



دانشگاه گواران و منابع آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هشتم، شماره اول، ۱۴۰۰

۲۰۱-۲۱۸

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2021.18734.3425

مقاله کامل علمی - پژوهشی

ارزیابی تبخیر-تعرق سنجنده مودیس با تبخیر - تعرق پنمن - مانیتث فائو ۵۶ و پرستلی - تیلور در اقلیم‌های متفاوت ایران

مهرانه خدامرادپور^{۱*} و لیلا قوی^۲

^۱ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۳

چکیده

سابقه و هدف: تبخیر-تعرق از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در بخش زمینی چرخه هیدرولوژی است که به‌عنوان رابط چرخه آب و انرژی، در برهم‌کنش جو و سطح نقش مهمی را بر عهده دارد. دسترسی به تصاویر سنجنش‌ازدور امکان مطالعات مکانی و زمانی تبخیر-تعرق شامل: تبخیر-تعرق واقعی (AET) و پتانسیل (PET) را به‌خوبی فراهم کرده است. تبخیر-تعرق محصول MOD16A2 سنجنده مودیس در بین تصاویر سنجنش‌ازدور، به‌دلیل توان تفکیک‌های بسیار مناسب مکانی (۵۰۰ متر) و زمانی (۸ روزه) در مطالعات منطقه‌ای در نواحی فاقد داده می‌تواند بسیار مفید باشد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش محصول تبخیر-تعرق پتانسیل زمینی جهانی سنجنده مودیس (MOD16A2) را با دو روش تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانیتث فائو ۵۶ و پرستلی-تیلور در ایستگاه‌های هواشناسی در دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ مورد ارزیابی قرارداد. محدوده مورد مطالعه واقع در استان‌های جنوب غرب ایران (خوزستان و بوشهر)، غرب ایران (استان‌های همدان و کرمانشاه) و شمال ایران (استان‌های گیلان و مازندران) است که بر اساس روش یونسکو از خشک تا خیلی مرطوب طبقه‌بندی شد. سپس تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانیتث فائو ۵۶ و پرستلی-تیلور با استفاده از داده‌های هواشناسی با پکیج Evapotranspiration در نرم‌افزار R و داده‌های تبخیر-تعرق پتانسیل محصول MOD16A2 از سامانه Google Earth Engine آماده شدند. سپس این داده‌ها بر اساس شاخص‌های ارزیابی در اقلیم‌های متفاوت با یکدیگر مقایسه شدند.

یافته‌ها: محصول MOD16A2 تبخیر-تعرق را نسبت به هر دو روش پنمن مانیتث فائو ۵۶ و پرستلی-تیلور در تمام تیپ‌های اقلیمی بیش برآورد می‌کند و دارای واریانس بیش‌تری در داده‌ها است. ویژگی‌های آماری MOD16A2 شامل: چارک‌های اول و سوم در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک با تبخیر-تعرق پنمن-مانیتث فائو ۵۶ اختلاف کم‌تری نسبت به روش پرستلی-تیلور دارد، درحالی‌که چارک‌های اول و سوم MOD16A2 در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب، مرطوب و خیلی مرطوب شباهت بیش‌تری به تبخیر-تعرق پرستلی-تیلور دارد. هم‌چنین MOD16A2 چرخه فصلی

* مسئول مکاتبه: mkhodamorad@basu.ac.ir

تبخیر-تعرق را به‌خوبی برآورد می‌کند، اما تاریخ وقوع بیشینه‌های MOD16A2 در تمام تیپ‌های اقلیمی، اکثراً با یک هفته تقدم رخ می‌دهد. تبخیر-تعرق محصول MOD16A2 در برآورد تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت (پرستلی-تیلور) در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک (نیمه‌مرطوب تا خیلی مرطوب)، به‌ویژه نیمه‌خشک با زمستان سرد و تابستان گرم (خیلی مرطوب)، به دلیل خطاهای کوچک مدل شامل PBIAS و RMSE به ترتیب در محدوده ۶۷/۵-۴۰/۳ درصد و ۱۹/۶-۱۴/۴ $\frac{mm}{8d}$ (محدوده ۹۷-۷۲/۵ درصد و $\frac{mm}{8d}$ ۲۴/۵-۱۸/۶) و ضرایب بالای توافق اصلاح‌شده در محدوده ۰/۶۱-۰/۵۰ (۰/۳۷-۰/۵۰)، تبیین وزنی در محدوده ۰/۶۳-۰/۵۵ (۰/۵۱-۰/۴۴) موفق است. هم‌چنین رابطه خطی قوی بین MOD16A2 تبخیر-تعرق پرستلی-تیلور و پنمن-مانتیت در اکثر تیپ‌های اقلیمی، به دلیل ضرایب همبستگی بالا (بیش‌تر از ۰/۸۵) وجود دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش بیانگر عدم قطعیت کم‌تر تبخیر-تعرق محصول MOD16A2 با تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه نیمه‌خشک است، درحالی‌که در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب تا مرطوب MOD16A2 عدم قطعیت کم‌تری در تبخیر-تعرق پرستلی-تیلور دارد. هم‌چنین تبخیر-تعرق سنجنده مدیس با روش پنمن-مانتیت فائو ۵۶ و در اقلیم‌های نیمه‌خشک کم‌ترین عدم قطعیت را با توجه به کم‌ترین خطاها دارد؛ بنابراین با توجه به تغییرات اقلیمی اخیر در خصوص افزایش دما و در نتیجه افزایش تبخیر-تعرق، به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان و پیشنهاد روش پنمن-مانتیت فائو ۵۶ به‌عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر-تعرق توسط فائو، تبخیر-تعرق MOD16A2 می‌تواند نقش کلیدی را در برنامه‌ریزی‌های آبیاری، مدیریت منابع آب و پیش‌خشک‌سالی در نواحی فاقد داده واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک (به‌ویژه نیمه‌خشک) ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق پتانسیل، تبخیر-تعرق پرستلی-تیلور، تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶، سنجنده مدیس، MOD16A2

مقدمه

(۰/۰۴۵) در درازمدت (۲۰۱۲-۱۹۸۰) مشاهده شده است (۴). تبخیر-تعرق شامل تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی است، به‌طوری‌که تبخیر-تعرق واقعی مقدار واقعی بخار آب وارد شده از سطح به جو و پتانسیل حداکثر توان تبخیری جو از سطح بدون محدودیت آب است. با توجه به نامشخص بودن نوع پوشش گیاهی در تبخیر-تعرق پتانسیل و وابسته بودن آن به متغیرهای هواشناختی (تابش خورشیدی، باد و دما)، تبخیر-تعرق مرجع (ET0) در شرایط استاندارد برای گیاه چمن با ارتفاع یک‌نواخت ۱۲ سانتی‌متر ارائه شد (۱). محدودیت دسترسی به اندازه‌گیری‌های مستقیم ET0 (استفاده از لایسیمتر وزنی)، منجر به استفاده از

تبخیر-تعرق شامل انتقال بخار آب از سطح زمین به جو در اثر تبخیر از سطح شامل: خاک و آب و تعرق از سطح پوشش گیاهی است. تبخیر-تعرق به‌دلیل ارتباط بودجه آبی و انرژی در برهمکنش سطح و جو نقش مهمی دارد که برآورد صحیح آن، منجر به برآورد صحیح شارهای انرژی می‌گردد. بر اساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، گرمایش جهانی منجر به افزایش ظرفیت بخار آب جو و افزایش تبخیر-تعرق و در نتیجه شتاب در چرخه هیدرولوژی می‌گردد (۲۲)، به‌طوری‌که روند افزایشی معنادار تبخیر-تعرق مرجع (۰/۰۹۱ mm/month year) و واقعی (mm/month year)

در مدل‌های برنامه‌ریزی آبیاری مانند AquaCrop، شاخص‌های خشک‌سالی مانند شاخص SPEI و مدل‌های هیدرولوژی مانند مدل SWAT به شمار می‌رود، تاکنون مطالعات محدودی به بررسی تبخیر-تعرق (PET) MOD16A پرداخته‌اند (۴، ۱۲، ۱۸، ۲۹). برای مثال ارزیابی PET محصول MOD16 در ایالت Goiás در برزیل در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ نشان از همبستگی پایین با ET₀ در ایستگاه‌های هواشناسی دارد، درحالی‌که در ماه‌های بارش، اختلاف PET و برآورد شده‌ها کم‌تر بود (۱۸). هم‌چنین ارزیابی هفتگی PET محصول MOD16 با تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت فائو ۵۶ در چهار ایستگاه سینوپتیک در استان زنجان در دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ با وجود فروبرآورد MOD16، اکثر ایستگاه‌ها، دارای ضرایب همبستگی بالا (محدوده تغییرات ۰/۷۸-۰/۷۴) بود (۱۷). بنابراین با توجه به موارد ذکرشده در اهمیت تبخیر-تعرق و مشکلات مطالعات منطقه‌ای تبخیر-تعرق در کشور ایران، به دلیل عدم دسترسی به تمام متغیرهای هواشناسی در برآورد تبخیر-تعرق مرجع در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی و پراکندگی مکانی زیاد آن‌ها و از طرفی دسترسی آسان به تصاویر بلندمدت تبخیر-تعرق محصول MOD16 در مقیاس زمانی و مکانی بسیار مناسب (۸ روزه و ۵۰۰ متر) طی سال‌های ۲۰۰۱ تاکنون و استفاده از آن‌ها در نواحی فاقد داده این پژوهش به ارزیابی تبخیر-تعرق PET محصول MOD16A2 با تبخیر-تعرق‌های پنمن-مانتیت فائو ۵۶ و پرستلی-تیلور در مقیاس زمانی هفتگی در اقلیم‌های متفاوت ایران (از خشک تا خیلی مرطوب) بر اساس شاخص‌های ارزیابی در مقیاس نقطه‌ای طی دو دهه اخیر (۲۰۱۸-۲۰۰۱) می‌پردازد.

