



## مقایسه تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت ASCE و پنمن-مانتیت فائو-۵۶ در مقیاس‌های زمانی زیرروزانه مختلف: یک مطالعه عددی

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۰۷

### چکیده

در پژوهش حاضر، برآوردهای تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ ) حاصل از مدل‌های پنمن-مانتیت ASCE و فائو-۵۶ (به ترتیب، ASCE-PM و FAO56-PM) در مقیاس‌های زمانی زیرروزانه مختلف از طریق اجرای یک آزمایش محاسباتی مورد مقایسه قرار گرفت. داده‌های هواشناسی در مقیاس‌های زمانی روزانه و زیرروزانه مختلف (یک تا ۳۶۰ دقیقه) با استفاده از داده‌های روزانه بلندمدت ایستگاه سینوپتیک آبادان (۵۹ ساله) و یک چارچوب ریزمقیاس‌سازی اطلاعات هواشناسی تولید گردید. نتایج نشان داد در فصول گرم سال، مقادیر مجموع ۲۴ ساعته مولفه‌های تشعشع و آبرودینامیک و  $ET_0$  اشتقاق یافته از هر دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM از انطباق بهتری با مقادیر نظیر روزانه برخوردار بودند. عملکرد هر دو مدل در بازسازی مقادیر روزانه مولفه آبرودینامیک بهتر از عملکرد آنها در بازسازی مقادیر روزانه مولفه تشعشع بود. در مقایسه با مدل FAO56-PM، عملکرد مدل ASCE-PM در بازسازی مقادیر روزانه  $ET_0$  نسبت به نحوه محاسبه تشعشع خالص طول موج بلند ( $R_{nl}$ ) از حساسیت بیشتری برخوردار بود. نتایج نشان داد اتخاذ یک گام زمانی کوچکتر، لزوماً به بهبود انطباق مقادیر مجموع ۲۴ ساعته و مقادیر روزانه  $ET_0$  نمی‌انجامد. به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه در شرایط اقلیمی منطقه مطالعاتی، استفاده از مدل ASCE-PM بر اساس انتگرال مقادیر  $R_{nl}$  اشتقاقی از برآوردهای تشعشع خورشیدی در شرایط آسمان صاف ( $R_{so}$ ) حاصل از یک مدل فیزیکی-بینان برآورد تشعشع خورشیدی در بازه‌های زمانی یک ثانیه‌ای با میانگین ضریب کارایی مدل برابر با ۰/۹۹۷۰ نسبت به سایر گزینه‌های مورد بررسی ارجح می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ریزمقیاس‌سازی، تبخیر-تعرق، پنمن-مانتیت ASCE، پنمن-مانتیت فائو-۵۶

### مقدمه

زیرروزانه مورد نیاز به‌منظور برآورد مقادیر زیرروزانه  $ET_0$  را مرتفع نموده است. همچنین، پرچمی عراقی و همکاران (۱۴ و ۱۵) یک چارچوب ریزمقیاس‌سازی اطلاعات هواشناسی روزانه به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه در مقیاس‌های زمانی دلخواه را توسعه دادند که نتایج این پژوهش حاکی از انطباق بالای برآوردهای مجموع ۲۴ ساعته و روزانه  $ET_0$  (با ضریب کارایی مدل بین ۰/۹۹۰۲ تا ۰/۹۹۵۳) در مقیاس‌های زمانی مختلف (یک تا ۳۶۰ دقیقه) بود. مسلماً، در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، برآورد مقادیر زیرروزانه  $ET_0$  با اتخاذ مقیاس‌های زمانی هرچه کوچکتر، منجر به برآوردهای هرچه واقع‌بینانه‌تر از اجزای بیلان آب خواهد گردید. با این حال، یک مانع عمده در خصوص اتخاذ مقیاس‌های زمانی کوچک، محدودیت منابع محاسباتی می‌باشد. بنابراین، مقیاس زمانی مورد استفاده در برآورد مقادیر زیرروزانه  $ET_0$  باید با لحاظ کردن توازن بین دقت محاسبات و بودجه محاسباتی مورد نیاز انتخاب گردد. نکته‌ای که در این رابطه حایز اهمیت می‌باشد، آن است که به‌منظور حصول یکپارچگی در

در کاربردهای مختلفی چون مدل‌سازی پویای زراعی-هیدرولوژیکی، برآوردهای زیرروزانه تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ ) مورد نیاز می‌باشد. این امر خصوصاً در مورد مدل‌سازی ریچاردز-بنیان در شرایط اراضی فاریاب مناطق خشک و نیمه‌خشک و مجهز به سیستم‌های زهکشی، به دلیل تعدد رویدادهای آبیاری و تغییرات زمانی سریع اجزای بیلان آب در طول شبانه‌روز اهمیت بیشتری می‌یابد. چراکه گام زمانی اتخاذ شده در این دسته مدل‌ها، بسته به خطای قابل قبول محاسبات عددی، عملاً دارای مقیاس زیرروزانه می‌باشد. امروزه احداث ایستگاه‌های هواشناسی خودکار نیاز به اطلاعات هواشناسی

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

۳- استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

اختلاف بین آماره‌های فوق اظهار نظر نمود و متقابلاً، مطالعات صورت گرفته در ایستگاه‌های تحقیقاتی متنوع در ایالات متحده و اروپا حاکی از برتری برآوردهای  $ET_o^{h,ASCE-PM}$  نسبت به برآوردهای  $ET_o^{h,FAO56-PM}$  بوده است (۳ و ۱۰). همچنین، پژوهشگرانی چون شیرمحمدی و همکاران (۱۷) و سلیمان و هوگنوم (۱۹) به ترتیب، در مناطق فریمان، ایران (با اقلیم خشک) و جورجیا، ایالات متحده (با اقلیم مرطوب) با در نظر گرفتن مقادیر  $ET_o^d$  به‌عنوان معیار مقایسه، نشان دادند برآوردهای  $ET_o^{24h,FAO56-PM}$  به ترتیب، ۲/۶ و ۸ درصد و برآوردهای  $ET_o^{24h,ASCE-PM}$  به ترتیب، ۱۳ و ۱۷ درصد بیشتر از برآوردهای  $ET_o^d$  بودند. بر اساس این نتایج، این محققین، استفاده از برآوردهای  $ET_o^{h,FAO56-PM}$  را بر برآوردهای  $ET_o^{h,ASCE-PM}$  ارجح دانسته و استفاده از مدل FAO56-PM را برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع ساعتی توصیه نمودند. این نتیجه به‌طور ضمنی بر این موضوع دلالت دارد که مقدار پیشنهادی پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در مدل FAO56-PM مناسب‌تر از مقادیر پیشنهادی برای این پارامتر در مدل ASCE-PM می‌باشد. این در حالیست که نتایج مطالعات متعدد حاکی از آن است که در عمل و شرایط واقعی، اختیار مقادیر روزانه و شبانه به ترتیب، کمتر و بیشتر از مقدار ثابت ۷۰ ثانیه بر متر منجر به تبیین بهتر مقادیر زیرروزانه تبخیر-تعرق مرجع اندازه‌گیری شده خواهد انجامید (۲، ۱۸، ۲۱ و ۲۴). همچنین، ایرماک و همکاران (۹) نیز با استناد به این واقعیت و نظریه‌های برخی از پژوهشگران (۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۳) مبنی بر واقعی‌تر بودن برآوردهای مجموع ۲۴ ساعته تبخیر-تعرق مرجع در مقایسه با برآوردهای روزانه‌ی آن، برآوردهای  $ET_o^{h,ASCE-PM}$  را واقعی‌تر دانسته و از آن به‌عنوان معیار مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق ساعتی و روزانه حاصل از مدل‌های FAO56-PM و ASCE-PM استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد به‌جز در دو منطقه سانتاباربارا و سانتاروزا (با اقلیم مدیترانه‌ای) در سایر مناطق دیگر که دامنه‌ای از شرایط اقلیمی خشک تا مرطوب را پوشش می‌دادند، مقادیر  $ET_o^d$  بیشتر از مقادیر  $ET_o^{24h,ASCE-PM}$  برآورد گردیدند (به‌طور متوسط، بین یک تا نه درصد). در تمامی پژوهش‌های گذشته، در خصوص دلایل احتمالی تفاوت انطباق برآوردهای  $ET_o^{24h,ASCE-PM}$  و  $ET_o^{24h,FAO56-PM}$  با مقادیر  $ET_o^d$  تنها به این ذکر این حقیقت که این تفاوت ناشی از اختیار مقادیر متفاوت برای پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM می‌باشد، بسنده گردیده است. با توجه به این که تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده در هر دو مدل فوق متشکل از دو مولفه تشعشع و آیرودینامیک می‌باشد، به نظر می‌رسد به‌منظور دستیابی به پاسخی هرچه سراسرتر در این رابطه، مقایسه‌ی جداگانه مقادیر ساعتی و مجموع ۲۴ ساعته مولفه‌های آیرودینامیک و تشعشع حاصل از مدل‌های ASCE-PM (به ترتیب،  $ET_o^{h,ASCE-PM,aero}$ ،  $ET_o^{24h,ASCE-PM,rad}$  و  $ET_o^{h,ASCE-PM,rad}$ ) و

نتایج محاسبات حاصل از مقیاس‌های زمانی مختلف، روشی برای برآورد  $ET_o$  زیرروزانه به کار گرفته شود که برآوردهای حاصل از آن دارای کمترین حساسیت نسبت به مقیاس زمانی اتخاذ شده باشد. از بین انبوه روش‌های ارائه شده به‌منظور برآورد  $ET_o$ ، 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 جریان بخار آب مدل‌سازی می‌شود. به‌منظور 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-PM (ASCE-PM) ارائه گردیده است. در مدل FAO56-PM (۱)، سطح مرجع به‌عنوان یک 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 (۴) 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 زیرروزانه ارائه گردیده است. برای مقیاس 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 در مقیاس زمانی زیرروزانه تنها تفاوت این دو مدل، مقادیر انتخابی برای ترم مقاومت پوشش گیاهی می‌باشد. به‌گونه‌ای که در مدل ASCE-PM مقادیر این ترم در طول ساعات روز (ساعاتی که در آن‌ها  $R_n > 0$ ) و شب (ساعاتی که در آن‌ها  $R_n \leq 0$ ) به ترتیب، برابر با ۵۰ و ۲۰۰ ثانیه بر متر در نظر گرفته شده است. تا به حال مطالعات متعددی در زمینه مقایسه برآوردهای تبخیر-تعرق مرجع ساعتی و مجموع ۲۴ ساعته حاصل از دو مدل FAO56-PM (به ترتیب،  $ET_o^{h,FAO56-PM}$  و  $ET_o^{24h,FAO56-PM}$ ) و ASCE-PM (به ترتیب،  $ET_o^{h,ASCE-PM}$  و  $ET_o^{24h,ASCE-PM}$ ) با یکدیگر، داده‌های لایسیمتری و با تبخیر-تعرق برآورد شده از طریق ویرایش روزانه مدل‌های یاد شده ( $ET_o^d$ ) صورت گرفته است (۲، ۳، ۵، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۶، ۱۷، ۱۹). بررسی منابع از حصول نتایج متناقض در خصوص برتری برآوردهای  $ET_o^{h,FAO56-PM}$  و  $ET_o^{h,ASCE-PM}$  نسبت به یکدیگر حکایت دارد. در این رابطه، لوپز-اورا و همکاران (۱۱) طی انجام یک آزمایش لایسیمتری در منطقه آلباسته، اسپانیا، با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک نشان دادند برآوردهای  $ET_o^{h,FAO56-PM}$  و  $ET_o^{h,ASCE-PM}$  با ریشه میانگین مربعات خطایی به ترتیب، برابر با ۰/۰۷۹۶ و ۰/۰۸۷۸ میلی‌متر بر ساعت و ضریب همبستگی پیرسون به ترتیب، برابر با ۰/۹۲۶۶ و ۰/۹۱۹۳، مقادیر تبخیر-تعرق ساعتی اندازه‌گیری شده را برآورد نمودند. در این پژوهش، هیچ برآوردی از خطای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق ارائه نشده است تا بر اساس آن بتوان در خصوص میزان

مطالعاتی با متوسط درازمدت شاخص خشکی (۲۲) برابر با ۰/۰۶۶ در گروه مناطق با اقلیم خشک قرار می‌گیرد.

