

برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور به منظور بهبود مدیریت آب

محدثه السادات فخار¹، عباس کاویانی^{2*}

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: Fakhar.ikiu@gmail.com

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: kaviani@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

کمی‌سازی مکانی ET واقعی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی در مناطق خشک بسیار مهم است. در این پژوهش به بررسی و برآورد تبخیر-تعرق بر اساس الگوریتم‌های Py_SEBAL و METRIC، مدل WaPOR و محصول MOD16 در طی سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ در دشت مغان واقع در استان اردبیل پرداخته شد. نتایج هر یک از مدل‌ها با روش FAO-56 که یک روش استاندارد برای برآورد تبخیر-تعرق در مناطق مختلف است مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم Py_SEBAL با مقدار $R=0.97$ و $RMSE=1.88$ (mm/month) بیشترین میزان همبستگی را با مقدار FAO-56 دارد. سپس، الگوریتم METRIC با مقدار $R=0.89$ و $RMSE=1.5$ (mm/month) بیشترین میزان همبستگی را داشته است. به منظور اعتبارسنجی دقیق‌تر عملکرد مدل‌های برآوردی در مناطق مختلف، از پایگاه WaPOR نیز استفاده شد. خروجی‌های بدست آمده نشان می‌دهد که در بین اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری الگوریتم Py_SEBAL با مقدار $R^2=0.77$ بیشترین میزان همبستگی را با مقادیر حاصل از WaPOR دارد. بعد از Py_SEBAL، METRIC با مقدار $R^2=0.55$ همبستگی به نسبت مناسبی را دارد. با توجه به نقشه کاربری منطقه، بیش از ۶۰ درصد اراضی این منطقه تحت پوشش شبکه آبیاری قرار دارند. از آنجایی که Py_SEBAL در بررسی‌های انجام شده بهترین نتیجه را برای بررسی در این اراضی داشته است لذا به برآورد حجم میزان تبخیر-تعرق در سطح کل منطقه پرداخته شد که نتایج حاصله نشان می‌دهد، حجم میزان تبخیر-تعرق از سطح برابر از اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری و اراضی دیم حدود ۴/۵ برابر در هر هکتار بیشتر است.

کلیدواژه: دشت مغان، METRIC، MOD16، Py_SEBAL، WaPOR

مقدمه:

تبخیر-تعرق (ET) یکی از مؤلفه‌های کلیدی در چرخه آب در طبیعت است و از عوامل اساسی در آبیاری، برآورد عملکرد محصولات کشاورزی، جنگلداری و مدیریت محیطی می‌باشد (Maroufpoor et al., 2020). تبخیر-تعرق شامل انتقال بخار آب از سطح زمین به جو به دلیل تبخیر از سطح خاک و آب و تعرق از سطح پوشش گیاهی است (Wang et al., 1996). با توجه به ارتباط بیلان آبی و انرژی در برهم‌کنش سطح و جو، تبخیر-تعرق نقش بسیار مهمی در این فرایند دارد. برآورد صحیح تبخیر-تعرق، می‌تواند منجر به برآورد صحیح شارهای انرژی شود (S. Li et al., 2021). تغییرات اقلیمی و گرمای جهانی باعث افزایش ظرفیت