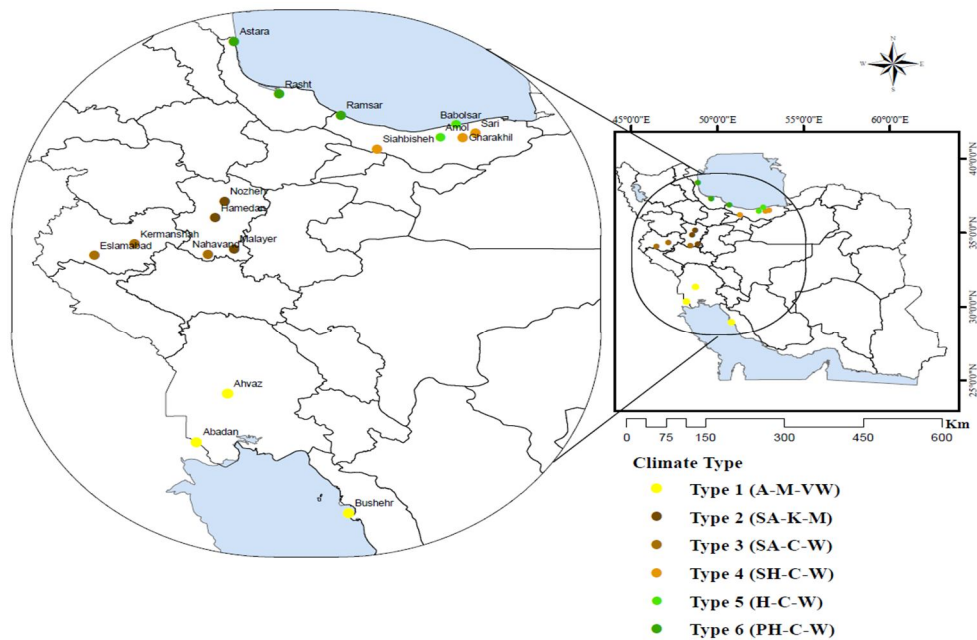
روش‌های تجربی بر اساس دما، تابش و ترکیبی گردید که از بین این روش‌ها، روش ترکیبی پنمن-مانتیت فائو ۵۶ با توجه به فیزیکی بودن مدل (برهم‌کنش انرژی بین گیاه و جو) و در نتیجه عدم نیاز به واسنجی محلی در اقلیم‌های مختلف، به‌عنوان مدل استاندارد برآورد تبخیر-تعرق مرجع توسط سازمان جهانی فائو پیشنهاد شد (۲، ۳). با این وجود برآورد تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت فائو ۵۶ نیاز به تعداد زیادی متغیرهای هواشناسی دارد که در اکثر ایستگاه‌ها در دسترس نیست (۱۱).

به تدریج با دسترسی به تصاویر ماهواره‌ها، برآوردهای مکانی و زمانی تبخیر-تعرق با روش‌های سنجنش‌ازدور در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی، به‌ویژه در دهه‌های اخیر، به شدت مورد توجه قرار گرفت (۶، ۳۲). تبخیر-تعرق در سنجنش‌ازدور به سه روش شامل: روش‌های تجربی یا عددی بر اساس ارتباط متغیرهای هواشناسی با داده‌های ماهواره مانند دمای سطح، تابش خالص و شاخص‌های گیاهی (۲۴)، روش‌های توازن انرژی بر اساس باقیمانده رابطه توازن انرژی (۲۷) و روش‌های مدل‌های فیزیکی بر اساس ترکیب داده‌های هواشناسی و ماهواره مانند رویکرد پنمن-مانتیت در محصول MOD16 سنجنده مدیس (۵، ۱۹، ۲۰) و یا پرستلی-تیلور در مدل GLEAM (Global Land Evaporation and Amsterdam Model) برآورد می‌شود (۱۵). بررسی زمانی و مکانی تبخیر-تعرق MOD16A2 سنجنده مدیس، به دلیل توان تفکیک‌های مکانی و زمانی مناسب (به ترتیب ۵۰۰ متر و هفتگی) در مطالعات منطقه‌ای بسیار مناسب است به طوری‌که مطالعات بسیاری به بررسی تبخیر-تعرق واقعی MOD16 در مقیاس نقطه‌ای و منطقه‌ای در نواحی مختلف پرداخته‌اند (۲۵، ۳۳). با وجودی که تبخیر-تعرق مرجع به‌عنوان مؤلفه کلیدی

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه واقع در استان‌های جنوب غرب ایران شامل: خوزستان و بوشهر، استان‌های غرب ایران شامل: استان‌های همدان و کرمانشاه و شمال ایران شامل: استان‌های گیلان و مازندران است که ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک آن‌ها بر اساس پهنه‌بندی اقلیمی یونسکو در شش تیپ اقلیمی از اقلیم خشک با زمستان متوسط و تابستان خیلی گرم (تیپ یک، A-M-VW) تا اقلیم خیلی مرطوب با زمستان خنک و تابستان گرم (تیپ شش، PH-C-W) در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است (۸). روش پهنه‌بندی اقلیمی کشاورزی یونسکو شامل: رژیم رطوبتی بر اساس شاخص خشکی (نسبت بارندگی به تبخیر-تعرق مرجع)، تیپ‌های زمستان و تابستان بر اساس تقسیم‌بندی میانگین متوسط دما در سردترین و گرم‌ترین ماه سال بر اساس واکنش گیاهان زراعی است (جدول ۱). تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت فائو ۵۶ و پرستلی-تیلور بر اساس داده‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی دریافت شده از سازمان

هواشناسی کشوری سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ توسط پکیج Evapotranspiration در نرم‌افزار R محاسبه شد. میانگین سالانه تبخیر-تعرق مرجع در دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ از $1829/4 \text{ mm/year}$ در اقلیم خشک (ایستگاه بوشهر) تا $864/2 \text{ mm/year}$ در اقلیم خیلی مرطوب (ایستگاه رامسر) متغیر است (جدول ۱). داده‌های مجموع ۸ روزه PET محصول MOD16A2 در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ با کدنویسی در سامانه Google Earth Engine (GEE) به دست آمد. سامانه GEE می‌تواند برای دسترسی به حجم بالای اطلاعات از تصاویر ماهواره بدون نیاز به دانلود تصاویر با حجم بالا و پردازش‌های پیچیده و زمان‌بر در نرم‌افزارهای سنجش‌ازدور را در زمان کوتاهی فراهم کند (۹). در نهایت، مقایسه داده‌های مجموع ۸ روزه برآورد شده ایستگاه‌ها و ماهواره در دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ بر اساس شاخص‌های ارزیابی در پکیج HydroGOF در نرم‌افزار R انجام شد.



شکل ۱- پراکنش جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه به همراه تیپ‌های اقلیمی بر اساس تقسیم‌بندی یونسکو.

Figure 1. Geographical scattering of synoptic stations with their climate types based on the UNESCO method.

ثابت و برابر ۱/۲۶ برای حالت اشباع در نظر گرفته می‌شود (۷، ۲۳). هر چند ضریب α نیاز به کالیبره‌سازی، به‌ویژه در اقلیم‌های نیمه‌خشک و خشک و نواحی‌ای دارای باد شدید دارد (۱۶) اما در این پژوهش برای ساده‌سازی مقدار ۱/۲۶ در نظر گرفته می‌شود (۷).