**محاسبه تبخیر-تعرق چمن مرجع:** تبخیر-تعرق مرجع روزانه و زیرروزانه با استفاده از مدل‌های FAO56-PM و ASCE-PM به-ترتیب، بر اساس دستورالعمل‌های ارائه شده توسط الن و همکاران (۱) و الن و همکاران (۴) محاسبه گردید. در مدل پنمن-مانتیت، نقش دو عامل موثر 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 تشکیل می‌گردد (۱). در پژوهش حاضر، مقدار تشعشع خالص طول موج بلند ( $R_{nl}$ ) از طریق اتخاذ شش رویکرد متفاوت محاسبه گردید. در رویکردهای اول و دوم، مقدار  $R_{nl}$  با استفاده از اطلاعات هواشناسی اشتقاق یافته برای هر مقیاس زمانی مورد بررسی و روابط استاندارد مورد استفاده در هر دو مدل FAO56-PM و ASCE-PM برای محاسبه ترم ابرناکی و تشعشع خورشیدی در شرایط آسمان صاف ( $R_{so}$ ) محاسبه شد (۱). در رویکردهای سوم و چهارم، مقادیر روزانه و زیرروزانه  $R_{so}$  از انتگرال برآوردهای مدل یانگ و همکاران (۲۵) برای  $R_{so}$  در مقیاس زمانی یک ثانیه اشتقاق یافت و متعاقباً، مقدار  $R_{nl}$  برای مقیاس‌های زمانی روزانه و زیرروزانه مورد بررسی از طریق روابط یاد شده محاسبه گردید. همچنین، در رویکردهای پنجم و ششم، مقدار  $R_{nl}$  برای مقیاس‌های زمانی روزانه و زیرروزانه مورد بررسی از طریق انتگرال‌گیری از برآوردهای  $R_{nl}$  اشتقاق یافته در مقیاس زمانی یک ثانیه و بر اساس برآوردهای مدل یانگ و همکاران (۲۵) برای  $R_{so}$  در مقیاس زمانی یک ثانیه محاسبه گردید. از سوی دیگر، به‌منظور تعیین ساعات شب و روز در رویکردهای اول، سوم و پنجم از معیارهایی مشابه با ویرایش استاندارد مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM در رویکردهای دوم، چهارم و ششم از معیار زمان طلوع و غروب خورشید استفاده شد. در متن حاضر، زیرنویس  $i$  در نمادهای  $(ASCE-PM)_i$  و  $(FAO56-PM)_i$  که  $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$  بیانگر رویکردهای اول تا ششم مورد استفاده در محاسبه  $R_{nl}$  می‌باشد.

**مقایسه برآوردهای مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM:** در پژوهش حاضر از مقادیر  $ET_o^{d,aero}$ ،  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$  به‌عنوان معیار مقایسه استفاده شد. به‌منظور ارزیابی و مقایسه میزان انطباق برآوردهای زیرروزانه و روزانه‌ی مولفه‌های تشعشع، آیرودینامیک و تبخیر-تعرق مرجع کل اشتقاق یافته از مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM مقادیر آماره‌های حداکثر قدر مطلق انحراف (MAD)، میانگین خطا (ME)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ ) و ضریب کارایی مدل (EF) محاسبه گردید (۱۳).

FAO56-PM (به ترتیب،  $ET_o^{h,FAO56-PM,aero}$ ،  $ET_o^{24h,FAO56-PM,rad}$  و  $ET_o^{24h,FAO56-PM,rad}$ ) با مقادیر روزانه مولفه‌های فوق (به ترتیب،  $ET_o^{d,aero}$  و  $ET_o^{d,rad}$ ) راهگشا تر از مقایسه صرف مجموع این مولفه‌ها با یکدیگر در مقیاس‌های زمانی مختلف باشد. از سوی دیگر، تاکنون مقایسه عملکرد دو مدل فوق به مقیاس‌های زمانی ساعتی و در مواردی انگشت‌شمار به مقیاس‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای محدود گردیده است که دلیل اصلی این امر، عدم دسترسی به اطلاعات هواشناسی با مقیاس زمانی کوچکتر و نیز هرچه بیشتر نمود یافتن اثر خطاهای آزمایشی بر نتایج محاسبات در مقیاس‌های زمانی فوق بوده است. به همین دلیل، تاکنون، میزان حساسیت برآوردهای این دو مدل نسبت به مقیاس زمانی اتخاذ شده مورد بررسی قرار نگرفته است. از اینرو، اجرای یک آزمایش محاسباتی و مقایسه عملکرد دو مدل فوق با استفاده از اطلاعات هواشناسی تولید شده در مقیاس‌های زمانی مختلف راهگشا خواهد بود. در این رابطه، یک چارچوب ریزمقیاس سازی متغیرهای هواشناسی مورد نیاز به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع در مقیاس‌های زمانی زیرروزانه مختلف توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۴ و ۱۵) توسعه یافت. هدف از پژوهش حاضر، مقایسه تفصیلی تر برآوردهای  $ET_o^{24h,ASCE-PM}$  و  $ET_o^{24h,FAO56-PM}$  با مقادیر  $ET_o^d$  در مقیاس‌های زمانی مختلف (یک تا ۳۶۰ دقیقه) از طریق اجرای یک آزمایش محاسباتی با استفاده از اطلاعات هواشناسی زیرروزانه اشتقاق یافته از چارچوب یاد شده بوده است.

## مواد و روش‌ها

داده‌های هواشناسی در مقیاس‌های زمانی روزانه و زیرروزانه مختلف (یک تا ۳۶۰ دقیقه) با استفاده از داده‌های روزانه بلندمدت (۵۹ ساله) ایستگاه سینوپتیک آبادان با مختصات جغرافیایی  $30^{\circ}22'$  شمالی و  $48^{\circ}15'$  شرقی و ارتفاع ۶/۶ متر از سطح دریا و چارچوب ریزمقیاس‌سازی توسعه یافته توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۴) تولید گردید. در پژوهش یاد شده مقادیر روزانه فشار بخار واقعی و سرعت باد با استفاده از مدل گرین و کوزک (۸)، دمای هوا با استفاده از مدل TM (۶) با ضریب کارایی مدل به ترتیب، برابر با ۰/۹۹۲۱، ۰/۹۹۹۸، ۰/۹۹۳۷ بازسازی شد. همچنین، مقادیر روزانه تشعشع خورشیدی با استفاده از مدل فیزیکی-بنیان یانگ و همکاران (۲۵) با ضریب کارایی مدل برابر با ۰/۹۷۷۸ بازسازی گردید. در پژوهش حاضر، مقادیر متغیرهای هواشناسی در هریک از مقیاس‌های زمانی مورد بررسی (مقیاس زمانی روزانه و مقیاس‌های زمانی زیرروزانه یک تا ۳۶۰ دقیقه) بر اساس مقادیر زیرروزانه اشتقاق یافته برای مقیاس زمانی یک ثانیه تولید شد. مقادیر آماره‌های توصیفی متغیرهای هواشناسی در منطقه مطالعاتی در جدول ۱ ارائه گردیده است. منطقه

جدول ۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای هواشناسی در منطقه مطالعاتی

Table 1- Descriptive statistics of the meteorological variables in the study area

آماره‌های توصیفی (Descriptive statistics)	سرعت باد (متر بر ثانیه) (Wind speed (m s <sup>-1</sup> ))	دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد) (Minimum temperature (°C))	دمای حداکثر (درجه سانتی‌گراد) (Maximum temperature (°C))	بارندگی (میلی‌متر) (Precipitation (mm))	فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال) (Actual vapour pressure (kpa))	تشعشع خورشیدی (مگاژول بر متر مربع) (Solar radiation (MJm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ))	تبخیر از تشت (میلی‌متر بر روز) (Pan evaporation (mmd <sup>-1</sup> ))
حداقل (Minimum)	0.50	-4.00	6.00	0.00	0.29	3.15	0.00
حداکثر (Maximum)	15.43	43.40	53.00	86.00	4.50	28.83	44.10
میانگین (Mean)	3.29	14.48	32.40	0.42	1.30	18.37	10.81
ضریب تغییرات (درصد) (Coefficient of variation (%))	62.54	43.86	32.30	627.00	36.30	34.79	68.11

انحراف معیار آماره ریشه میانگین مربعات خطا (SDRMSE) و میانگین ضریب همبستگی پیرسون (MPearson)، رتبه‌ای به هریک از مدل‌های مورد بررسی داده شد که میانگین این رتبه‌ها، به‌عنوان رتبه‌ی نهایی هریک از مدل‌ها در نظر گرفته شد (۱۳). همین‌طور، به‌منظور مقایسه عملکرد رویکردهای مختلف برآورد  $R_{nl}$  به کار گرفته شده در هریک از مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM بازسازی مقادیر  $ET_o^{d,aero}$ ،  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$  از آماره‌های میانگین و انحراف معیار ضریب کارایی مدل (به‌ترتیب، MEF و SDEF) استفاده گردید.