بخار آب در جو می‌شود. این افزایش ظرفیت به دلیل افزایش تبخیر-تعرق اتفاق می‌افتد و باعث شتاب در چرخه هیدرولوژی می‌شود که می‌تواند تأثیرات جدی بر روی اقتصاد، محیط زیست و جامعه داشته باشد (Pachauri et al., 2014). تبخیر-تعرق شامل تبخیر-تعرق پتانسیل، مرجع و واقعی است (Zhang et al., 2007). به طور کلی تبخیر-تعرق واقعی، مقدار واقعی بخار آب وارد شده از سطح به جو و تبخیر-تعرق پتانسیل، حداکثر توان تبخیری جو از سطح، بدون محدودیت آب را نشان می‌دهد (Li et al., 2023). با توجه به نامشخص بودن نوع پوشش گیاهی، تبخیر-تعرق پتانسیل وابسته به متغیرهای هواشناسی (تابش خورشیدی، باد و دما) است (Wu et al., 2020). تبخیر-تعرق مرجع (ET_0)، در شرایط استاندارد برای گیاه چمن با ارتفاع یکنواخت ۱۲ سانتیمتر، ارائه شده است (Allen, 1977). به طور کلی تبخیر-تعرق به دو روش مستقیم و غیر مستقیم محاسبه می‌شود (Vorobevskii et al., 2022). در روش مستقیم از لایسمتر یا سنتیلومتر و EC^1 استفاده می‌شود (KANG and Cho, 2021). برای تخمین تبخیر-تعرق نقطه‌ای، معادله پنمن-مانتیث که توسط سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) پیشنهاد شده است، از متغیرهای پایش شده مانند رطوبت و دمای هوا که معمولاً توسط ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند، استفاده می‌شود. اگرچه اندازه‌گیری‌های مستقیم مزایا و معایب خود را دارند، اما معادله پنمن-مانتیث همچنان یکی از روش‌های پر استفاده برای تخمین تبخیر-تعرق نقطه‌ای است. (Allen et al., 1998a; Paredes and Pereira, 2019). با توجه به تغییرات مکانی عوامل مؤثر در تبخیر-تعرق، استفاده از روش‌های نقطه‌ای برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق در سطوح وسیع، به دلیل هزینه‌بر و زمان‌بر بودن نصب، نگهداری و بهره‌برداری از آنها دشوار است و این روش‌ها به دلیل تغییرات پویا و منطقه‌ای در تبخیر-تعرق، قابل تعمیم در سطوح وسیع نیستند. بنابراین، برای اندازه‌گیری‌های معمول در سطح وسیع به‌طور چشمگیری مناسب نیستند (Pereira et al., 2021). روش‌های دیگر برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق عمدتاً مبتنی بر رویکردهای مدل‌سازی فناوری ماهواره‌ای سنجنش از دور هستند. این روش‌ها شامل شاخص تراز انرژی سطحی ساده (S-SEBI) (Roerink et al., 2000)، سیستم تعادل انرژی سطحی (SEBS) (Su, 2002)، بیان انرژی دو منبعی (TSEB) (Song et al., 2016)، نقشه‌برداری تبخیر-تعرق با درون‌سازی کالیبراسیون (METRIC) (Allen et al., 2007) و الگوریتم بیان انرژی سطحی برای زمین (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998) می‌باشند. تمرکز اصلی روش‌های نقطه‌ای بر تعیین تبخیر-تعرق (ET) در مقیاس نقطه‌ای یا مناطق کوچک است و برای تخمین آن در مقیاس گسترده با مشکلاتی مواجه است. از سوی دیگر، در روش سنجنش از دور از طریق جمع‌آوری داده‌های سطح زمین در طول زمان و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، راهی برای تخمین دقیق ET در مناطق گسترده فراهم می‌شود (Chen et al., 2005). بنابراین، برای شبیه‌سازی ET منطقه‌ای، تکنیک‌های سنجنش از دور بر اساس رویکردهای مدل‌سازی فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند و به دلیل دقت بالاتر آنها، تحقیقات بیشتری در این حوزه انجام می‌شود (Elmer et al., 2019). در میان الگوریتم‌های مختلف، الگوریتم SEBAL به طور گسترده به منظور برآورد تبخیر-تعرق منطقه‌ای استفاده می‌شود (Teixeira et al., 2009; Usman et al., 2015)، این الگوریتم اولین بار توسط Bastiaanssen و همکاران توسعه یافت و سپس توسط آلن و همکاران بهبود یافته شد (Waters et al., 2002). SEBAL یکی از مدل‌های برتر در زمینه مطالعات آب و هوا است که در مقایسه با سایر مدل‌ها، مزایایی از جمله مفاهیم فیزیکی واضح، نیاز کم به داده‌های هواشناسی، دسترسی آسان به داده‌ها، دقت بالا و کاربرد جهانی برای آب و هوای مختلف را داراست (Yang et al., 2018). اگرچه الگوریتم SEBAL در محاسبه تبخیر-تعرق با موفقیت بسیار بالایی روبرو شده است، اما این الگوریتم به فردی متخصص برای انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم نیاز دارد و برای کاربرانی با تجربه کم قابل استفاده نخواهد بود. مدل METRIC در محاسبات تبخیر-تعرق مشابه با الگوریتم SEBAL عمل می‌کند، با این حال در برخی جزئیات کمی اختلافاتی وجود دارد. به عنوان مثال، اختلاف مدل