نسخه ششم الگوریتم MOD16A2 سنجنده مدیس شامل محصولات تبخیر-تعرق پتانسیل (PET)، تبخیر-تعرق واقعی (ET)، میانگین شار گرمای نهان (LE) و شار گرمای نهان پتانسیلی (PLE) با توان تفکیک مکانی ۵۰۰ متری و توان تفکیک زمانی ۸ روزه و سالانه از اول ژانویه سال ۲۰۰۱ در دسترس است که در این پژوهش از داده‌های ۸ روزه استفاده می‌شود (۲۶). PET مجموع تبخیر از سطح خاک شامل: بخش اشباع پوشیده با آب (λE_{s_p}) و بخش مرطوب (λE_{s_wet})، تبخیر از بخش مرطوب پوشش گیاهی بعد از بارندگی یا رطوبت نسبی بیش‌تر از ۷۰٪ (λE_{c_wet}) و تعرق پتانسیل از پوشش گیاهی (λT_{c_p}) است که بر اساس واداشت‌های هواشناسی از داده‌های هواشناسی GMAO (NASA's Global Modeling and Assimilation Office) و محصولات دیگر سنجنده MODIS شامل ویژگی‌های دینامیکی گیاهی مانند LAI و FPAR، آلبیدو و پوشش سطح برآورد می‌شود. الگوریتم پنمن-مانتیت در برآورد λE_{s_p} ، λE_{s_wet} و λE_{c_wet} به کار می‌رود (روابط ۳-۵)، درحالی‌که λT_{c_p} (رابطه ۶) بر اساس الگوریتم پریستلی-تیلور برآورد می‌شود (۱۳، ۱۲).

$$\lambda E_{s_p} = \frac{(\Delta(R_n(1-f_c)-G) + \rho c_p(1-f_c)(e-e_s)/r_{as})(1-f_{wet})}{s + (1 + \frac{r_{ss}}{r_{as}})} \quad (3)$$

$$\lambda E_{s_wet} = \frac{(\Delta(R_n(1-f_c)-G) + \rho c_p(1-f_c)(e-e_s)/r_{as})f_{wet}}{s + (1 + \frac{r_{ss}}{r_{as}})} \quad (4)$$

$$\lambda E_{c_wet} = \frac{(\Delta R_n f_c + \rho c_p f_c (e - e_s) / r_{aws}) f_{wet}}{\Delta + (1 + \frac{r_{sw}}{r_{awc}})} \quad (5)$$

$$\lambda T_{c_p} = \frac{\alpha \Delta R_n f_c (1 - f_{wet})}{s + \gamma (1 + \frac{r_{sc}}{r_{ac}})} \quad (6)$$

تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ (رابطه ۱) تابعی از متغیرهای هواشناختی شامل: میانگین دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی است (۲).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n-G) + \gamma \frac{9000}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (1)$$

که در آن، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع ($\frac{mm}{day}$)، R_n میانگین روزانه شار تابش خالص ($MJm^{-2}day^{-1}$)، T میانگین دمای هوا در ارتفاع دوم‌تری ($^{\circ}C$)، u_2 متوسط سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (ms^{-1})، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار آب اشباع (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار آب اشباع-دما ($kPa^{\circ}C^{-1}$)، γ ثابت سایکرومتری ($kPa^{\circ}C^{-1}$) و G شار گرمایی خاک ($MJm^{-2}day^{-1}$) است.

روش تبخیر-تعرق پریستلی-تیلور یک معادله ترکیبی مبتنی بر تابش است که با متغیرهای هواشناختی شامل: تابش خورشیدی یا ساعات آفتابی و دماهای پیشینه و کمینه از رابطه ۲ برآورد می‌شود (پریستلی-تیلور، ۱۹۷۲)، به‌طوری‌که پارامتر اصلاح‌شده پریستلی-تیلور (α) جایگزین مقاومت سطح و مقاومت آئرو‌دینامیک در روش پنمن-مانتیت می‌شود (۲۳).

$$E_{pt} = \frac{\alpha \Delta (R_n - G)}{\lambda (\Delta + \gamma)} \quad (2)$$

که در آن، E_{pt} تبخیر-تعرق مرجع ($\frac{mm}{day}$)، λ گرمای نهان تبخیر ($MJkg^{-1}$) است و سایر متغیرها شامل: R_n ، Δ و γ نیز بر اساس روش پنمن-مانتیت فائو ۵۶ برآورد می‌شود. مقدار ضریب α بر اساس مطالعات

سیستماتیک زیاد در ضریب تعیین (R^2) در بسیاری از موارد، شاخص توافق اصلاح‌شده را به دلیل نداشتن حساسیت شاخص ضریب توافق ارائه‌شده توسط ویلموت (۱۹۸۴) به دلیل خطاهای سیستماتیک فرورآورد و بیش برآورد مدل و برآورد مقادیر بالاتر از ۰/۶۵ برای مدل‌هایی با خطای بالا، ارائه کردند (۱۳، ۳۰). شاخص توافق اصلاح‌شده (md) در محدوده صفر و یک تغییر می‌کند، به طوری که هرچه به یک (صفر) نزدیک‌تر باشد توافق مدل و مشاهدات بیش‌تر (کم‌تر) است. لازم به ذکر است که عدم دسترسی به تصاویر سنجنده مودیس، به دلیل شرایط ابرناکی در هنگام بارندگی و شرایط آلودگی شدید، در این پژوهش تحت عنوان داده‌های گمشده بررسی شد و در راستای دسترسی به نتایج دقیق در ارزیابی‌ها، در این پژوهش حذف شده‌اند.

که در آن‌ها، f_{wet} کسر پوشش گیاهی و کسر مرطوب سطح، r_{ac} و r_{sc} مقاومت آئروپنمیک و کانوپی در کانوپی خشک، r_{awc} و r_{swc} مقاومت آئروپنمیک و کانوپی در کانوپی مرطوب و r_{as} و r_{ss} مقاومت آئروپنمیک و کل در خاک است.

تبخیر-تغرق سنجنده MODIS و برآورد شده توسط داده‌های مشاهداتی با دو روش پنمن-مانتیت فائو ۵۶ و پرستیلی-تیلور بر اساس شاخص‌های ارزیابی شامل: شاخص‌های خطای اریبی (BIAS)، درصد خطای اریبی (PBIAS)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی پیرسون (ρ) و ضریب تعیین وزنی (WR^2) و ضریب توافق اصلاح‌شده (md) ارزیابی می‌شود (۲۷). کراوس و همکاران (۲۰۰۵) ضریب تعیین وزنی (WR^2) را به دلیل خطای

جدول ۱- ویژگی‌های جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی با تیپ‌های اقلیمی بر اساس تقسیم‌بندی یونسکو و میانگین سالانه تبخیر-تغرق مرجع پنمن-مانتیت فائو ۵۶ (۲۰۰۱-۲۰۱۸).

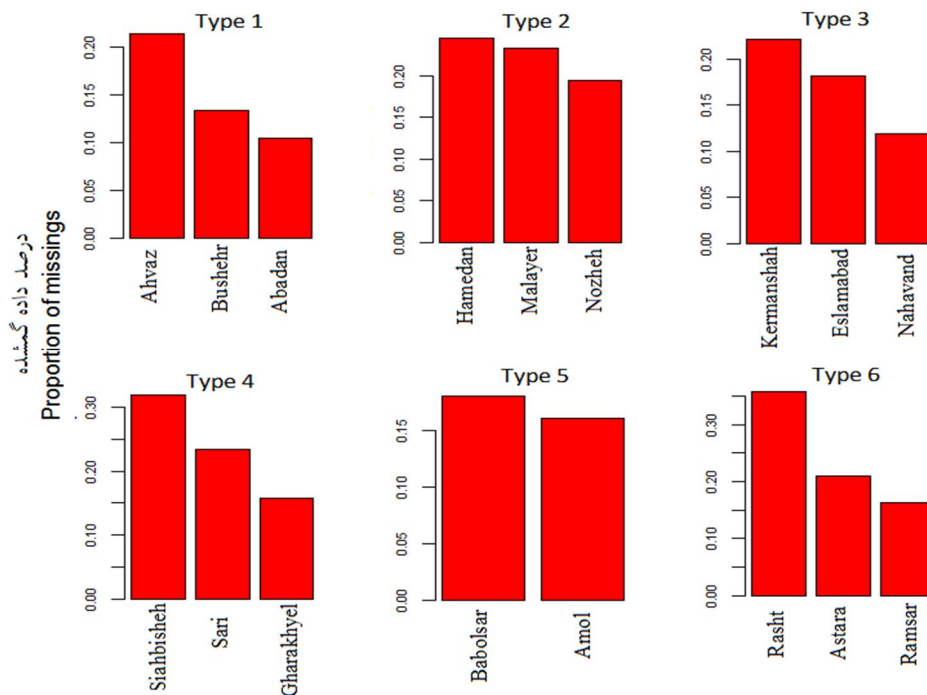
Table 1. Geographical characteristics of the meteorological stations with their climate types based on the UNESCO method and annual mean reference evapotranspiration of Penman-Montieth FAO (2001 and 2018).

