.G.E. 1962. A Practical Field Technique for Measuring Reservoir Evaporation Utilizing Mass-transfer Theory. US Geological Survey, Paper 272-E, pp. 101-105.
- Lopez-Urrea R., Olalla F., Fabeiro C., and Moratalla A. 2006. An evaluation of two hourly reference

- evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural water management*, 86(3): 277-282.
- 12- Parchami-Araghi F., Mirlatifi S.M., Ghorbani Dashtaki S., and Mahdian M.H. 2013. Point estimation of soil water infiltration process using Artificial Neural Networks for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 481: 35-47.
  - 13- Parchami-Araghi F., Mirlatifi S.M., Ghorbani Dashtaki S., Vazifehdoust M., and Sadeghi-Lari A. 2015. Development of a Disaggregation Framework toward the Estimation of Subdaily Reference Evapotranspiration: 1- Performance Comparison of Some Daily-to-subdaily Weather Data Disaggregation Models. *Journal of Water and Soil*, Accepted (in Persian with English abstract).
  - 14- Penman H.L. 1948. evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, 193: 120-145.
  - 15- Priestley C.H.B., and Taylor R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2): 81-92.
  - 16- Shirmohammadi Z., Ansari H., and Alizadeh A. 2011. A Comparison of ASCE and FAO-56 Reference Evapotranspiration for a Hourly Time Step in Fariman Weather Station. *Journal of Water and Soil*, 25(3): 472-484. (in Persian with English abstract).
  - 17- Steduto P., Todorovic M., Caliendo A., and Rubino P. 2003. Daily ETo estimates by the Penman-Monteith equation in southern Italy: Constant vs. variable canopy resistance. *Theoretical and Applied Climatology*, 74(3): 217-225.
  - 18- Suleiman A.A., and Hoogenboom G. 2009. A comparison of ASCE and FAO-56 reference evapotranspiration for a 15-min time step in humid climate conditions. *Journal of hydrology*, 375(3): 326-333.
  - 19- Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38: 55-94.
  - 20- Todorovic M. 1999. Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125(5): 235-245.
  - 21- Ventura F., Spano D., Duce P., and Snyder R.L. 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrigation Science*, 18(4): 163-170.
  - 22- Zeng W., and Heilman J.L. 1997. Sensitivity of evapotranspiration of cotton and sorghum in west Texas to changes in climate and CO<sub>2</sub>. *Theoretical and Applied Climatology*, 57(3-4): 245-254.



## Development of a Disaggregation Framework toward the Estimation of Subdaily Reference Evapotranspiration: 2- Estimation of Subdaily Reference Evapotranspiration Using Disaggregated Weather Data

F. Parchami Araghi<sup>1</sup>- S. M. Mirlatifi<sup>2\*</sup>- Sh. Ghorbani Dashtaki<sup>3</sup>- M. Vazifehdoust<sup>4</sup>- A. Sadeghi Lari<sup>5</sup>

Received: 28-01-2014

Accepted: 27-04-2015

**Introduction:** Subdaily estimates of reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) are needed in many applications such as dynamic agro-hydrological modeling. However, in many regions, the lack of subdaily weather data availability has hampered the efforts to quantify the subdaily  $ET_0$ . In the first presented paper, a physically based framework was developed to desegregate daily weather data needed for estimation of subdaily reference  $ET_0$ , including air temperature, wind speed, dew point, actual vapour pressure, relative humidity, and solar radiation. The main purpose of this study was to estimate the subdaily  $ET_0$  using disaggregated daily data derived from developed disaggregation framework in the first presented paper.

**Materials and Methods:** Subdaily  $ET_0$  estimates were made, using ASCE and FAO-56 Penman-Monteith models (ASCE-PM and FAO56-PM, respectively) and subdaily weather data derived from the developed daily-to-subdaily weather data disaggregation framework. To this end, long-term daily weather data got from Abadan (59 years) and Ahvaz (50 years) synoptic weather stations were collected. Sensitivity analysis of Penman-Monteith model to the different meteorological variables (including, daily air temperature, wind speed at 2 m height, actual vapor pressure, and solar radiation) was carried out, using partial derivatives of Penman-Monteith equation. The capability of the two models for retrieving the daily  $ET_0$  was evaluated, using root mean square error RMSE (mm), the mean error ME (mm), the mean absolute error ME (mm), Pearson correlation coefficient  $r$  (-), and Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient EF (-). Different contributions to the overall error were decomposed using a regression-based method.

**Results and Discussion:** The results of the sensitivity analysis showed that the daily air temperature and the actual vapor pressure are the most significant meteorological variables, which affect the  $ET_0$  estimates. In contrast, low sensitivity coefficients got for wind speed and the solar radiation. The similar patterns of  $ET_0$

sensitivity coefficient to the air temperature ( $S_{TA}^{ET_0^d}$ ) and the air temperature (TA) showed that the extent of the seasonal variation of  $S_{TA}^{ET_0^d}$  was mainly determined by the TA. Results showed a good agreement between daily and 24h sum of subdaily  $ET_0$  derived from ASCE-PM (with an EF of 0.990 to 0.994) and FAO56-PM (with an EF of 0.992 to 0.995) models. The results showed a good generalization capability of the disaggregation models to estimate the subdaily  $ET_0$  for the validation data set (Ahvaz). The 24h sum of subdaily  $ET_0$  derived from both models underestimated and overestimated the daily  $ET_0$  in calibration (Abadan) and validation (Ahvaz) data sets, respectively. In case of both models, the daily values of aerodynamic component of  $ET_0$  were reproduced more efficiently, compared to radiation part. In case of the FAO56-PM model, the goodness of agreement between 24h sum of subdaily and daily values of aerodynamic part of the  $ET_0$  showed a low sensitivity to variation of the time scale of weather data. With the increase of the time scale of the subdaily weather data, the ability of both models in retrieving the radiation component of the daily  $ET_0$  was improved. Generally, there was no apparent relationship between the efficiency of the ASCE-PM and FAO56-PM models for retrieving the daily  $ET_0$  and the time scale of weather data. Results showed that adoption of a smaller time step does not always leads to an improvement in the agreement between 24h sum of subdaily and daily values of  $ET_0$ . For most of the studied subdaily time scales (1 to 360 min), the FAO56-PM model had better performance in retrieving the daily  $ET_0$ .

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor Department of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran

(\*-Corresponding Author Email: mirlat\_m@modares.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

4- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Guilan University, Guilan, Iran

5- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

compared to the ASCE-PM model.

**Conclusion:** The results of this study showed that the developed disaggregation framework was able to estimate the subdaily  $ET_0$ . In this study, the promising results got in retrieving the daily  $ET_0$  can be attributed mainly to the high sensitivity of  $ET_0$  to the air temperature and actual vapor pressure (which were desegregated with a reasonable accuracy) and low sensitivity to the wind speed (which were desegregated with a low accuracy) and the solar radiation (which were disaggregated with a reasonable accuracy). The main reason for the absence of an apparent relationship apparent relationship between the efficiency of the ASCE-PM and FAO56-PM models for retrieving the daily  $ET_0$  and the time scale of weather data can be attributed to adopted nighttime and daytime criteria in both models which is highly affected by time-scale of weather data and the estimated net long wave radiation.

**Keywords:** Canopy Resistance, Penman-Monteith