## نتایج و بحث

**مقایسه برآوردهای زیرروزانه مدل‌های (ASCE-PM)<sub>1</sub> و (FAO56-PM)<sub>1</sub>:** به‌عنوان نمونه، الگوی تغییرات زمانی برآوردهای ساعتی مولفه‌های تشعشع و آیرودینامیک و تبخیر-تعرق مرجع اشتقاق یافته از مدل‌های (ASCE-PM)<sub>1</sub> و (FAO56-PM)<sub>1</sub> برای یک روز کوتاه (یکم دی ماه) و طولانی (یکم تیر ماه) سال ۱۳۸۷ در منطقه آبادان در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در هر دو روز یاد شده، میزان برآوردهای  $ET_o^{h,(ASCE-PM)1,aero}$ ،  $ET_o^{h,(ASCE-PM)1,rad}$  و  $ET_o^{h,(ASCE-PM)1}$  در طول ساعات روز و شب به‌ترتیب، همواره بزرگتر و کوچکتر از نظیر برآوردهای فوق توسط مدل (FAO56-PM)<sub>1</sub> می‌باشد که دلیل آن به‌ترتیب، کمتر و بیشتر بودن مقدار پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در مدل (ASCE-PM)<sub>1</sub> در مقایسه با مدل (FAO56-PM)<sub>1</sub> به‌ترتیب، در ساعات روز و شب می‌باشد. همچنین، با توجه به شکل ۱-ج و بر اساس مقادیر نسبت  $ET_o^{h,(ASCE-PM)1} / ET_o^{h,(FAO56-PM)1}$  می‌توان گفت در مقایسه با روز کوتاه (که در فصل سرد سال واقع شده است)، برآوردهای دو مدل (ASCE-PM)<sub>1</sub> و (FAO56-PM)<sub>1</sub> در روز

همچنین، سهم هریک از منابع عدم انطباق مقادیر معیار شده و برآورد شده با استفاده از روش جزءبندی آماره میانگین مربعات خطا (MSE) به‌شرح زیر تعیین گردید (۷):

$$RSB = 100 \frac{\left( \sum_{j=1}^n (P_j - O_j) \right)^2}{MSE} \quad (۱)$$

$$RNU = 100 \frac{(1 - b^2) \left( \sum_{j=1}^n (O_j - \bar{O})^2 / n \right)}{MSE} \quad (۲)$$

$$RLC = 100 \frac{(1 - r^2) \left( \sum_{j=1}^n (P_j - \bar{P})^2 / n \right)}{MSE} \quad (۳)$$

که در آن‌ها:  $O$ : مقدار اندازه‌گیری شده،  $P$ : مقدار برآورد شده،  $\bar{O}$ : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده،  $\bar{P}$ : میانگین مقادیر برآورد شده،  $n$ : تعداد مقایسه‌ها،  $b$ : شیب خط رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده،  $RSB$ : درصدی از  $MSE$  که ناشی از انتقال خط رگرسیون به بالا یا پایین خط گراف ۱:۱ می‌باشد،  $RNU$ : درصدی از  $MSE$  که ناشی از دوران خط رگرسیون نسبت به خط گراف ۱:۱ می‌باشد،  $RLC$ : درصدی از  $MSE$  که ناشی از کمبود همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده می‌باشد. بدیهی است که  $RSB + RNU + RLC =$

به‌منظور سهولت مقایسه عملکرد مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM در بازسازی مقادیر  $ET_o^{d,aero}$ ،  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$  متوسط آماره‌های ارزیابی فوق برای مقیاس‌های زمانی مورد بررسی محاسبه گردید. بر این اساس، با توجه به آماره‌های میانگین حداکثر قدر مطلق انحراف (MMAD)، میانگین قدرمطلق میانگین خطا (MAME)، میانگین ریشه میانگین مربعات خطا (MRMSE)،

مجموع ۲۴ ساعته به مقدار روزانه تشعشع خالص خورشیدی  $(R_n^{24h}/R_n^d)$  و تفاضل تشعشع خالص خورشیدی و شار حرارتی خاک  $(R_n^{24h}/(R_n-G)^d)$  در مقیاس زمانی یک و ۶۰ دقیقه به ترتیب، در شکل های ۴-الف و ۴-ب نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، نسبت  $(R_n^{24h}/(R_n-G)^d)$  از الگوی تغییراتی مشابه با نسبت مجموع ۲۴ ساعته به مقدار روزانه مولفه تشعشع (شکل ۴-الف) برخوردار است. به گونه ای که این نسبت نیز در روزهای تابستان به مقدار یک نزدیک شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، مقادیر نسبت  $(R_n^{24h}/(R_n-G)^d)$  در ایام گرم و سرد سال به ترتیب، کمتر و بیشتر از مقادیر نسبت  $R_n^{24h}/R_n^d$  می باشد. دلیل این امر، نقش ترم شار حرارتی خاک به-عنوان یک منبع تامین کننده انرژی در ایام سرد و یک مصرف کننده انرژی در ایام گرم سال است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، در مقایسه با مقیاس زمانی یک دقیقه، مقادیر نسبت های  $R_n^{24h}/R_n^d$  و  $(R_n^{24h}/(R_n-G)^d)$  در مقیاس زمانی ۶۰ دقیقه دارای نوسانات ناگهانی (در روزهای ژوئیه ۷۲، ۱۲۱، ۲۰۸ و ۳۰۴) می باشد. به گونه ای که این امر منجر به تفاوت قابل توجه الگوی تغییرات نسبت های فوق در مقیاس های زمانی یک و ۶۰ دقیقه گردیده است. دلیل این امر ناشی از اثر مقیاس زمانی اتخاذ شده در تعیین وقوع هر یک از گام های زمانی محاسباتی در ساعات روز یا شب (شکل ۵) و لذا تشعشع خالص محاسبه شده می باشد که به نوبه خود، الگوی تغییرات مقادیر محاسبه شده  $R_n^{24h}$ ،  $ET_o^{24h,rad}$  (شکل ۴-الف) و لذا  $ET_o^{24h}$  (شکل ۴-ج) را متاثر نموده است. اما همان طور که در شکل ۴-ب مشاهده می شود، این امر الگوی تغییرات  $ET_o^{24h,aero}$  به-طور قابل توجهی متاثر ننموده است. چراکه بر خلاف مولفه آیرودینامیک، مقدار مولفه تشعشع مستقیماً بر اساس مقدار تشعشع خالص محاسبه می شود.

**مقایسه برآوردهای روزانه مولفه تشعشع و تبخیر-تعرق مرجع روزانه حاصل از رویکردهای مختلف برآورد تشعشع خالص طول موج بلند: رویکردهای سوم تا ششم برآورد  $R_{nl}$  منجر به حصول برآوردهای متفاوتی برای  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$ ، در مقایسه با رویکرد استاندارد برآورد  $R_{nl}$  می گردد. مقادیر آماره های ارزیابی به-منظور بررسی میزان انطباق برآوردهای  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$  حاصل از رویکردهای سوم تا ششم برآورد  $R_{nl}$  با برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از رویکرد استاندارد برآورد  $R_{nl}$  در جدول ۲ ارائه گردیده است. همان طور که جدول ۲ ملاحظه می شود، برآوردهای  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$  اشتقاق یافته از رویکردهای سوم تا ششم برآورد  $R_{nl}$  به ترتیب، از بیشترین انطباق با برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از رویکرد استاندارد برآورد  $R_{nl}$  برخوردار بوده اند. همچنین، مقایسه آماره های ME و MAE حاکی از آن است که مقادیر  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$  اشتقاق یافته از**

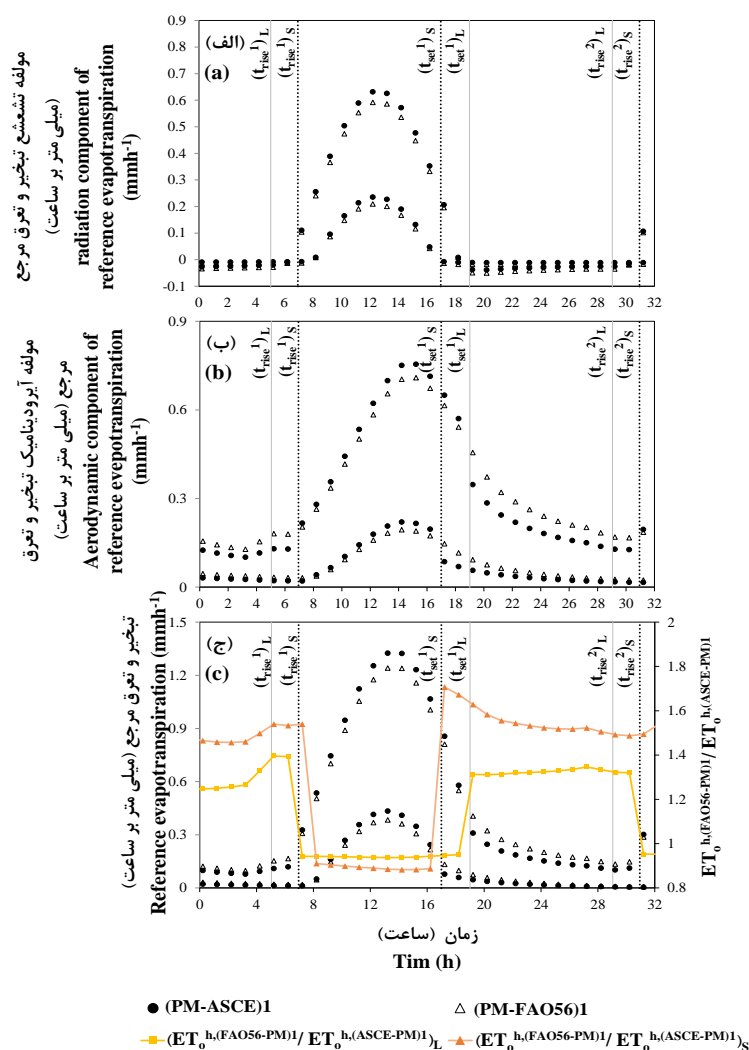
طولانی (که در فصل گرم سال واقع شده است) از انطباق بیشتری با یکدیگر برخوردار بوده اند. این نکته از شکل ۲ نیز قابل استنباط می-باشد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در مقایسه با مولفه آیرودینامیک، اختلاف برآوردهای این دو مدل برای مولفه تشعشع از تغییرپذیری بیشتری در طول ایام سال برخوردار بوده است. همچنین، به طور کلی، در ایام گرم سال، انطباق برآوردهای هر دو مدل برای مولفه های تشعشع و آیرودینامیک و تبخیر-تعرق مرجع بهبود یافته است و در این ایام، مقدار کسر مولفه آیرودینامیک به حداکثر مقدار خود رسیده است (شکل ۲-د). همچنین، در تمامی ایام سال، در مقایسه با مدل  $(ASCE-PM)_1$ ، مقادیر مجموع ۲۴ ساعته مولفه های تشعشع، آیرودینامیک و تبخیر-تعرق مرجع اشتقاق یافته از مدل  $(FAO56-PM)_1$  از انطباق بیشتری با مقادیر نظیر روزانه برخوردار بوده اند.

مقادیر نسبت  $ET_o^{h,(FAO56-PM)_1}/ET_o^{h,(ASCE-PM)_1}$  به عنوان تابعی از فشار بخار واقعی، دمای هوا، سرعت باد و تشعشع خورشیدی در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، سرعت باد از یک همبستگی بسیار بالا با نسبت  $ET_o^{h,(FAO56-PM)_1}/ET_o^{h,(ASCE-PM)_1}$  در ساعات روز و شب برخوردار بوده است. به گونه ای که افزایش سرعت باد در ساعات روز و شب به ترتیب، موجب کاهش نسبت فوق (به کمتر از یک) و افزایش آن (به بیشتر یک) گردیده است. بنابراین، می توان گفت که افزایش سرعت باد در ساعات روز و شب موجب افزایش اختلاف برآوردهای  $ET_o^{h,(FAO56-PM)_1}$  و  $ET_o^{h,(ASCE-PM)_1}$  می گردد. این نتیجه توسط سلیمان و هوگنوم (۱۹) نیز گزارش گردیده است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، به طور کلی، افزایش دمای هوا و فشار بخار واقعی موجب بهبود انطباق برآوردهای  $ET_o^{h,(FAO56-PM)_1}$  و  $ET_o^{h,(ASCE-PM)_1}$  گردیده است. همچنین، بر اساس شکل ۳-ج در برخی از ساعات شبانه روز، با وجود یک مقدار غیر صفر برای تشعشع خورشیدی، این ساعات به عنوان ساعات شب و بالعکس، ساعاتی با تشعشع خورشیدی صفر، به عنوان ساعات روز در نظر گرفته شده اند. دلیل این امر ناشی از معیار در نظر گرفته شده در مدل های  $(FAO56-PM)_1$  و  $(ASCE-PM)_1$  برای تعیین واقع شدن هر بازه زمانی در ساعات شب یا روز در محاسبات تابع ابرناکی (مقدار آستانه زاویه خورشیدی برابر با  $0/3$  رادیان) می باشد. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، در ساعات شب، نسبت  $ET_o^{h,(FAO56-PM)_1}/ET_o^{h,(ASCE-PM)_1}$  با افزایش تشعشع خورشیدی دارای روندی کاهشی بوده است.