تیپ اقلیمی Climate Type	نام ایستگاه Station	عرض جغرافیایی Lat. (N)	طول جغرافیایی Lon. (W)	ارتفاع (متر) Elevation (m)	میانگین سالانه تبخیر-تغرق (میلی‌متر بر سال) Annual Mean Evapotranspiration (mm/year)
۱: خشک، زمستان متوسط و تابستان خیلی گرم 1: Arid, Medium winter, and Very Warm summer (A-M-VW)	Abadan	30.37	48.21	6.6	1565.5
	Ahvaz	31.25	48.55	22.5	1979
	Bushehr	28.90	50.82	9	1829.4
۲: نیمه‌خشک، زمستان سرد و تابستان معتدل 2: Semi Arid, Cold winter and Mild summer (SA-K-M)	Hamedan	34.86	48.53	1740.8	1324.3
	Malayer	34.24	48.85	1776.5	1536.8
	Nozheh	35.19	48.69	1679.7	1372.7
۳: نیمه‌خشک، زمستان خنک و تابستان گرم 3: Semi Arid, Cool winter and Warm summer (SA-C-W)	Eslamabad-e-Gharb	34.11	46.46	1348.8	1475.4
	Kermanshah	34.35	47.15	138.5	1585.3
	Nahavand	34.14	48.41	1677.8	1410.9
۴: نیمه مرطوب، زمستان خنک و تابستان گرم 4: Semi Humid, Cool winter and Warm summer (SH-C-W)	Gharakhil	36.45	52.77	14.7	947.4
	Sari	36.53	52.98	23	957.1
	Siahbisheh	36.23	51.30	1855.4	1052.8
۵: مرطوب، زمستان خنک و تابستان گرم 5: Humid, Cool winter and Warm summer (H-C-W)	Amol	36.43	52.38	23.7	923.8
	Babolsar	36.72	52.65	-21	972.8
	Astara	38.36	48.85	-21.1	866.4
۶: خیلی مرطوب، زمستان خنک و تابستان گرم 6: Per Humid, Cool winter and Warm summer (PH-C-W)	Ramsar	36.90	50.67	-20	864.2
	Rasht	37.32	49.62	-8.6	876.7

نتایج و بحث

بررسی کسر داده‌های گمشده در ایستگاه‌های مورد مطالعه در اقلیم‌های متفاوت در دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ نشان از بالاترین داده گمشده در ایستگاه رشت در اقلیم خیلی مرطوب (۳۵/۸٪) به دلیل ابرناکی بالا دارد، در حالی که کمترین داده گمشده در ایستگاه آبادان در اقلیم خشک (۱۰/۳٪) به دلیل بارش کم و ابرناکی کمتر در این نواحی وجود دارد (شکل ۲). داده‌های گمشده در ایستگاه‌های واقع در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک (تیپ‌های اقلیمی یک تا سه) در محدوده ۱۰/۳٪ (آبادان) تا ۲۴/۵٪ (همدان) تغییر می‌کند (شکل ۲)، به طوری که بررسی سالانه داده‌ها نشان از عدم دسترسی به تصاویر در ماه‌های سرد سال

(نوامبر-فوریه) در تمام ایستگاه‌ها، به جز ایستگاه آبادان در سال ۲۰۰۸ در ماه‌های ژوئن و جولای احتمالاً به دلیل افزایش آلاینده‌ها دارد. داده‌های گمشده در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب تا مرطوب (تیپ چهار تا شش) دارای کمترین داده گمشده در اقلیم نیمه‌مرطوب در ایستگاه قراخیل (۱۵/۸٪) و بیشترین داده گمشده را در اقلیم خیلی مرطوب در ایستگاه رشت (۳۵/۸٪) دارد. همچنین بررسی روزانه داده‌های گمشده در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب تا خیلی مرطوب نشان‌دهنده عدم دسترسی به تصاویر هم در ماه‌های تابستان (جولای و ژوئن) و هم در ماه‌های سرد سال، به دلیل شرایط ابرناکی در این ماه‌ها است.

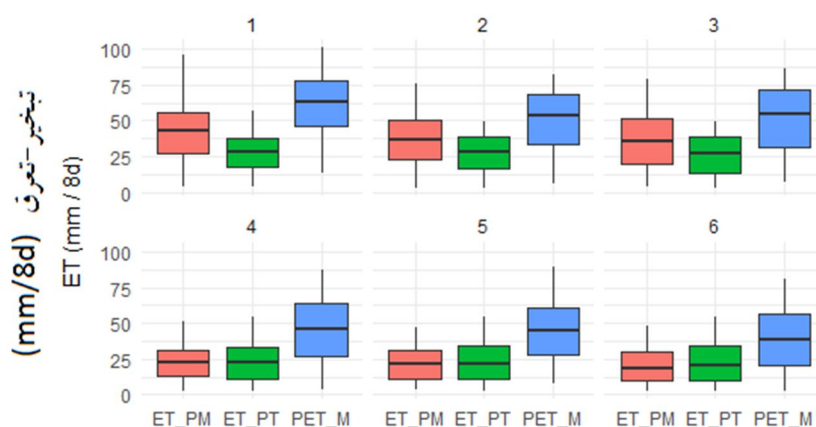


شکل ۲- نسبت داده‌های گمشده در تصاویر سنجنده مدیس در ایستگاه‌های مورد مطالعه در تیپ‌های اقلیمی متفاوت در دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۱۸.

Figure 2. The proportion of missing values in MODIS images at the studied stations at the different climate types between 2001 and 2018.

مشاهده می‌شود، در حالی که از اقلیم نیمه‌خشک به خشک (تیپ اقلیمی سه تا یک) اختلاف واریانس بین PET_M و ET_PM کاهش می‌یابد (کم‌ترین اختلاف در اقلیم خشک). مقایسه ویژگی‌های آماری شامل: بیشینه، کمینه و چارک‌های اول تا سوم بیانگر بیش‌ترین (کم‌ترین) اختلاف‌های PET_M با ET_PT (ET_PM) در تمام ویژگی‌های آماری، به‌جز کمینه، در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک (تیپ‌های اول تا سوم)، به‌ویژه اقلیم خشک (اقلیم نیمه‌خشک با زمستان سرد و تابستان معتدل، تیپ دو) و بیش‌ترین (کم‌ترین) اختلاف‌های PET_M با ET_PM (ET_PT) در تمام ویژگی‌های آماری در اقلیم‌های نیمه مرطوب تا خیلی مرطوب (تیپ‌های چهار تا شش)، به‌ویژه اقلیم مرطوب، تیپ پنج (اقلیم خیلی مرطوب) مشاهده می‌شود (شکل ۳).

بررسی باکس پلات مجموع ۸ روزه تبخیر-تعرق سنجنده مدیس (PET_M) با پنمن-مانتیث فائو ۵۶ (ET_PM) و پرستلی-تیلور (ET_PT) در تیپ‌های اقلیمی متفاوت نشان از بیش برآورد و واریانس فراوان تبخیر-تعرق سنجنده مدیس نسبت به دو روش دیگر در تمام تیپ‌های اقلیمی دارد، به‌طوری‌که سنجنده مدیس بیش‌ترین واریانس را به‌این ترتیب در اقلیم‌های نیمه‌خشک با زمستان خنک و تابستان گرم (تیپ سه) و خشک با زمستان متوسط و تابستان خیلی گرم (تیپ یک) و کم‌ترین واریانس را به ترتیب در اقلیم‌های نیمه مرطوب (تیپ پنج) و خیلی مرطوب (تیپ شش) را دارا است (شکل ۳). همچنین در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب تا خیلی مرطوب (تیپ‌های چهار تا شش) بیش‌ترین اختلاف واریانس بین PET_M با ET_PM (با بیش‌ترین اختلاف در اقلیم نیمه‌مرطوب)



شکل ۳- باکس پلات مجموع ۸ روزه تبخیر-تعرق مودیس (PET_M)، تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیث فائو ۵۶ (ET_PM) و تبخیر-تعرق پرستلی-تیلور (ET_PT) در تیپ‌های مختلف اقلیمی (۱-۶) در دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۱۸.

Figure 3. Box plots of eight daily sum of MODIS (PET-MT), Penman-Montieth FAO 56 (ET-PM), and Priestley-Taylor evapotranspiration from different climate types (1-6) between 2001 and 2018.