¹ Eddy covariance

METRIC با الگوریتم SEBAL در برآورد شار تابش خالص و شار گرمای خاک قابل ذکر است (Allen et al., 2011). اساس این روش، ارتباط میان تشعشعات دریافتی توسط ماهواره‌ها در باندهای مرئی و مادون قرمز حرارتی با تفاوت‌های هیدرولوژیکی موجود در سطوح زمین است (Allen et al., 2007). الگوریتم‌های SEBAL و METRIC در برآورد مقادیر تبخیر-تعرق با موفقیت بالایی مواجه شده‌اند، اما همچنان برای برآورد مقادیر نیاز به فردی متخصص و آشنا با منطقه دارند. برای رفع این نیاز، در یک پژوهش، فیلترهایی روی تصاویر مورد نظر اعمال و پیکسل‌های سرد و گرم با استفاده از روش‌های آماری انتخاب شدند. با این حال، این روش به شکل نیمه‌اتوماتیک بوده و ممکن است باعث خطایی در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم شود و خصوصیات واقعی پیکسل‌ها را از دست بدهند. بنابراین، این روش نمی‌تواند به عنوان معیاری مناسب برای انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم در نظر گرفته شود (Allen et al., 2013). در سال ۲۰۱۷، یک روش جدید و کاملاً اتوماتیک برای تشخیص پیکسل‌های سرد و گرم برای الگوریتم METRIC معرفی شد. در این روش، نیازی به دخالت کاربر برای انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم وجود ندارد که این امر با روش‌های قبلی که به دلیل نیاز به انتخاب دستی پیکسل‌های سرد و گرم، زمان‌بر و مستلزم زحمت بیشتری بودند، متفاوت است (Bhattarai et al., 2017). الگوریتم Py_SEBAL جدیدترین نسخه از الگوریتم SEBAL در محیط پایتون است (Hessels et al., 2017). با توجه به دقت بسیار بالای الگوریتم مورد استفاده در برآورد تبخیر-تعرق، پژوهش‌های مختلفی در این زمینه در کشورهای مختلف انجام شده‌اند. در یک پژوهش، با استفاده از الگوریتم Py_SEBAL و تصاویر Landsat8، عملکرد تبخیر-تعرق در حوضه آبریز Makanya در کشور آفریقا بررسی شد. با توجه به اطلاعات محلی در مورد عملکرد محصول، تخصیص آب و شیوه‌های مدیریت کشاورزی در مناطق مختلف کشاورزی و اکولوژیکی، نتایج Py_SEBAL در حوضه آبریز مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج پژوهش نشان داد که عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد محصول گزارش شده، با یکدیگر مطابقت دارند. در یک پژوهش بر روی منطقه Valley Bekka در لبنان، از اطلاعات تصاویر Landsat برای دوره زمانی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۷ و از روش‌های METRIC و Py_SEBAL برای تحلیل داده‌ها استفاده شده است. براساس نتایج به دست آمده، میانگین سالیانه میزان تبخیر-تعرق در دوره کشت در این ۳۴ سال، 652 ± 53 میلی‌متر بوده و بیشترین میزان تبخیر-تعرق در Valley Bekaa، در فصل خشک ماه‌های می و اکتبر بوده و برابر با ۶۴٪ از تبخیر از سطح آب و خاک بوده است. در فصل مرطوب، تبخیر-تعرق بیش از ۷۰٪ بارش در این منطقه را شامل می‌شود و میزان تبخیر-تعرق در روش METRIC نسبت به Py_SEBAL برای زمین‌های غیرکشاورزی در تابستان، ۱۵٪ بیشتر برآورد می‌شود (Jaafar and Ahmad, 2020). علاوه بر الگوریتم‌های مطرح شده سازمان FAO در سال‌های اخیر، با هدف مدیریت بهتر منابع آب در مناطقی از جهان که با شدت بیشتری با بحران آب روبرو هستند، سیستمی را با نام "سیستم بهره‌وری دسترسی آزاد به آب"^۲ ایجاد کرده است. این سیستم، به‌عنوان یک ابزار موثر در تقلیل تلفات و افزایش بهره‌وری منابع آب، در مناطقی همچون آفریقا و خاورمیانه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Fakhar and Kaviani, 2022a). سیستم WapOR، یکی از پرکاربردترین سیستم‌ها به منظور مدیریت منابع آب در مناطقی که با بحران آب روبرو هستند است. برآورد تبخیر-تعرق واقعی از جمله محصولات مهم این سیستم است که با استفاده از الگوریتم ETLook، نقشه فضایی با اندازه پیکسل ۲۵۰ متری و با دوره ۱۰ روزه و سالانه را برای دوره زمانی ۲۰۰۹ تاکنون ارائه می‌دهد. این پایگاه داده، معادلات و روش‌های محاسبه میزان تبخیر-تعرق را که در پژوهشی توسط Bastiaanssen به تفصیل بیان شده است، شرح می‌دهد (Bastiaanssen et al., 2012). این مدل جهانی برای پردازش خودکار طراحی شده است، زیرا در ورودی‌های خود رطوبت خاک را به‌عنوان یک لایه محاسباتی مهم در نظر می‌گیرد (Barideh et al., 2022). هدف از این پژوهش، معرفی روش موثر در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی برای