**مقایسه برآوردهای روزانه و مجموع ۲۴ ساعته تشعشع خالص خورشیدی برآورد شده از طریق رویکرد نخست برآورد تشعشع طول موج بلند خالص: مقادیر متوسط درازمدت نسبت**

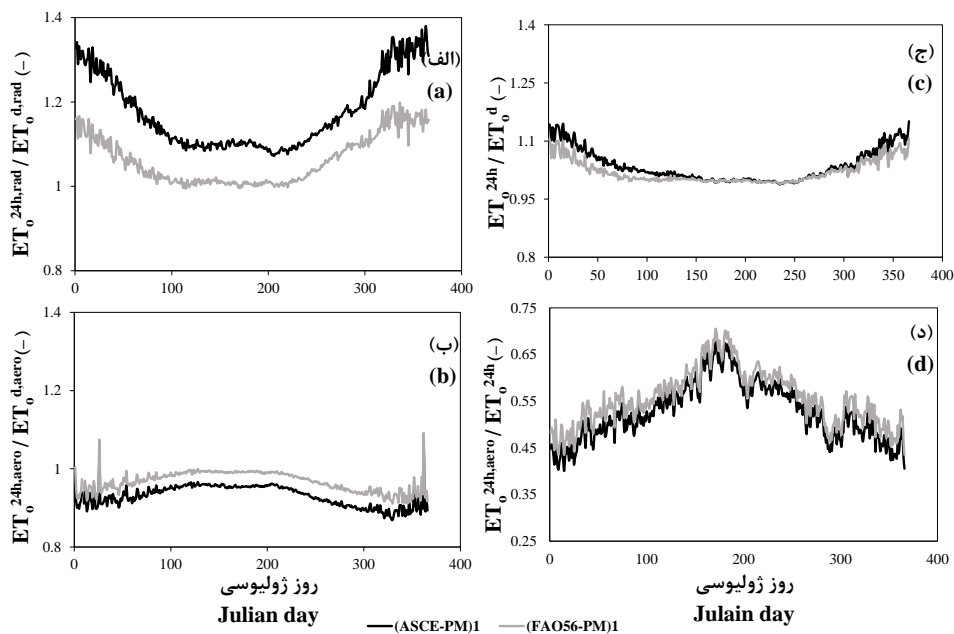
بیش برآورد شدن غیرسیستماتیک برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از رویکرد استاندارد برآورد  $R_{nl}$  گردیده و بر اساس آماره RLC می‌توان گفت بخش اعظم عدم انطباق کل برآوردهای فوق (۴۴/۴۸۴۶) تا (۶۵/۱۵۴۱) درصد) ناشی از کمبود همبستگی بین آنها بوده است.

رویکردهای سوم و چهارم برآورد  $R_{nl}$  به‌طور سیستماتیک کمتر از برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از رویکرد استاندارد بوده و بر اساس آماره RSB می‌توان گفت که بخش اعظم (۸۸/۶۹۴۱) درصد) عدم انطباق کل برآوردهای فوق (که آماره MSE بیانگر آن می‌باشد) ناشی از این کم‌برآوردگری می‌باشد. این در حالیست که مقادیر  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$  اشتقاق یافته از رویکردهای پنجم و ششم برآورد  $R_{nl}$  منجر به



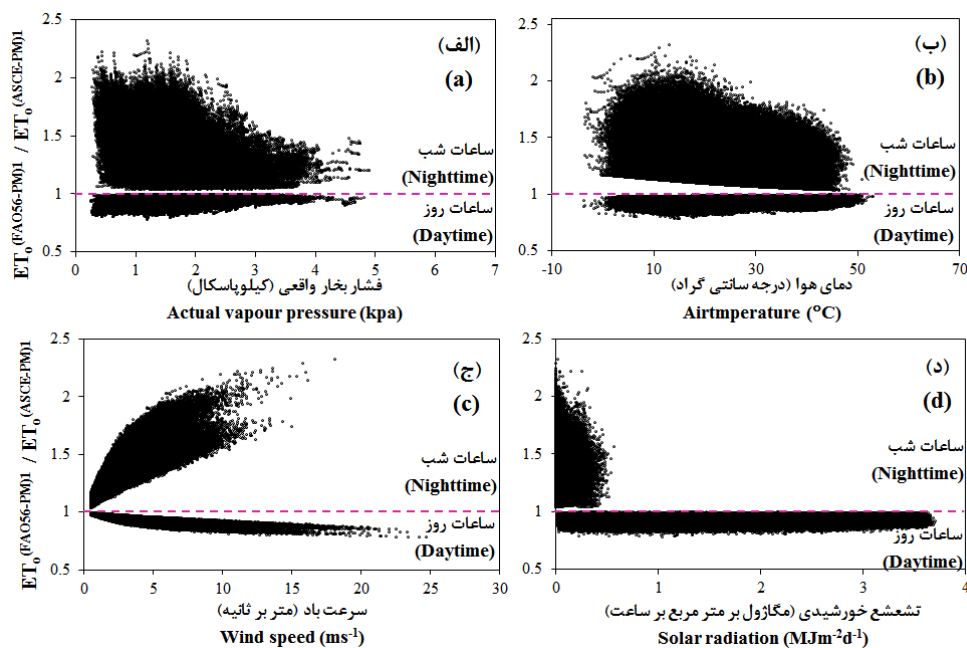
شکل ۱- الگوی تغییرات زمانی برآوردهای مولفه‌های تشعشع (الف)، آیرودینامیک (ب) و تبخیر-تعرق مرجع ساعتی اشتقاق یافته از مدل‌های  $(FAO56-PM)_1$  و  $(ASCE-PM)_1$  و نسبت  $ET_o^{h,(FAO56-PM)1} / ET_o^{h,(ASCE-PM)1}$  (ج) برای یک روز کوتاه (یکم دی ماه) و طولانی (یکم تیر ماه) سال ۱۳۸۷ در منطقه آبادان. در این شکل،  $t_{rise}^1$ ،  $t_{set}^1$ ،  $t_{rise}^2$  و  $t_{set}^2$  به ترتیب، بیانگر زمان طلوع و غروب خورشید در روز فعلی و زمان طلوع خورشید در روز بعد (ساعت) و زیرنویس‌های L و S به ترتیب، بیانگر روز کوتاه و روز طولانی می‌باشند.

Figure 1- Temporal pattern of hourly radiation (a) and aerodynamic (b) components and reference evapotranspiration (c) estimates derived from  $(FAO56-PM)_1$  and  $(ASCE-PM)_1$  models and  $ET_o^{h,(FAO56-PM)1} / ET_o^{h,(ASCE-PM)1}$  ratio (c) for a short (December 21, 2008) and long (June 21, 2008) day in Abadan region. In this figure,  $t_{rise}^1$ ,  $t_{set}^1$  and  $t_{rise}^2$  represent sunrise and sunset at current day and the sunrise at following day (hour), respectively. Subscripts L and S represent the short and long days, respectively.



شکل ۲- متوسط درازمدت نسبت‌های مجموع ۲۴ ساعته به مقدار روزانه مولفه‌های تشعشع  $(ET_0^{24h,rad} / ET_0^{d,rad})$ ، آیرودینامیک  $(ET_0^{24h,aero} / ET_0^{d,aero})$ ، تبخیر-تعرق مرجع  $(ET_0^{24h} / ET_0^d)$  و کسر مولفه آیرودینامیک  $(ET_0^{24h,aero} / ET_0^{24h})$  حاصل از مدل‌های  $(ASCE-PM)_1$  و  $(FAO56-PM)_1$  در  $(PM)_1$  مقیاس زمانی ساعتی (به ترتیب، الف، ب، ج و د)

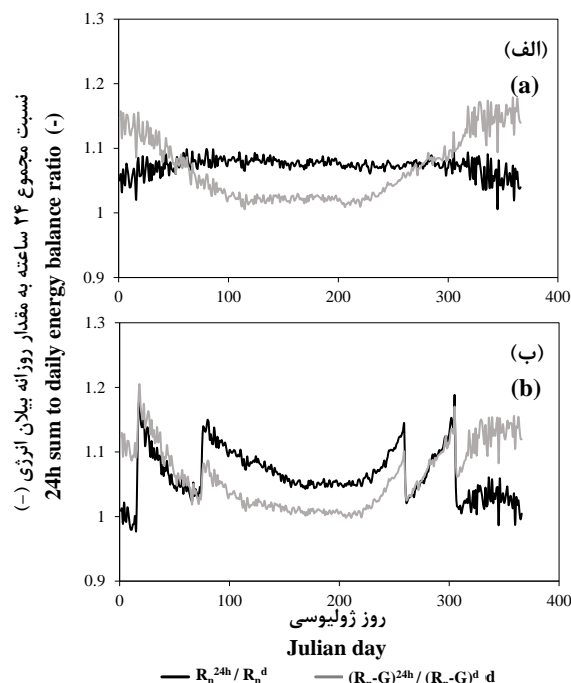
Figure 2- Long term average of the ratios of 24h sum to daily radiation  $(ET_0^{24h,rad} / ET_0^{d,rad})$ , aerodynamic  $(ET_0^{24h,aero} / ET_0^{d,aero})$  components and reference evapotranspiration  $(ET_0^{24h} / ET_0^d)$  and the aerodynamic component fraction  $(ET_0^{24h,aero} / ET_0^{24h})$  derived from  $(ASCE-PM)_1$  and  $(FAO56-PM)_1$  models at hourly time scale (a, b, c, and d, respectively)



شکل ۳- نسبت تبخیر-تعرق مرجع ساعتی مدل  $(FAO56-PM)_1$  به تبخیر-تعرق مرجع ساعتی مدل  $(ASCE-PM)_1$   $(ET_0^h(FAO56-PM)_1 / ET_0^h(ASCE-PM)_1)$  vs.