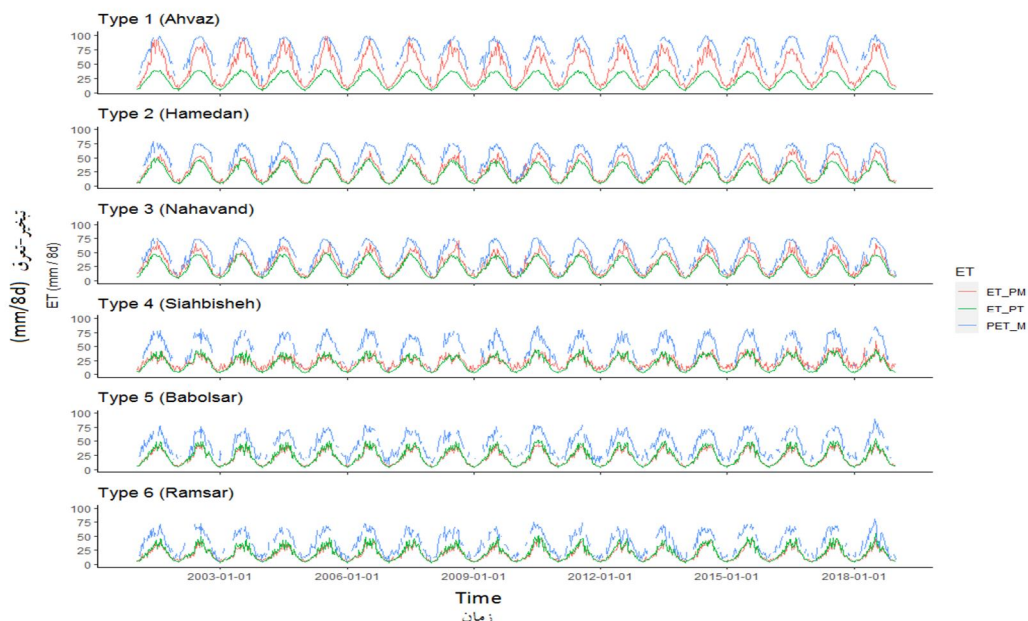
است، در حالی که اختلاف در ویژگی‌های آماری PET_M با ET_PM بیانگر بیش‌ترین اختلاف‌ها در اقلیم مرطوب (تیپ پنج)، با بیش‌ترین اختلاف در بیشینه (۴۲ mm/8d) و کم‌ترین اختلاف‌ها در تیپ اقلیمی نیمه‌خشک با زمستان سرد و تابستان

همچنین بررسی اختلاف در ویژگی‌های آماری PET_M با ET_PT نشان‌دهنده بیش‌ترین اختلاف‌ها در اقلیم خشک (تیپ یک)، با بیش‌ترین اختلاف در بیشینه (۴۴ mm/8d) و کم‌ترین اختلاف‌ها در اقلیم خیلی مرطوب، با کم‌ترین اختلاف در کمینه (mm/8d)

PET-M با ET_PM و ET_PT در تمام تیپ‌های اقلیمی، به‌ویژه با ET_PM در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک (تیپ‌های یک تا سه) و با ET_PT در اقلیم‌های نیمه مرطوب تا خیلی مرطوب (تیپ‌های چهار تا شش) دارد (شکل ۴). این انطباق روندهای فصلی سنجنده مودیس با نتایج شو و همکاران (۲۰۱۹) در برآورد صحیح چرخه فصلی تبخیر-تعرق در تمام محصولات متفاوت تبخیر-تعرق شامل: یادگیری ماشین، خروجی مدل‌های سطح خشکی‌ها و سنجنش‌ازدور شامل محصول MOD16A2 در ایالات‌متحده آمریکا در مقیاس حوضه‌ای و نقطه‌ای همسو است (۳۱). هم‌چنین مقایسه تاریخ‌های رخداد ماکزیمم PET_M با ET_PM و ET_PT در ایستگاه‌ها بیانگر انطباق بهتر وقوع ماکزیمم‌های PET_M با ET_PT در تمام تیپ‌های اقلیمی، با بیش‌ترین تطابق در ایستگاه سیاه‌بیشه در اقلیم نیمه‌مرطوب (۵ سال) است.

معتدل (تیپ دو)، به‌جز بیشینه و کمینه در اقلیم‌های خشک و خیلی مرطوب (اختلاف‌های $2/4 \text{ mm}/8\text{d}$ و $0/1 \text{ mm}/8\text{d}$) با کم‌ترین اختلاف در چارک اول ($10/6 \text{ mm}/8\text{d}$) است. این نتایج هم‌سو با نتایج مهدی‌زاده (۲۰۱۶) در خصوص لزوم کالیبره‌سازی ضریب α در رابطه پریستلی-تیلور در نواحی خشک و نیمه‌خشک، با توجه به فروبرآورد بیش‌تر پریستلی-تیلور نسبت به پنمن-مانتیث فائو ۵۶، است (۱۶). هم‌چنین کاهش اختلاف ET_PM با ET_PT در اقلیم‌های نیمه مرطوب تا خیلی مرطوب (تیپ‌های چهار تا شش)، با توجه به تعریف ضریب پریستلی-تیلور در خصوص کاربرد آن در نواحی مرطوب توافق کامل دارد (۱۶).

مقایسه روزانه PET_M (mm / 8d)، ET_PM و ET_PT در ایستگاه‌های منتخب (دارای کم‌ترین داده گمشده در تابستان) در تیپ‌های اقلیمی متفاوت نشان از انطباق روندهای فصلی افزایشی و کاهش



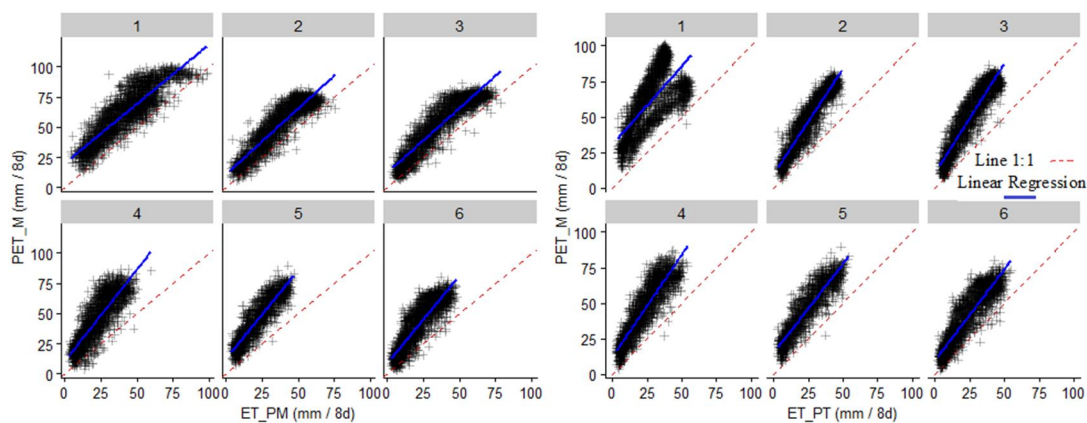
شکل ۴- مقایسه نمودار روزانه (۸ روزه) تبخیر-تعرق سنجنده مودیس (PET_M)، تبخیر-تعرق پریستلی-تیلور (ET_PT) و تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیث فائو ۵۶ (ET_PM) در ایستگاه‌های منتخب در تیپ‌های اقلیمی متفاوت در دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۱۸.

Figure 4. Comparing the 8 daily plot of MODIS (PET_M), Priestley-Taylor (ET_PT) and Penman-Montieth FAO56 evapotranspiration at some selected stations from different climate types during 2001-2018.

اقلیم خشک (تیپ یک) با بالاترین خطای اریبی (شکل ۵ و جدول ۲). همچنین اکثر فرورآوردهای سنجنده مودیس، به‌ویژه روش پنمن-مانتیت فائو ۵۶، در تبخیر-تعرق‌های کوچک رخ می‌دهد (شکل ۵). شو و همکاران (۲۰۱۹) این عدم قطعیت در تبخیر-تعرق MOD16A2 را به عدم وارد کردن اطلاعات کافی در برآورد تبخیر-تعرق شامل: متغیرهای چرخه آب (رطوبت خاک و بارندگی) و خطاهای ذاتی در داده‌های پوشش گیاهی ورودی (شاخص سطح برگ و کسر تابش فعال فتوسنتزی برآوردشده از تصاویر مودیس) مرتبط دانستند (۳۱). کمبود بخار آب اشباع از داده‌های بازتحلیلی GMAO در محصول MOD16A2 جایگزین بارش و رطوبت خاک می‌شود، در حالی‌که این داده‌های بازتحلیلی در مقیاس منطقه‌ای به دلیل توان تفکیک مکانی پایین ($1.25^\circ \times 1^\circ$) و خطا در ریزمقیاس نمایی آن‌ها به مقیاس مکانی پایین‌تر (۱۰۰۰ متری یا ۵۰۰ متری) دارای عدم قطعیت هستند (۱۰، ۲۵). همچنین سولیوان و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که عدم قطعیت داده‌های بازتحلیلی نسبت به داده‌های پوشش گیاهی تأثیر قابل‌توجهی در عدم قطعیت MOD16A2 دارد (۲۸).