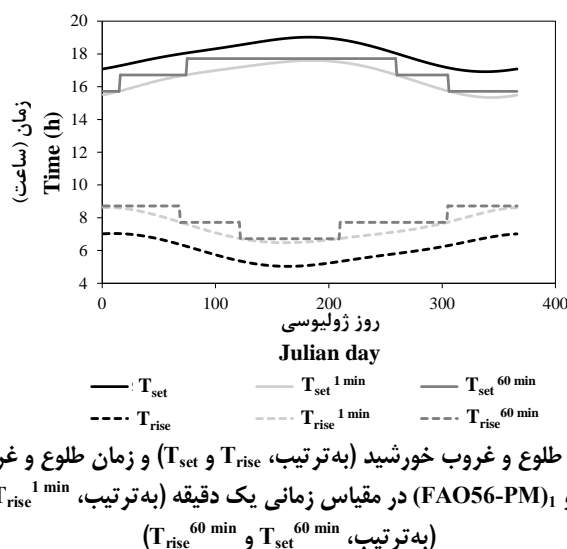
به‌عنوان تابعی از فشار بخار واقعی (الف)، دمای هوا (ب)، سرعت باد (ج) و تشعشع خورشیدی (د)

Figure 3- The ratio of  $(FAO56-PM)_1$  to  $(ASCE-PM)_1$  hourly reference evapotranspiration  $(ET_0^h(FAO56-PM)_1 / ET_0^h(ASCE-PM)_1)$  vs. actual vapour pressure (a), air temperature (b), wind speed (c), and solar radiation (d)



شکل ۴- متوسط درازمدت نسبت مجموع ۲۴ ساعته به مقدار روزانه تشعشع خالص خورشیدی و تفاضل تشعشع خالص خورشیدی و شار گرمایی خاک  $((R_n-G)^{24h} / (R_n-G)^d)$  در مقیاس زمانی یک (الف) و ۶۰ دقیقه (ب)

Figure 4- The long term average of the ratio of 24h sum to daily net radiation  $(R_n^{24h} / R_n^d)$  and the difference between net radiation and soil heat flux  $((R_n-G)^{24h} / (R_n-G)^d)$  at 1-minute (a) and hourly (b) time scales



شکل ۵- تغییرات مقادیر واقعی زمان طلوع و غروب خورشید (به ترتیب،  $T_{rise}$  و  $T_{set}$ ) و زمان طلوع و غروب خورشید محاسبه شده از طریق مدل های  $(ASCE-PM)_1$  و  $(FAO56-PM)_1$  در مقیاس زمانی یک دقیقه (به ترتیب،  $T_{rise}^{1min}$  و  $T_{set}^{1min}$ ) و ۶۰ دقیقه (به ترتیب،  $T_{rise}^{60min}$  و  $T_{set}^{60min}$ )

Figure 5- The variation of actual ( $T_{rise}$  and  $T_{set}$ , respectively) and calculated time of sunrise and sunset through  $(ASCE-PM)_1$  and  $(FAO56-PM)_1$  models at 1-minute ( $T_{rise}^{1min}$  and  $T_{set}^{1min}$ , respectively) and hourly ( $T_{rise}^{60min}$  and  $T_{set}^{60min}$ , respectively) time scales

گردیده است. مقادیر آماره های MME و MAME حاکی از آن است که هر شش ویرایش مدل های  $ASCE-PM$  و  $FAO56-PM$  مقادیر  $ET_o^{d,aero}$  و  $ET_o^{d,rad}$  را در تمامی مقیاس های زمانی مورد بررسی (به جز در مورد مدل های  $(FAO56-PM)_5$  و  $(FAO56-PM)_6$ ) به- ترتیب، بیش برآورد و کم برآورد نموده اند.

مقایسه برآوردهای روزانه و مجموع ۲۴ ساعته مدل های  $ASCE-PM$  و  $FAO56-PM$ : مقادیر آماره های ارزیابی مورد استفاده به منظور مقایسه عملکرد مدل های  $ASCE-PM$  و  $FAO56-PM$  در بازسازی مقادیر  $ET_o^{d,aero}$ ،  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$  با استفاده از شش رویکرد برآورد  $R_{nl}$  در مقیاس های زمانی مختلف در جدول ۳ ارائه



جدول ۲- مقایسه برآوردهای روزانه مولفه تشعشع و تبخیر-تعرق مرجع روزانه حاصل از رویکرد استاندارد برآورد  $R_{nl}$  (رویکردهای اول و دوم) با رویکردهای سوم تا ششم برآورد تشعشع خالص طول موج بلند<sup>(\*)</sup>

Table 2- Comparison of daily estimates of the radiation component and the reference evapotranspiration derived through the standard  $R_{nl}$  estimation approach (1st and 2nd approaches) with the estimates derived from 3rd to 6th approaches<sup>(\*)</sup>.

رویکرد برآورد $R_{nl}$ ( $R_{nl}$ Estimation approach)	آماره‌های ارزیابی (Evaluation statistics)										رتبه نهایی (Final rank)	
	MAD (mm)	ME (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)	r (-)	EF (-)	MSE (mm <sup>2</sup> )	RSB (%)	RNU (%)	RLC (%)		
مولفه تشعشع	3, 4	0.3136(1)	-0.1479	0.1479(1)	0.1571(1)	0.9992(1)	0.9852	0.0247	88.6941	0.0162	11.2897	1
روزانه (میلی‌متر) (Radiation component (mm))	5	0.7171(2)	0.0800	0.1679(2)	0.2087(2)	0.9932(2)	0.9739	0.0436	14.7031	23.7173	61.5796	2
	6	1.2791(3)	0.2621	0.4302(3)	0.4822(3)	0.9788(3)	0.8608	0.2325	29.5496	25.9658	44.4846	3
تبخیر-تعرق مرجع	3, 4	0.3136(1)	-0.1479	0.1479(1)	0.1571(1)	0.9999(1)	0.9986	0.0247	88.6941	1.3199	9.9860	1
روزانه (میلی‌متر) (Daily reference evapotranspiration (mm))	5	0.7171(2)	0.0800	0.1679(2)	0.2087(2)	0.9993(2)	0.9976	0.0436	14.7031	20.1429	65.1541	2
	6	1.2791(3)	0.2621	0.4301(3)	0.4822(3)	0.9967(3)	0.9872	0.2325	29.5596	13.9186	56.5218	3

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

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

برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از مدل FAO56-PM فزونی دارد. 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 و از آنجا که در طول ساعات روز، مقدار این پارامتر در مدل FAO56-PM (۷۰ ثانیه بر متر) بیشتر از مدل ASCE-PM (۵۰ ثانیه 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  $ET_o^{24h,rad}$  اشتقاقی از مدل FAO56-PM همواره کمتر از برآوردهای نظیر اشتقاقی از مدل ASCE-PM خواهند بود. چراکه میزان 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 برآوردهای  $ET_o^{24h,rad}$  اشتقاقی از این دو مدل نخواهد بود. همچنین، مقادیر آماره MRNU حاکی از آن است که برآوردهای  $ET_o^{24h,aero}$  اشتقاقی یافته از مدل ASCE-PM در مقایسه با برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از مدل FAO56-PM از توانایی کمتری در بازسازی نوسانات مقادیر  $ET_o^{d,aero}$  برخوردار بوده‌اند؛ بنابراین، می‌توان گفت مقادیر اتخاذ شده برای پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در مدل ASCE-PM (۵۰ ثانیه بر متر در ساعات روز و ۲۰۰ ثانیه بر متر در ساعات شب) موجب قابلیت کمتر این مدل در بازسازی نوسانات  $ET_o^{d,aero}$  در مقایسه با مدل FAO56-PM گردیده است که دلیل اصلی آن مقدار انتخابی در این مدل برای پارامتر مقاومت پوشش

به‌گونه‌ای که بر اساس آماره MRSB، عامل اصلی عدم انطباق مقادیر  $ET_o^{d,rad}$  با برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از مدل ASCE-PM ناشی از این بیش‌برآوردگری بوده است. این در حالیست که عامل اصلی عدم انطباق مقادیر  $ET_o^{d,rad}$  با برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از مدل FAO56-PM با استفاده از رویکردهای اول تا چهارم برآورد  $R_{nl}$  ناشی از کمبود همبستگی بین مقادیر فوق و بیش‌برآوردگری مقادیر  $ET_o^{d,rad}$  بوده است. همچنین، عامل اصلی عدم انطباق مقادیر  $ET_o^{d,rad}$  با برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از مدل‌های (FAO56-PM)<sub>5</sub> و (FAO56-PM)<sub>6</sub> ناشی از نارسایی آنها در بازسازی نوسانات  $ET_o^{d,rad}$  و عدم همبستگی بین مقادیر فوق (در مورد مدل FAO56-PM)<sub>5</sub> و کم‌برآوردگری مقادیر  $ET_o^{d,rad}$  (در مورد مدل FAO56-PM)<sub>6</sub> بوده است. بر اساس آماره MME می‌توان گفت مدل‌های (FAO56-PM)<sub>5</sub> و (FAO56-PM)<sub>6</sub> مقادیر  $ET_o^{d,rad}$  را در تمامی مقیاس‌های زمانی مورد بررسی کم‌برآورد و ویرایش‌های نخست تا چهارم هر دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM مقادیر  $ET_o^d$  را بیش‌برآورد نموده‌اند. با این حال، مقایسه آماره‌های MME و MAME حاکی از آن است که برآوردهای  $ET_o^{24h}$  اشتقاق یافته از مدل‌های فوق در تمامی گام‌های زمانی مورد بررسی همواره بیشتر از مقادیر  $ET_o^d$  برآورد نگردیده است. همچنین، آماره‌های فوق حاکی از آن است که مدل‌های (ASCE-PM)<sub>5</sub>، (ASCE-PM)<sub>6</sub>، (FAO56-PM)<sub>5</sub>، (FAO56-PM)<sub>6</sub> مقادیر  $ET_o^d$  را در تمامی مقیاس‌های زمانی مورد بررسی کم‌برآورد نموده‌اند.

بر اساس مقادیر آماره MME ارائه شده در جدول ۳ می‌توان گفت برآوردهای  $ET_o^{24h,rad}$  اشتقاقی از مدل ASCE-PM نسبت به

گیاهی در ساعات شب می‌باشد.

جدول ۳- آماره‌های ارزیابی مورد استفاده به منظور مقایسه عملکرد مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM در بازسازی مقادیر روزانه مولفه‌های تشعشع، آیرودینامیک و تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر) با استفاده از شش رویکرد برآورد  $R_{nl}$  در مقیاس‌های زمانی مختلف<sup>(\*)</sup>

Table 3- Evaluation statistics used for comparison of the performance of ASCE-PM and FAO56-PM models for retrieving the daily radiation and aerodynamic components and the reference evapotranspiration, using 6 different  $R_{nl}$  estimation approaches at different time scales<sup>(\*)</sup>

نام مدل (Model)	آماره‌های ارزیابی											رتبه نهایی (Final rank)		
	MMAD (mm)	MME (mm)	MAME (mm)	MRMSE (mm)	SDRMSE (mm)	MPearson (-)	MEF (-)	SDEF (-)	MMSE (mm <sup>2</sup> )	MRSB (%)	MRNU (%)		MRLC (%)	
مولفه تشعشع (Radiation component)	(ASCE-PM)1	0.8800(2)	0.3274	0.3294(2)	0.3764(2)	0.0668(2)	0.9921(2)	0.9125[8]	0.0270[8]	0.1462	75.369	2.6668	21.9642	(2)[4]
	(ASCE-PM)2	1.1017(2)	0.4705	0.4705(2)	0.5203(2)	0.1025(2)	0.9882(1)	0.8316[11]	0.0521[11]	0.2812	80.7261	1.6823	17.5916	(2)[6]
	(ASCE-PM)3	0.8195(2)	0.3553	0.3553(2)	0.3980(2)	0.0554(2)	0.9914(2)	0.9038[9]	0.0235[7]	0.1615	78.8766	1.2048	19.9186	(2)[4]
	(ASCE-PM)4	1.0612(2)	0.5118	0.5118(2)	0.5567(2)	0.1189(2)	0.9874(1)	0.8069[12]	0.0679[12]	0.324	83.6243	0.8223	15.5534	(2)[7]
	(ASCE-PM)5	0.6784(2)	0.1683	0.1683(2)	0.2405(2)	0.0190(2)	0.9937(2)	0.9705[6]	0.0042[4]	0.0582	48.8968	12.3006	38.8027	(2)[3]
	(ASCE-PM)6	0.3819(1)	0.1345	0.1345(2)	0.1755(1)	0.0086(1)	0.9991(1)	0.9875[1]	0.0011[1]	0.0309	59.7373	26.8272	13.4354	(1)[1]
	(FAO56-PM)1	0.7449(1)	0.111	0.1312(1)	0.2091(1)	0.0400(1)	0.9930(1)	0.9729[4]	0.0101[6]	0.0453	39.5551	3.6273	56.8175	(1)[3]
	(FAO56-PM)2	1.0073(1)	0.285	0.2900(1)	0.3609(1)	0.0902(1)	0.9876(2)	0.9172[7]	0.0321[9]	0.1384	61.7712	1.8136	36.4152	(1)[4]
	(FAO56-PM)3	0.6899(1)	0.1259	0.1334(1)	0.2185(1)	0.0297(1)	0.9919(1)	0.9710[5]	0.0074[5]	0.0486	38.1411	6.7298	55.1291	(1)[3]
	(FAO56-PM)4	0.9749(1)	0.3243	0.3268(1)	0.3972(1)	0.1144(1)	0.9862(2)	0.8982[10]	0.0470[10]	0.1708	63.9205	2.924	33.1555	(1)[5]
	(FAO56-PM)5	0.5652(1)	-0.0535	0.0535(1)	0.1960(1)	0.0088(1)	0.9945(1)	0.9805[3]	0.0019[2]	0.0385	7.9753	44.5802	47.4445	(1)[2]
	(FAO56-PM)6	0.5638(2)	-0.0906	0.0906(1)	0.1898(2)	0.0144(2)	0.9984(2)	0.9853[2]	0.0026[3]	0.0362	22.7086	58.794	18.4974	(2)[2]
مولفه آیرودینامیک (Aerodynamic component)	(ASCE-PM)1	2.1295(2)	-0.2966	0.2966(2)	0.4064(2)	0.0195(2)	0.9986(2)	0.9864[3]	0.0014[4]	0.1655	53.4746	28.594	17.9313	(2)[3]
	(ASCE-PM)2	1.5837(2)	-0.2221	0.2221(2)	0.3050(2)	0.0236(2)	0.9989(2)	0.9923[2]	0.0013[2]	0.0936	53.4403	20.3774	26.1823	(2)[2]
	(ASCE-PM)3	2.2329(2)	-0.3147	0.3147(2)	0.4297(2)	0.0182(2)	0.9986(2)	0.9848[5]	0.0013[3]	0.185	53.7592	29.8655	16.3753	(2)[4]
	(ASCE-PM)4	1.5837(2)	-0.2221	0.2221(2)	0.3050(2)	0.0236(2)	0.9989(2)	0.9923[2]	0.0013[2]	0.0936	53.4403	20.3774	26.1823	(2)[2]
	(ASCE-PM)5	2.0755(2)	-0.3003	0.3003(2)	0.4103(2)	0.0267(2)	0.9987(2)	0.9861[4]	0.0016[5]	0.1691	53.4334	28.9903	17.5762	(2)[5]
	(ASCE-PM)6	1.5837(2)	-0.2221	0.2221(2)	0.3050(2)	0.0236(2)	0.9989(2)	0.9923[2]	0.0013[2]	0.0936	53.4403	20.3774	26.1823	(2)[2]
FAO56-PM	0.9526(1)	-0.118	0.1180(1)	0.1763(1)	0.0067(1)	0.9993(1)	0.9975[1]	0.0002[1]	0.0311	44.7424	5.0347	50.2229	(1)[1]	
تبخیر-تعرق مرجع (Reference evapotranspiration)	(ASCE-PM)1	1.6841(2)	0.0438	0.0812(2)	0.2734(2)	0.0319(1)	0.9986(2)	0.9958[4]	0.0011[6]	0.0758	10.1766	27.3652	62.4581	(2)[3]
	(ASCE-PM)2	1.3372(2)	0.2515	0.2592(2)	0.3621(2)	0.0470(2)	0.9984(2)	0.9927[10]	0.0017[9]	0.1333	51.8041	3.7792	44.4167	(2)[5]
	(ASCE-PM)3	1.8333(2)	0.0632	0.0788(2)	0.3074(2)	0.0210(1)	0.9985(2)	0.9948[7]	0.0007[3]	0.0949	7.6729	39.7914	52.5358	(2)[3]
	(ASCE-PM)4	1.3602(2)	0.2957	0.2979(2)	0.4001(2)	0.0672(2)	0.9984(2)	0.9910[11]	0.0027[11]	0.1646	55.7603	5.893	38.3467	(2)[6]
	(ASCE-PM)5	1.8172(2)	-0.1129	0.1129(1)	0.3273(2)	0.0165(1)	0.9990(2)	0.9944[8]	0.0005[1]	0.1074	11.9363	55.0904	32.9734	(2)[2]
	(ASCE-PM)6	1.2822(2)	-0.0692	0.0692(1)	0.2438(1)	0.0327(2)	0.9994(1)	0.9970[2]	0.0010[5]	0.0605	8.0686	54.3	37.6314	(1)[1]
	(FAO56-PM)1	1.0273(1)	0.0091	0.0719(1)	0.2203(1)	0.0442(2)	0.9990(1)	0.9972[1]	0.0015[8]	0.0453	11.9223	12.6599	75.4177	(1)[2]
	(FAO56-PM)2	1.1746(1)	0.1709	0.1942(1)	0.3048(1)	0.0450(1)	0.9986(5)	0.9948[7]	0.0014[7]	0.1384	40.5992	3.744	55.6568	(1)[4]
	(FAO56-PM)3	0.9911(1)	0.0355	0.0692(1)	0.2414(1)	0.0252(2)	0.9989(1)	0.9968[3]	0.0008[4]	0.0486	9.2593	24.3594	66.3813	(1)[1]
	(FAO56-PM)4	1.1889(1)	0.2136	0.2309(1)	0.3426(1)	0.0661(1)	0.9985(1)	0.9934[9]	0.0023[10]	0.1708	44.8196	8.1202	47.0601	(1)[5]
	(FAO56-PM)5	1.1566(1)	-0.1481	0.1481(2)	0.2919(1)	0.0184(2)	0.9991(1)	0.9955[5]	0.0006[2]	0.0385	25.7457	37.3434	36.9108	(1)[1]
	(FAO56-PM)6	1.2128(1)	-0.1866	0.1866(2)	0.3079(2)	0.0221(1)	0.9994(1)	0.9952[6]	0.0008[4]	0.0362	36.5735	39.2358	24.1908	(2)[3]

<sup>(\*)</sup> در این جدول، اعداد داخل پرانتز بیانگر رتبه‌ی ارزیابی عملکرد دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM به‌ازای هریک از رویکردهای برآورد  $R_{nl}$  می‌باشد. اعداد داخل براکت

بیانگر رتبه ارزیابی عملکرد و برایش‌های مختلف دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM به‌لحاظ تمامی رویکردهای مورد استفاده برای برآورد  $R_{nl}$  می‌باشد.

<sup>(\*)</sup> Rank of ASCE-PM and FAO56-PM models for each  $R_{nl}$  estimation approach is given in the parenthesis. Rank of ASCE-PM and FAO56-PM models based on all studied  $R_{nl}$  estimation approaches is given in the bracket.

مدل FAO56-PM می‌باشد. با توجه به رتبه‌های ارزیابی حاصل از مقایسه عملکرد مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM به‌ازای هریک از رویکردهای برآورد  $R_{nl}$  (اعداد داخل پرانتز در جدول ۳) می‌توان گفت برآوردهای مدل FAO56-PM برای مقادیر  $ET_o^{d,rad}$ ،  $ET_o^{d,aero}$  و  $ET_o^d$  نسبت به برآوردهای نظیر اشتقاق یافته از مدل ASCE-PM (به‌جز در مورد رویکرد ششم برآورد  $R_{nl}$  برای مقادیر  $ET_o^{d,rad}$  و  $ET_o^d$ ) همواره دارای برتری بوده است. همچنین، بر اساس رتبه‌های محاسبه شده برای مقایسه عملکرد ویرایش‌های مختلف دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM به‌لحاظ تمامی رویکردهای مورد استفاده برای برآورد  $R_{nl}$  (اعداد داخل براکت)، می‌توان گفت مدل‌های  $(ASCE-PM)_6$ ،  $(FAO56-PM)_3$  و  $(FAO56-PM)_5$  نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی دارای برتری بوده‌اند. بر اساس انحراف معیار رتبه‌های نهایی ارائه شده در براکت‌ها می‌توان گفت عملکرد مدل ASCE-PM در بازسازی مقادیر  $ET_o^{d,rad}$ ،  $ET_o^{d,aero}$  و  $ET_o^d$  نسبت به نحوه محاسبه  $R_{nl}$  از حساسیت بیشتری در مقایسه با مدل FAO56-PM برخوردار بوده است. یکی از نارسایی‌های ویرایش اصلی مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM معیار اتخاذ شده در آنها به‌منظور اطلاق هر گام زمانی به ساعات شب و روز می‌باشد که در رویکردهای اول، سوم و پنجم برآورد  $R_{nl}$  نیز از این معیار استفاده شده است. در ویرایش اصلی هر دو مدل از دو معیار متفاوت به‌منظور تعیین ساعات روز و شب استفاده می‌شود (معیار زاویه خورشیدی بزرگتر از  $0/3$  رادیان برای ساعات روز در محاسبات تابع ابرناکی و لذا تشعشع خالص طول موج بلند و معیار تشعشع خالص بزرگتر از صفر برای ساعات روز به‌منظور انتخاب مقادیر پارامترهای مقاومت پوشش گیاهی و شار حرارتی خاک). بنابراین، این دو معیار لزوماً در تعیین ساعات شب و روز همواره به نتایج یکسان ختم نمی‌شوند. این نکته به‌خوبی از مقادیر متوسط طول ساعات روز محاسبه شده از طریق دو معیار فوق قابل استنباط می‌باشد. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، متوسط روزانه طول ساعات روز مورد استفاده در محاسبات مولفه تشعشع و آیرودینامیک بیشتر ( $1/3831$  تا  $1/6753$  ساعت) از مقدار نظیر مورد استفاده در محاسبات تابع ابرناکی می‌باشد. این نارسایی، محاسبات مربوط به مولفه تشعشع را بیشتر از مولفه آیرودینامیک متاثر می‌سازد. چراکه مولفه تشعشع مستقیماً بر اساس تشعشع خالصی تعیین می‌گردد که ممکن است در آن از تابع ابرناکی و لذا تشعشع خالص طول موج بلند محاسبه شده بر اساس ویژگی‌های در نظر گرفته شده برای ساعات شب و متقابلاً از مقدار پارامتر شار حرارتی خاک و مقاومت پوشش گیاهی در نظر گرفته شده برای ساعات روز استفاده شده باشد و بالعکس. حال با توجه به کمتر بودن کسر مولفه آیرودینامیک در مورد مدل ASCE-PM در مقایسه با FAO56-PM، می‌توان گفت این نارسایی،