بررسی اختلاف تاریخ‌های ماکزیمم در تمام ایستگاه‌ها در شکل ۴ نشان‌دهنده بیش‌ترین فراوانی در تقدم ۸ روزه در ماکزیمم PET_M نسبت به ET_PT و ET_PM در تمام اقلیم‌های مورد مطالعه، به‌جز اقلیم خشک با بیش‌ترین تأخیر ۸ روزه (۱۱ فراوانی)، است، به طوری‌که بیش‌ترین فراوانی نیز در اقلیم خیلی مرطوب (فراوانی ۲۲) رخ می‌دهد. همچنین اختلاف کمینه‌های PET_M با هر دو روش برآوردشده نسبت به بیشینه‌ها در تمام تیپ‌های اقلیمی، به‌ویژه اقلیم‌های مرطوب و خیلی مرطوب، کم‌تر است. این نتایج همسو با نتایج مورایس و همکاران (۲۰۱۹) در مقایسه داده‌های PET_M با تبخیر-تعرق هارگریوز در ایالت Goias در برزیل با تطابق بهتر مودیس در ماه‌های بارانی نسبت به ماه‌های خشک طی سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ است (۱۲).

نمودارهای پراکنش تبخیر-تعرق مجموع ۸ روزه سنجنده مودیس با پنمن-مانتیت فائو ۵۶ و پرستلی-تیلور بیانگر بیش برآورد اکثر داده‌های سنجنده مودیس نسبت به دو روش دیگر در تمام تیپ‌های اقلیمی، به دلیل واقع شدن اکثر نقاط در بالای خط نیمساز ۱:۱ است، به طوری‌که سنجنده مودیس بیش‌ترین بیش برآورد را در برآورد پرستلی-تیلور در



شکل ۵- نمودار پراکنش ۸ روزه تبخیر-تعرق مرجع سنجنده MODIS (PET_M) با تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ (ET_PM) و پرستلی-تیلور (ET_PT) در تیپ‌های اقلیمی متفاوت (۱-۶) به همراه خط نیمساز و خط رگرسیون در دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۱۸.

Figure 5. The eight 8daily scatterplots of MODIS (PET_M) with Penman-Monteith FAO56 (ET_PM) and Priestley-Taylor (ET_PT) evapotranspiration along with 1:1 and regression lines at the different climate types (1-6) during 2001-2018.

۰/۳۷)، به‌ویژه در اقلیم خیلی مرطوب (تیپ اقلیمی شش) است. مقایسه خطاهای سنجنده مودیس با هر دو روش شامل: BIAS، PBIAS و RMSE نشان از خطاهای بسیار کوچک‌تر سنجنده مودیس در تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ در اقلیم‌های نیمه‌خشک دارد. هم‌چنین هر چه از اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک به سمت اقلیم‌های نیمه مرطوب تا خیلی مرطوب می‌رویم اختلاف در شاخص‌های ارزیابی PET_M با ET_PM و ET_PT به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (جدول ۲).

مقایسه ضرایب همبستگی پیرسون نیز بین تبخیر-تعرق سنجنده مودیس با تبخیر-تعرق پنمن مانیت فائو ۵۶ و پریستلی-تیلور در تیپ‌های مختلف اقلیمی نشان از بیش‌ترین ضریب همبستگی بین تبخیر-تعرق سنجنده مودیس و پریستلی-تیلور اقلیم نیمه خشک با زمستان سرد و تابستان معتدل (۰/۹۴) و کم‌ترین ضریب همبستگی بین تبخیر-تعرق سنجنده مودیس و پریستلی-تیلور در اقلیم خشک (۰/۷۱) دارد (شکل ۶). به‌طورکلی ضرایب همبستگی تبخیر-تعرق سنجنده مودیس و تبخیر-تعرق پنمن مانیت فائو ۵۶ دارای محدوده تغییرات کوچک‌تری (محدوده ۰/۸۶-۰/۹۲) نسبت به ضرایب همبستگی تبخیر-تعرق سنجنده مودیس و پریستلی-تیلور (محدوده ۰/۷۱-۰/۹۴) است و اختلاف‌های کوچکی در ضرایب همبستگی بین سنجنده مودیس با پنمن مانیت فائو ۵۶ و پریستلی-تیلور در تمام تیپ‌های اقلیمی، به‌جز اقلیم خشک، مشاهده می‌شود. بیش‌ترین اختلاف در ضرایب همبستگی در تبخیر-تعرق سنجنده مودیس با تبخیر-تعرق پنمن مانیت فائو ۵۶ (ضریب همبستگی ۰/۸۸) و پریستلی-تیلور (ضریب همبستگی ۰/۷۱) در اقلیم خشک رخ می‌دهد که بیانگر رابطه خطی قوی‌تری بین تبخیر-تعرق سنجنده مودیس و پنمن مانیت فائو ۵۶ نسبت به تبخیر-تعرق سنجنده مودیس و پریستلی تیلور است.

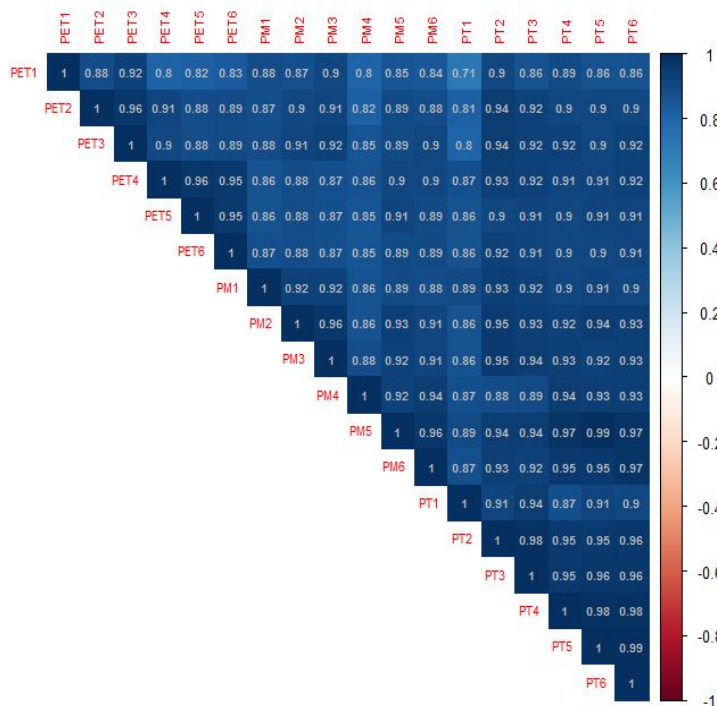
مقایسه پراکندگی داده‌های سنجنده مدیس نسبت به پریستلی-تیلور و پنمن-مانتیت فائو ۵۶ حول خط رگرسیون نشان‌دهنده پراکندگی بیش‌تر داده‌های سنجنده مدیس نسبت به پریستلی-تیلور (پنمن-مانتیت فائو ۵۶) در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک (نیمه‌مرطوب تا خیلی مرطوب) حول خط رگرسیون است. هم‌چنین ضریب تعیین وزنی (WR^2) سنجنده مدیس با پنمن-مانتیت فائو ۵۶ مقادیر بزرگ‌تری در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک (۰/۶۳-۰/۵۵)، با بالاترین مقدار در اقلیم نیمه‌خشک با زمستان سرد و تابستان معتدل (تیپ دو)، نسبت به اقلیم‌های نیمه‌مرطوب تا خیلی مرطوب (۰/۵۱-۰/۴۴) دارد (جدول ۲)، بنابراین پراکندگی داده‌های بیش‌تر تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ (حدود ۵۵٪ تا ۶۳٪ داده‌ها) توسط سنجنده در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک مدیس تعیین می‌شود (جدول ۲).

بر اساس شاخص‌های ارزیابی در تیپ‌های اقلیمی مختلف، بالاترین و پایین‌ترین خطاهای PET_M در اقلیم خشک با ET_PT و در اقلیم نیمه‌خشک با تابستان سرد و زمستان معتدل (تیپ دو) با ET_PM است (جدول ۲). هم‌چنین PET_M در برآورد ET_PM در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک (تیپ‌های یک تا سه) دارای خطاهای کم‌تر BIAS (محدوده ۱۹/۲ mm/8d - ۱۴/۴ mm/8d)، PBIAS (محدوده ۴۰/۱٪ - ۴۶/۵٪) و RMSE (محدوده ۲۲/۲ mm/8d - ۱۶/۷ mm/8d) و ضریب توافق بالاتر (۰/۶۱-۰/۵۰)، به‌ویژه در نیمه‌خشک با زمستان سرد و تابستان معتدل (تیپ دو) است، درحالی‌که در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب تا خیلی مرطوب (تیپ‌های چهار تا شش) PET_M در مقایسه با ET_PT دارای خطاهای کم‌تر BIAS (محدوده ۲۲/۸ mm/8d - ۱۶/۲ mm/8d)، PBIAS (محدوده ۲۴/۵ mm/8d - ۱۸/۶ mm/8d) و RMSE (محدوده ۹۷/۵٪ - ۷۲/۵٪) و ضریب توافق بالاتر (۰/۵۰-)

جدول ۲- ارزیابی تبخیر-تعرق مرجع ۸ روزه سنجنده MODIS (PET_M) با تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ (ET_PM) و پرستلی-تیلور (ET_PT) بر اساس شاخص‌های ارزیابی در تیپ‌های اقلیمی متفاوت در دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۱۸.

Table 2. Evaluation of 8daily sum of MODIS evapotranspiration (PET_M) with Penman-Monteith FAO 56 (ET_PM) and Priestley-Taylor (ET_PT) evapotranspiration at the different climate types during 2001 – 2018.

تیپ اقلیمی Climate type	حجم نمونه Number of samples	تبخیر تعرق Evapotranspiration	خطای اریبی BIAS (mm/8d)	میانگین مربعات خطا RMSE (mm/8d)	ضریب تعیین وزنی WR ²	ضریب توافق اصلاح شده md	درصد خطای اریبی PBIAS (%)
1	2110	ET_PM	19.6	22.2	0.55	0.50	46.5
		ET_PT	33.5	36.9	0.24	0.26	118.2
2	1923	ET_PM	14.4	16.7	0.63	0.61	40.1
		ET_PT	23.1	24.8	0.38	0.38	84.8
3	2052	ET_PM	15.1	17.3	0.61	0.59	42
		ET_PT	24.9	27	0.47	0.37	95
4	1895	ET_PM	22.4	25.5	0.38	0.34	98.8
		ET_PT	22.3	24.5	0.44	0.37	97.7
5	1374	ET_PM	22.8	24.8	0.42	0.33	104.7
		ET_PT	21.2	22.8	0.47	0.39	90.5
6	1880	ET_PM	18.1	21.1	0.43	0.42	88.5
		ET_PT	16.2	18.6	0.51	0.50	72.5



شکل ۶- ضرایب همبستگی پیرسون بین تبخیر-تعرق مودیس (PET) با تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ (PM) و تبخیر-تعرق پرستلی-تیلور (PT) در سطح معناداری ۵٪ در اقلیم‌های متفاوت در دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۱۸ (اعداد بعد از PET, PT, PM بیانگر تیپ‌های اقلیمی هستند).

Figure 6. Pearson correlation coefficients among MODIS (PET), Penman-Montieth FAO 56 (PM), and Priestley-Taylor (PT) evapotranspiration at the 5% significant level at the different climate type during 2001-2018 (The numbers which come after PET, PT, and PM show the type of climate).

پریستلی-تیلور دارد، درحالی که در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک اختلاف کم‌تری بین سنجنده مدیس با تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ وجود دارد. هم‌چنین سنجنده مدیس چرخه فصلی تبخیر-تعرق را به‌خوبی برآورد می‌کند، اما در برآورد بیشینه تبخیر-تعرق اکثراً تقدم ۸ روزه دارد. MOD16A2 عملکرد مناسبی در برآورد تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ در تیپ‌های اقلیمی خشک تا نیمه‌خشک به‌ویژه نیمه‌خشک، به‌دلیل خطاهای کم‌تر مدل، بالا بودن ضرایب اصلاح‌شده توافق و وزنی تبیین دارد، درحالی که در نواحی دارای اقلیم نیمه‌مرطوب تا خیلی مرطوب (به‌ویژه خیلی مرطوب) تبخیر-تعرق MOD16A2 توافق خوبی با تبخیر-تعرق پریستلی-تیلور، با توجه به خطاهای کم‌تر و ضرایب همبستگی، توافق اصلاح‌شده و وزنی تبیین بالاتر دارد. این عدم قطعیت در MOD16A2 می‌تواند ناشی از خطای داده‌های ورودی در برآورد تبخیر-تعرق شامل: متغیرهای هواشناختی داده‌های بازتحلیلی GMAO و شاخص‌های گیاهی (شاخص LAI و کسر تابش فعال فتوسنتزی) است. به‌طور کلی تبخیر-تعرق PET محصول MOD16A2 سنجنده مدیس کم‌ترین عدم قطعیت را با تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ در نواحی خشک و نیمه‌خشک دارد. بنابراین با توجه به پیشنهاد سازمان جهانی فائو مبنی بر کاربرد روش تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ به‌عنوان روش استاندارد در مناطق فاقد اندازه‌گیری لایسمتری، تبخیر-تعرق MOD16A2 می‌تواند در نواحی فاقد داده واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک نقش قابل‌توجهی در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و مدیریت منابع آب در کوتاه‌مدت و بلندمدت داشته باشد.

نتایج این پژوهش در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک با نتایج نادزری و هشیم (۲۰۱۴) در خصوص تطابق بهتر تبخیر-تعرق سنجنده مدیس با پنمن مانتیت فائو ۵۶ نسبت به دیگر روش‌ها شامل: هارگریوز-سامانی، پریستلی-تیلور و تورنت وایت، به‌دلیل خطاهای کوچک‌تر در ایستگاه‌های هواشناسی واقع در نزدیکی زمین‌های زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مالزی در سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۱۱ تطابق دارد، درحالی که در نواحی دارای پوشش جنگل (مرطوب و خیلی مرطوب شمال ایران) تا حدودی متفاوت است (۲۱). هم‌چنین خطای بالای سنجنده مدیس در برآورد تبخیر-تعرق با هر دو روش در اقلیم‌های نیمه مرطوب تا خیلی مرطوب با نتایج خان و همکاران (۲۰۱۸) در ارزیابی تبخیر-تعرق واقعی در مزارع برنج و جنگل‌های آسیا توافق دارد، به‌طوری‌که این عدم قطعیت می‌تواند ناشی از بیش برآورد کمبود بخار اشباع داده‌های GMA در نواحی دارای رطوبت خاک بالا و دقت پایین داده‌های شاخص سطح برگ (به‌دلیل برآورد بیش‌تر مساحت سایه‌انداز بزرگ‌تر در نواحی جنگلی) و در نتیجه بیش برآورد کسر تابش فعال فتوسنتزی باشد (۱۴).

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش به ارزیابی هفتگی تبخیر-تعرق پتانسیل سنجنده مدیس با تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت فائو ۵۶ و پریستلی-تیلور در مقیاس نقطه‌ای (ایستگاهی) در اقلیم‌های متفاوت ایران در دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ می‌پردازد. سنجنده مدیس تبخیر-تعرق را در تمام تیپ‌های اقلیمی فرابراورد می‌کند و دارای واریانس بیش‌تری نسبت دو روش دیگر است. ویژگی‌های آماری تبخیر-تعرق پتانسیل محصول MOD16A در تیپ‌های اقلیمی نیمه‌مرطوب تا خیلی مرطوب، به‌ویژه خیلی مرطوب، اختلاف کم‌تری با

دانشگاه بوعلی‌سینا طی سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ به اجرا درآمده است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

تقدیر و تشکر

از سازمان هواشناسی کشور به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های موردنیاز سپاسگذاری می‌شود.

داده‌ها و اطلاعات

پژوهش حاضر حاصل بخش‌هایی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد می‌باشد که در دانشکده کشاورزی

منابع

- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., and Pereira, L. 1994. An Update for the Definition of Reference Evapotranspiration AND An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration. ICID Bull Int Comm Irrig Drain. Pp: 1-34.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., and Ab, W. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Wright, J.L., Howell, T.A., Ventura, F., Snyder, R., et al. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. Agric. Water Manag. 81: 1-2. 1-22.
- Anabalón, A., and Sharma, A. 2017. On the divergence of potential and actual evapotranspiration trends: An assessment across alternate global datasets. Earths Future. 5: 9. 905-917.
- Cleugh, H.A., Leuning, R., Mu, Q., and Running, SW. 2007. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. Remote Sens. Environ. 106: 3. 285-304.
- Courault, D., Seguin, B., and Oliosio, A. 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. Irrig. Drain. Syst. 19: 3. 223-249.
- Eichinger, W.E., Parlange, M.B., and Stricker, H. 1996. On the concept of equilibrium evaporation and the value of the Priestley-Taylor coefficient. Water Resour. Res. 32: 1. 161-164.
- Ghaffari, V., Ghasemi, V.R., and Pauw, E. 2015. Agro climatically zoning of Iran by UNESCO approach. J. Dryland Agric. 4: 1. 63-74. (In Persian)
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sens Environ. 202: 18-27.
- Hu, G., Jia, L., and Menenti, M. 2015. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapo- transpiration products over Europe for 2011. Remote Sens. Environ. 156: 510-526.
- Jabloun, M., and Sahli, A. 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data. Agric Water Manag. 95: 6. 707-715.
- Jovanovic, N., Mu, Q., Bugan, R., and Zhao, M. 2015. Dynamics of MODIS evapotranspiration in South Africa. Water SA. 41: 1. 79-91.
- Krause, P., Boyle, D.P., and Båse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Adv. Geosci. 5: 89-97.
- Khan, M.S., Liaqat, U.W., Baik, J., and Choi, M. 2018. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. Agric. For. Meteorol. 25: 256-268.
- Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, RAM.,