به‌گونه‌ای که این امر سبب کاهش قابل توجه مقدار مولفه آیرودینامیک در طول ساعات شب و در نتیجه محدود شدن تغییرپذیری برآوردهای  $ET_o^{24h,aero}$  اشتقاق یافته از این مدل در مقایسه با برآوردهای نظیر اشتقاقی از مدل FAO56-PM می‌شود. از سوی دیگر، مقدار کمتر پارامتر مقاومت پوشش گیاهی در مدل FAO56-PM طی ساعات شب (۷۰ ثانیه بر متر در مقایسه با مقدار ۲۰۰ ثانیه بر متر در مدل ASCE-PM)، نه تنها مقدار تبخیر-تعرق کمتر برآورد شده در طی ساعات روز (در مقایسه با مدل ASCE-PM) را جبران نموده بلکه موجب فزونی یافتن برآوردهای  $ET_o^{24h,aero}$  اشتقاق یافته از این مدل نسبت به مقادیر نظیر اشتقاقی از مدل ASCE-PM گردیده است. نکات ذکر شده از شکل ۲-الف، ۲-ب و ۲-د و مقادیر متوسط کسر مولفه آیرودینامیک ارائه شده در جدول ۴ نیز قابل استنباط می‌باشد. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، بخش اعظم  $ET_o^{24h}$  اشتقاق یافته از مدل‌های ASCE-PM ( $57/94$  تا  $59/49$  درصد) و FAO56-PM ( $61/18$  تا  $63/03$  درصد) مربوط به مولفه آیرودینامیک می‌باشد. مقادیر آماره SDRMSE ارائه شده در جدول ۳ حاکی از آن است که به‌لحاظ پایداری دقت برآورد مقادیر  $ET_o^{d,aero}$  و  $ET_o^{d,rad}$  در مقیاس‌های زمانی مختلف، مدل FAO56-PM به‌ازای تمامی رویکردهای برآورد  $R_{nl}$  (به‌جز رویکرد ششم در مورد مولفه تشعشع) بر مدل ASCE-PM دارای برتری بوده است. بر اساس مقادیر این آماره، برآوردهای  $ET_o^{24h,aero}$  اشتقاقی از ASCE-PM با استفاده از رویکردهای نخست، سوم و پنجم برآورد  $R_{nl}$  نسبت به برآوردهای نظیر حاصل از مدل FAO56-PM دارای برتری می‌باشد. در مورد دیگر رویکردهای برآورد  $R_{nl}$ ، مدل FAO56-PM از دقت پایداری در بازسازی مقادیر  $ET_o^d$  در گام‌های زمانی مختلف برخوردار بوده است.

مقادیر آماره MEF در جدول ۳ حاکی از انطباق بسیار خوب برآوردهای  $ET_o^{24h,rad}$ ،  $ET_o^{24h,aero}$  و  $ET_o^{24h}$  حاصل از هر دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM با مقادیر نظیر روزانه می‌باشد. بر اساس این آماره می‌توان گفت که عملکرد هر دو مدل در بازسازی مقادیر روزانه مولفه آیرودینامیک همواره بهتر از عملکرد آنها در بازسازی مقادیر روزانه مولفه تشعشع بوده است. مقادیر آماره SDEF حاکی از آن است که در مقایسه با مولفه تشعشع، انطباق مقادیر مجموع ۲۴ ساعته و روزانه مولفه آیرودینامیک نسبت به مقیاس زمانی اتخاذ شده از حساسیت کمتری برخوردار بوده است. بر اساس مقادیر آماره MRNU، می‌توان گفت در مقایسه با برآوردهای  $ET_o^{24h}$  اشتقاقی از مدل FAO56-PM، برآوردهای نظیر اشتقاقی از مدل ASCE-PM از قابلیت کمتری در بازسازی نوسانات مقادیر  $ET_o^d$  برخوردار بوده‌اند که دلیل اصلی این امر ناشی از قابلیت کمتر مدل ASCE-PM در بازسازی نوسانات مولفه آیرودینامیک در مقایسه با

ارزیابی عملکرد مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM در بازسازی مقادیر  $ET_o^d$  در مقیاس‌های زمانی مختلف و با استفاده از شش رویکرد برآورد  $R_{nl}$  در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، اتخاذ مقیاس زمانی کوچکتر، لزوماً به بهبود انطباق برآوردهای  $ET_o^{24h}$  با مقادیر  $ET_o^d$  نخواهد انجامید.

برآوردهای اشتقاق یافته از مدل ASCE-PM را بیشتر متاثر خواهد نمود. همچنین، با توجه به کمتر بودن مقادیر متوسط  $(R_n-G)^{24h}/(R_n-G)^d$  در مقایسه با نسبت  $R_n^{24h}/R_n^d$  می‌توان گفت که به‌طور کلی، ترم شار گرمایی خاک در منطقه مطالعاتی یک منبع مصرف‌کننده انرژی آزاد موجود در سطح زمین بوده و موجب کاهش تبخیر-تعرق خواهد گردید. مقادیر آماره ضریب کارایی مدل حاصل از

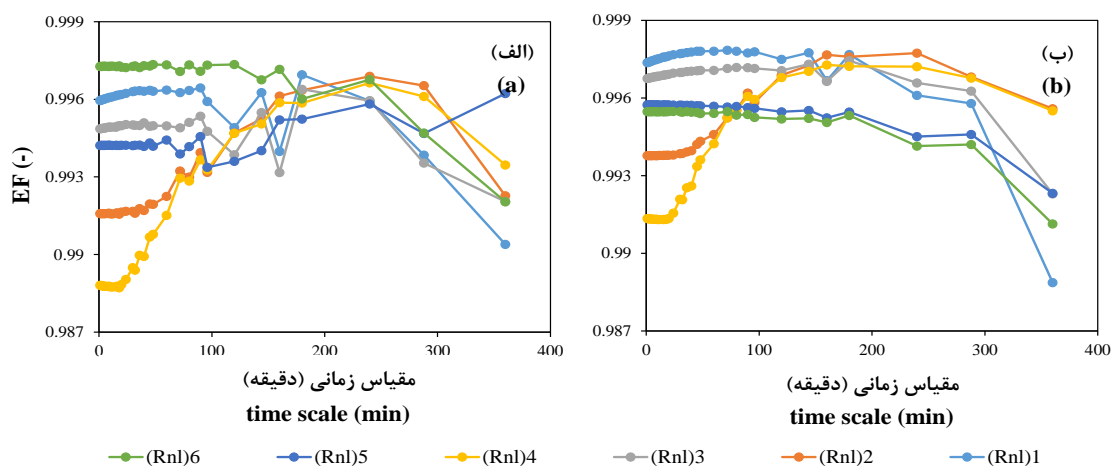
جدول ۴- مقایسه مقادیر متوسط برخی از ترم‌های محاسباتی مورد استفاده در مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM<sup>(\*)</sup>

Table 4- Comparison some of the calculation term used in ASCE-PM and FAO56-PM models<sup>(\*)</sup>

رویکرد برآورد $R_{nl}$ ( $R_{nl}$ estimation approach)	کسر مولفه آیرودینامیک برای برآوردهای مدل ASCE-PM (-) (Aerodynamic component fraction for ASCE-PM estimates (-))		کسر مولفه آیرودینامیک برای برآوردهای مدل FAO56-PM (-) (Aerodynamic component fraction for FAO56-PM estimates (-))		طول روز بر اساس معیار مورد استفاده در محاسبه تابع ابرناکی (ساعت) (Day length based on the criterion used in cloudiness function (h))		طول روز بر اساس معیار مورد استفاده در محاسبات مولفه‌های تشعشع و آیرودینامیک (ساعت) (Day length based on the criterion used in calculations of radiation and aerodynamic components (h))		مدت زمان تداخل معیار ساعات شب و روز (ساعت) (Length of daytime and nighttime confliction (h))	$R_n^{24h}/R_n^d$ (-)	$(R_n-G)^{24h}/(R_n-G)^d$ (-)
	1	0.5862	0.6177	9.1216	10.7970	1.6753	1.0875	1.0540			
2	0.5794	0.6019	12.0251	12.0251	0.0000	1.2328	1.1325				
3	0.5949	0.6303	9.1216	10.5047	1.3831	1.0619	1.0647				
4	0.5883	0.6118	12.0251	12.0251	0.0000	1.2494	1.1607				
5	0.5924	0.6256	9.1216	10.7384	1.6168	1.0000	0.9864				
6	0.5842	0.6120	12.0251	12.0251	0.0000	1.0000	0.9745				

<sup>(\*)</sup> در این جدول،  $R_n$ : تشعشع خالص خورشیدی (مگاژول بر متر مربع)،  $G$ : شار گرمایی خاک (مگاژول بر متر مربع) و بالانویس‌های 24h و d به ترتیب، بیانگر مقادیر مجموع ۲۴ ساعته و روزانه می‌باشند.

<sup>(\*)</sup>  $R_n$ : net longwave radiation ( $MJm^{-2}$ ),  $G$ : soil heat flux ( $MJm^{-2}$ ), subscripts 24h and d represent 24h sum and daily values, respectively.



شکل ۶- تغییرات آماره ضریب کارایی مدل (EF) حاصل از ارزیابی عملکرد مدل‌های ASCE-PM (الف) و FAO56-PM (ب) در بازسازی مقادیر  $ET_o^d$  در مقیاس‌های زمانی مختلف و با استفاده از شش رویکردهای نخست تا ششم برآورد تشعشع خالص طول موج بلند (به ترتیب،  $(R_{nl})_1$  تا  $(R_{nl})_6$ )  
Figure 6- The variations of model efficiency (EF) of ASCE-PM (a) and FAO56-PM (b) models for retrieving  $ET_o^d$ , using 1st to 6th  $R_{nl}$  estimation approaches ( $(R_{nl})_1$  to  $(R_{nl})_6$ , respectively) at different time scales

## نتیجه گیری کلی

می‌شود که این امر می‌تواند موجب افزایش عدم انطباق برآوردهای دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM، خصوصاً در مورد مولفه تشعشع گردد. نتایج نشان داد عملکرد مدل ASCE-PM در بازسازی مقادیر  $ET_o^{d,rad}$ ،  $ET_o^{d,aero}$  و  $ET_o^d$  نسبت به نحوه محاسبه  $R_{nl}$  و لذا عدم قطعیت مستتر در تشعشع خالص خورشیدی محاسبه شده از حساسیت بیشتری در مقایسه با مدل FAO56-PM برخوردار بود. به نظر می‌رسد این امر دلیل اصلی حصول نتایج متناقض در خصوص مقایسه برآوردهای این دو مدل باشد. چراکه در این پژوهش نشان داده شد در صورت استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده تشعشع خالص خورشیدی (که رویکرد ششم برآورد  $R_{nl}$  می‌تواند بیانگر این حالت باشد) برآوردهای مدل ASCE-PM بر برآوردهای نظیر اشتقاقی از مدل FAO56-PM دارای برتری خواهد بود. از سوی دیگر، با وجود آنکه اختیار معیار مورد استفاده در ویرایش اصلی دو مدل فوق برای اطلاق هر گام زمانی به ساعات شب و روز منجر به انطباق بیشتر برآوردهای  $ET_o^{24h}$  و مقادیر  $ET_o^d$  گردید (به‌جز در مورد مدل  $(ASCE-PM)_6$ ). اما همان‌طور که نشان داده شد، استفاده از این معیار منجر به آن می‌شود تا در برخی از گام‌های زمانی شبانه‌روز، بخشی محاسبات تبخیر-تعرق بر اساس ویژگی‌های در نظر گرفته شده برای ساعات روز و بخشی دیگر بر اساس ویژگی‌های در نظر گرفته شده برای ساعات شب صورت گیرد. از سوی دیگر به‌کارگیری این معیار در مدل‌های هیدرولوژیکی منجر به تناقض در محاسبه اجزای بیلان آب مربوط به ساعات روز و شب خواهد شد. این در حالیست که استفاده از معیار ساعات طلوع و غروب خورشید به‌منظور اطلاق هر گام زمانی به ساعات شب و روز فاقد نارسایی‌های مورد اشاره خواهد بود. بر این اساس، به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه در شرایط اقلیمی منطقه مطالعاتی، استفاده از مدل‌های  $(ASCE-PM)_6$ ،  $(FAO56-PM)_6$ ،  $(FAO56-PM)_2$ ،  $(ASCE-PM)_2$ ،  $(FAO56-PM)_4$  و  $(ASCE-PM)_4$  به‌ترتیب، دارای بالاترین اولویت خواهد بود. یکی دیگر از مزایای استفاده از مدل‌های  $(ASCE-PM)_6$ ، کاهش حجم محاسبات ناشی از به‌کارگیری آنها در مدل‌های هیدرولوژیکی در مقایسه با سایر مدل‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر است.

در پژوهش حاضر، برآوردهای زیرروزانه  $ET_o$  حاصل از مدل‌های ASCE-PM و FAO56-PM در مقیاس‌های زمانی زیرروزانه مختلف از طریق اجرای یک آزمایش محاسباتی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد انطباق برآوردهای  $ET_o^{24h}$  اشتقاقی از دو مدل ASCE-PM و FAO56-PM در ایام گرم سال بهبود می‌یابد. یکی از دلایل این امر را می‌توان به فزونی یافتن کسر مولفه آیرودینامیک در تبخیر-تعرق برآورد شده در این ایام نسبت داد. چراکه عملکرد هر دو مدل فوق در بازسازی مقادیر روزانه مولفه آیرودینامیک، در مقایسه با مقادیر روزانه مولفه تشعشع بهتر بود. از سوی دیگر، انطباق برآوردهای دو مدل برای هر دو مولفه آیرودینامیک و تشعشع نیز در این ایام بهبود یافت. بخشی از انطباق بهتر برآوردهای فوق ناشی از طولانی بودن طول ساعات روز در ایام گرم سال است. چراکه اختلاف مقادیر مورد استفاده برای پارامتر پوشش گیاهی در ساعات شب بیشتر از ساعات روز بوده و این امر موجب اختلاف بیشتر برآوردهای دو مدل در ساعات شب در مقایسه با ساعات روز خواهد شد (شکل ۳). همچنین، بخشی از عملکرد ضعیف‌تر هر دو مدل در بازسازی مقادیر روزانه مولفه تشعشع، در مقایسه با مقادیر روزانه مولفه آیرودینامیک را می‌توان ناشی از نارسایی‌های موجود در ساختار تشریحی این مدل‌ها دانست. نخست اینکه مقادیر دمای متوسط روزانه (که بر اساس میانگین دمای حداقل و حداکثر روزانه می‌باشد) لزوماً، با متوسط مقادیر دمای هوا در گام‌های زمانی محاسباتی در طول روز برابر نخواهد بود و با توجه به متناسب بودن تشعشع طول موج بلند با توان چهارم دما (قانون استفان-بولتزمن)، این عدم انطباق در محاسبات مربوط به مولفه تشعشع نمود بیشتری می‌یابد. دوم اینکه روش محاسبه تابع ابرناکی در محاسبات زیرروزانه، خصوصاً در ایامی از سال با طول ساعات شب طولانی‌تر، می‌تواند منجر به اختلاف بیشتر مقادیر روزانه و مجموع ۲۴ ساعته  $R_{nl}$  شود. چراکه تابع ابرناکی در ساعات شب مقداری ثابت و برابر با مقدار این ترم برای آخرین گام زمانی محاسباتی واقع در ساعات روز خواهد بود. این امر در ایام با ساعات شب طولانی‌تر می‌تواند منجر به اختلاف بیشتر مقادیر روزانه و مجموع ۲۴ ساعته  $R_{nl}$  شود. سوم اینکه، بر خلاف محاسبات زیرروزانه، در محاسبات روزانه از مقدار ترم شار گرمایی خاک صرف‌نظر

## منابع

- 1- 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.
- 2- 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.
- 3- Allen R.G., Pruitt W.O., Wright J.L., Howell T.A., Ventura F., Snyder R., Itenfisu D., Steduto P., Berengena J., Yrisarry J.B., Smith M., Pereira L.S., Raes D., Perrier A., Alves I., Walter I., and Elliott R.L. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO 56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 81(1): 1-22.
  - 4- 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.
  - 5- Bakhtiari 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.)
  - 6- Cesaraccio C., Spano D., Duce P., and Snyder R.L. 2001. An improved model for determining degree-day values from daily temperature data. *International Journal of Biometeorology*, 45(4): 161-169.
  - 7- 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.
  - 8- Green H.M., and Kozek A.S. 2003. Modelling weather data by approximate regression quantiles. *Australian and New Zealand Industrial and Applied Mathematics Journal*, 44: C229-C248.
  - 9- Irmak S., Howell T.A., Allen R.G., Payero J.O., and Martin D.L. 2005. Standardized ASCE Penman-Monteith: Impact of Sum-of-Hourly Vs. 24- Hour Time step Computations at Reference Weather Station Sites. *Transactions of the ASAE*, 48(3): 1063-1077.
  - 10- Itenfisu D., Elliott R.L., Allen R.G., and Walter I.A. 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(6): 440-448.
  - 11- 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- Ortega-Farias S.O., Cuenca R.H., and English M. 1995. Hourly grass evapotranspiration in modified maritime environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(6): 369-373.
  - 13- 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.
  - 14- 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.)
  - 15- 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: 2- Estimation of Sub-daily Reference Evapotranspiration Using Disaggregated Weather Data *Journal of Water and Soil*, Accepted with minor revisions (in Persian with English abstract.)
  - 16- Pruitt W.O., and Lourence F.J. 1966. Tests of energy balance and other evaporation equations over a grass surface. Chapter IV, Final Report, USAEPG Grant No. DA-AMC-28-043-65-G12, AD-635-588. University of California, Davis, California, pp. 37-63.
  - 17- 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.)
  - 18- 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.
  - 19- 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.
  - 20- Tanner C.B., and Pelton W.L. 1960. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. *Journal of Geophysical Research*, 65(10): 3391-3413.
  - 21- Todorovic M. 1999. Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. *Journal of Irrigation*

- and Drainage Engineering, 125(5): 235-245.
- 22- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). 1979. Map of the world distribution of arid regions: Map at scale 1:25,000,000 with explanatory note. MAB Technical Notes 7, UNESCO, Paris.
- 23- Van Bavel C.H.M. 1966. Potential evaporation: The combination concept and its experimental verification. Water Resources Research, 2(3): 455-467.
- 24- Ventura F., Spano D., Duce P., and Snyder R.L. 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. Irrigation Science, 18(4): 163-170.
- 25- Yang K., Koike T., and Ye B. 2006. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. Agricultural and Forest Meteorology, 137(1): 43-55.



## A Comparison of ASCE and FAO56 Reference Evapotranspiration at Different Subdaily Timescales: a Numerical Study

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

Received: 04-04-2013

Accepted: 27-04-2015

**Introduction:** Subdaily estimates of reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) are needed in many applications such as dynamic agro-hydrological modeling. The ASCE and FAO56 Penman-Monteith models (ASCE-PM and FAO56-PM, respectively) has received favorable acceptance and application over much of the world, including the United States, for establishing a reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) index as a function of weather parameters. In the past several years various studies have evaluated ASCE-PM and FAO56-PM models for calculating the commonest hourly or 15-min  $ET_o$  either by comparing them with lysimetric measurements or by comparison with one another (2, 3, 5, 9, 10, 11, 16, 17, 19). In this study, sub-daily  $ET_o$  estimates made by the ASCE-PM and FAO56-PM models at different timescales (1-360 min) were compared through conduction of a computational experiment, using a daily to sub-daily disaggregation framework developed by Parchami-Araghi *et al.* (14).

**Materials and Methods:** Daily and sub-daily weather data at different timescales (1-360 min) were generated via a daily-to-sub-daily weather data disaggregation framework developed by Parchami-Araghi *et al.* (14), using long-term (59 years) daily weather data obtained from Abadan synoptic weather station. Daily/sub-daily net long wave radiation ( $R_{nl}$ ) was estimated through 6 different approaches, including using two different criteria for identifying the daytime/nighttime periods : 1) the standard criteria implemented in both ASCE-PM and FAO56-PM models and 2) criterion of actual time of sunset and sunrise in combination with 1) estimation of clear-sky radiation ( $R_{so}$ ) based on the standard approach implemented in both ASCE-PM and FAO56-PM models (1st and 2nd  $R_{nl}$  estimation approaches, respectively), 2) integral of the  $R_{so}$  estimates derived via a physically based solar radiation model developed by Yang *et al.* (25), YNG model, for one-second time-steps (3rd and 4th  $R_{nl}$  estimation approaches, respectively), and 3) integral of the calculated  $R_{nl}$  based on  $R_{so}$  estimates derived via YNG model for one-second time-steps (5th and 6th  $R_{nl}$  estimation approaches, respectively). The capability of the two models for retrieving the daily  $ET_o$  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 (7).

**Results and Discussion:** Results showed that during the summer days, 24h sum of sub-daily radiation and aerodynamic components of  $ET_o$  and the estimated  $ET_o$  derived from both models were in a better agreement with the respective daily values. The reason for this result can be attributed to the nighttime value of cloudiness function ( $f$ ) and the longer nighttime during the cold seasons. Because the nighttime values for  $f$  are equal the  $f$  value at the end of the previous daylight period until the next daylight period. The difference between sub-daily  $ET_o$  derived from the ASCE-PM and FAO56-PM models during the day and night was highly dependent on the wind speed. In case of both models, daily aerodynamic component of  $ET_o$  ( $ET_o^{d,aero}$ ) were reproduced more efficiently, compared to radiation component ( $ET_o^{d,rad}$ ). Except in the case of 6th  $R_{nl}$  estimation approach, FAO56-PM model (with a mean model efficiency (MEF) of 0.9934 to 0.9972) had better performance in reproducing the daily values of  $ET_o$  ( $ET_o^d$ ), compared to ASCE-PM model (with a MEF of 0.9910 to 0.9970). The agreement between 24h sum and daily values of aerodynamic component had a lower sensitivity to the adopted time-scale, compared to the radiation component. Compared to the FAO56-PM model the performance of the ASCE-PM model in reproducing the  $ET_o^{d,rad}$ ,  $ET_o^{d,aero}$  and  $ET_o^d$  had higher sensitivity to the approach utilized for calculation of  $R_{nl}$  and hence, to the uncertainty of net radiation. Results showed that a smaller time step does not necessarily leads to an improvement in agreement between 24h sum of subdaily and daily values of  $ET_o$ . Deficiency of the standard daytime/nighttime identification criteria resulted in a higher daily averaged

1, 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, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

4- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran



daytime (1.3831 to 1.6753 h) used in cloudiness function calculations, compared to the respective value used in calculations of the radiation and aerodynamic components. In order to estimate the sub-daily  $ET_o$  under climatic condition of the studied region, the use of ASCE-PM model based on the 6th  $R_{nl}$  estimation approach, (ASCE-PM)<sub>6</sub>, with a MEF of 0.9970 is preferred, compared to other studied alternatives. Another advantage of the (ASCE-PM)<sub>6</sub> and (FAO56-PM)<sub>6</sub> models is their computational efficiency in case of their implementation in hydrological models.

**Keywords:** Disaggregation, Evapotranspiration, ASCE Penman-Monteith, FAO-56 Penman-Monteith