- Fernández-Prieto, D., et al. 2017. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geosci Model Dev.* 10: 5. 1903-1925.
16. Mehdizadeh, S., Saadatnejadgharahassanlou, H., and Behmanesh, J. 2017. Calibration of Hargreaves–Samani and Priestley–Taylor equations in estimating reference evapotranspiration in the Northwest of Iran. *Arch. Agron. Soil Sci.* 63: 7. 942-955.
17. Moradi, F., Kamali, G., and Vazifedoost M. 2015. Evaluation of Potential Evapotranspiration from MODIS Product Using Synoptic Stations of Zanjan Province. *Res Climatol.* Pp: 39-49. (In Persian)
18. Moraes, V.H., Giongo, P.R., Arantes, B.H.T, Costa, E.M., Ventura, M.V.A., Cavalcante, T.J., et al. 2019. Evaluation of Precipitation and Evapotranspiration Obtained by Remote Sensing With Meteorological Stations in the State of Goiás. *J. Agric. Sci.* 11: 4. 356-36.
19. Mu, Q., Heinsch, F.A., Zhao, M., and Running, S.W. 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sens Environ.* 111: 4. 519-536.
20. Mu, Q., Zhao, M., and Running, S.W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.* 115: 8. 1781-1800.
21. Nadzri, M.I., and Hashim, M. 2014. Validation of MODIS Data for Localized Spatio-Temporal Evapotranspiration Mapping. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 18: 1. 012183.
22. Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome J., Cramer, W., Christ, R., et al. 2014. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC 2014.
23. Priestley, C., and Taylor, R.J. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Mon. Weather Rev.* 100: 2. 81-92.
24. Reyes-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Hay, C., and Ahiablame, L. 2018. Estimation of Crop Evapotranspiration Using Satellite Remote Sensing-Based Vegetation Index. *Adv. Meteorol.* 2018: 1. 1-12.
25. Ruhoff, A.L., Paz, A.R., Aragao, L., Mu, Q., Malhi, Y., Collischonn, W., et al. 2013. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modeling in the Rio Grande basin. *Hydrol. Sci. J.* 58: 8. 1658-1676.
26. Running, S.W., Mu, Q., Zhao, M., and Moreno, A. 2019. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6).
27. Senay, G.B., Budde, M.E., and Verdin, J.P. 2010. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: Validation with the METRIC model. *Agric. Water Manag.* 98: 4. 606-618.
28. Sullivan, R.C., Cook, D.R., Ghate, V.P., Kotamarthi, V.R., and Feng, Y. 2019. Improved spatiotemporal representativeness and bias reduction of satellite-based evapotranspiration retrievals via use of in situ meteorology and constrained canopy surface resistance. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 124: 2. 342-352.
29. Westerhoff, R.S. 2015. Remote Sensing of Environment Using uncertainty of Penman and Penman – Monteith methods in combined satellite and ground-based evapotranspiration estimates. *Remote Sens Environ.* 169: 102-112.
30. Willmott, C.J. 1984. On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography. *Spatial statistics and models.* Springer, Dordrecht, Pp: 443-460.
31. Xu, T., Guo, Z., Xia, Y., Ferreira, V.G., Liu, S., Wang, K., Yao, Y., Zhang, X. and Zhao, C. 2019. Evaluation of twelve evapotranspiration products from machine learning, remote sensing, and land surface models over the conterminous United States. *J. Hydrol.* 578: 12405.

32. Zhang, K., Kimball, J.S., and Running, S.W. 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdiscip. Rev. Water*. 3: 6. 834-853.

33. Zhang, K., Zhu, G., Ma, J., Yang, Y., Shang, S., and Gu, C. 2019. Parameter Analysis and Estimates for the MODIS Evapotranspiration Algorithm and Multiscale Verification. *Water Resour. Res.* 55: 3. 2211-2231.



The Evaluation of Evapotranspiration Product of MODIS with Penman-Montieth FAO 56 and Priestley-Taylor Evapotranspiration at the Different Climate Types of Iran

M. Khodamorad Pour^{*1} and L. Ghavi²

¹Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University,

²M.Sc. Graduate, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University

Received: 01.06.2021; Accepted: 05.24.2021

Abstract

Background and Objectives: Evapotranspiration is one of the most critical components in the land branch of the hydrological cycle, which, as the link between water and energy cycles, plays an essential role in the interaction of the atmosphere and surface. Getting access to remote sensing images has made it possible to study evapotranspiration spatially and temporally, including actual evapotranspiration (AET) and potential evapotranspiration (PET). Evapotranspiration of the MOD16A2 MODIS sensor can be very useful among remote sensing images due to its very appropriate spatial (500 m) and temporal (8 daily) resolutions in regional studies in areas without data.

Materials and Methods: This study evaluated the MODIS global terrestrial potential evapotranspiration product (MOD16A2) using two reference evapotranspiration methods of Penman-Monteith FAO 56 and Priestley-Taylor in meteorological stations from 2001 to 2018. The study area is located in the southwestern provinces of Iran (Khuzestan and Bushehr), west of Iran (Hamedan and Kermanshah provinces), and north of Iran (Guilan and Mazandaran provinces), which is classified from arid to hyper humid according to the UNESCO method. Then, Penman-Monteith FAO 56 and Priestley-Taylor reference evapotranspiration was prepared using meteorological data with the Evapotranspiration package R software, and the potential evapotranspiration data of the MOD16A2 product was provided using the Google Earth Engine system. Then, these data were compared based on evaluation metrics in different climates.

Results: Compared to both the Penman-Monteith FAO 56 and Priestley-Taylor methods, the MOD16A2 product overestimates evapotranspiration in all climate types and has a greater variance in data. The statistical properties of the MOD16A2 include: the first and third quarters in arid and semi-arid climates with Penman-Monteith FAO 56 evapotranspiration is less different than the Priestley-Taylor method. In contrast, the first and third quarters of the MOD16A2 are more similar to the Priestley-Taylor evapotranspiration in semi-humid, humid, and perhumid climates. MOD16A2 also estimates the seasonal evapotranspiration cycles well, but the date of the MOD16A2 peaks in all climate types occur mostly with one-week precedence. The evapotranspiration of the MOD16A2 is successful in estimating the Penman-Monteith (Priestley-Taylor) evapotranspiration in arid and semi-arid climates (semi-humid to perhumid climates), particularly semi-arid with cold winters and hot summers climate (per humid climate), due to the small errors of the model, including PBIAS and RMSE respectively

* Corresponding Author; Email: mkhodamorad@basu.ac.ir

in the range of 40.3-46.5% and $14.19-6.6 \frac{mm}{8d}$ (the range of 72.5-97% and $6-24.5 \frac{mm}{8d}$), the high coefficient of the modified agreement index in the range of 0.5-0.61 (0.37-0.5), weighted determination in the range of 0.55-0.63 (0.44-0.51). Moreover, there is a strong positive linear relationship among MOD16A2, Priestley-Taylor, and Penman-Monteith in most climate types, because of their high correlation coefficients (more than 0.85).

Conclusion: The results of this study indicate less uncertainty in evapotranspiration of the MOD16A2 product with the Penman-Monteith FAO 56 method in the semi-arid and arid climates, especially semi-arid climates. In contrast, in the semi-humid to perhumid climates, MOD16A2 product has less uncertainty with the Priestley-Taylor method. Also, the MOD16A2 product has the least uncertainty in the semi-arid climates due to the least errors. Therefore, considering the recent climate change in terms of increasing temperature and consequently increasing evapotranspiration, particularly in arid and semi-arid regions around the world, and proposing the Penman-Monteith FAO 56 as the standard method of estimating evapotranspiration by FAO, the MOD16A2 evapotranspiration can play a crucial role in irrigation planning, water resources management, and monitoring drought in the arid and semi-arid climates without any observed dataset, especially semi-arid climates.

Keywords: Modis Sensor, MOD16A2, Penman-Monteith FAO 56 Evapotranspiration, Potential Evapotranspiration, Priestley-Taylor Evapotranspiration