² open-access system on water productivity

استفاده از منابع آب با استفاده از الگوریتم‌های Py_SEBAL، METRIC و مدل WaPOR و محصول MOD16 توسط تصاویر سنجنده MODIS در دشت مغان و مقایسه آن با داده‌های فائو پنمن مانیتث در اراضی مرتع، دیم و تحت پوشش شبکه آبیاری در طی سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ خواهد بود و همچنین با توجه به محدوده مطالعه در این پژوهش همبستگی عوامل هواشناسی، پوشش گیاهی و توپوگرافی بر میزان تبخیر- تعرق نیز بررسی شد.

مواد و روش‌ها

دشت مغان یک منطقه جغرافیایی در شمال غرب ایران است. این دشت در استان آذربایجان غربی واقع شده و محدوده‌ای از شهرهای مغان، میاندوآب، ارومیه و بوکان را شامل می‌شود. شهرستان پارس آباد، در قسمت شمال جلگه مغان و شمالی‌ترین شهرستان استان می‌باشد. از لحاظ موقعیت جغرافیایی، این منطقه بین ۳۹ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). این دشت با مساحتی بالغ بر ۱۵۶۴/۳۶ کیلومتر مربع، یکی از بزرگترین دشت‌های ایران است. مطابق با نقشه DEM (SRTM) پایین‌ترین و بالاترین نقاط ارتفاعی دشت به ترتیب برابر با ۱۲ و ۳۵۶ متر می‌باشد. یکی از مهمترین عوامل برای توسعه کشاورزی در دشت مغان، منابع آبی و آب‌های زیرزمینی فراوان در این منطقه است. دشت مغان با داشتن منابع آبی غنی، شرایط مناسبی را برای کشاورزی و زراعت فراهم می‌کند به طوری که بر اساس آخرین نقشه کاربری تهیه شده در سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که ۶۴٪ از سطح اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری قرار دارد و ۲۹٪ را اراضی دیم تشکیل می‌دهد. این منابع شامل رودخانه‌ها، چشمه‌ها و آبخوان‌های زیرزمینی است که تأمین آب مورد نیاز برای آبیاری زمین‌های کشاورزی را فراهم می‌کنند. استفاده بهینه از این منابع آبی و اتخاذ سیستم‌های آبیاری مناسب، به توسعه کشاورزی پایدار و افزایش عملکرد محصولات کشاورزی در دشت مغان کمک می‌کند. همچنین، وجود خاک حاصلخیز و اقلیم معتدل در این منطقه، دیگر عواملی هستند که توسعه کشاورزی را در دشت مغان تسهیل می‌کنند. براساس طبقه‌بندی دومارتن، اقلیم دشت مغان به‌طور کلی دارای اقلیم نیمه‌خشک است. در این روش طبقه‌بندی، دما و بارش دو عامل اصلی در تعیین اقلیم هستند. به‌طور کلی، دشت مغان دارای تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و معتدل است. بررسی نیاز آبی در دشت مغان بسیار حائز اهمیت است زیرا بررسی نیاز آبی در دشت مغان به کشاورزان و سایر کاربران آب کمک می‌کند تا منابع آب موجود در منطقه بهینه‌تر تخصیص داده شوند. با تعیین نیاز آبی بخش‌های مختلف کشاورزی، شهری و صنعتی، می‌توان برنامه‌ریزی منابع آب را انجام داد و به توازن بین تقاضا و عرضه آب در دشت مغان دست یافت. همچنین امکان بهره‌برداری بهینه از منابع آب را فراهم می‌کند. با تعیین نیاز آبی محصولات مختلف و استفاده از روش‌های آبیاری مناسب می‌توان بهره‌وری آب را افزایش داد و تلفات آب را کاهش داد؛ بنابراین، بررسی نیاز آبی در دشت مغان اهمیت بالایی دارد تا منابع آب بهینه تخصیص داده شوند، بهره‌وری منابع آب افزایش یابد، مدیریت پایدار منابع آب صورت گیرد و تطبیق با تغییرات اقلیمی انجام شود.

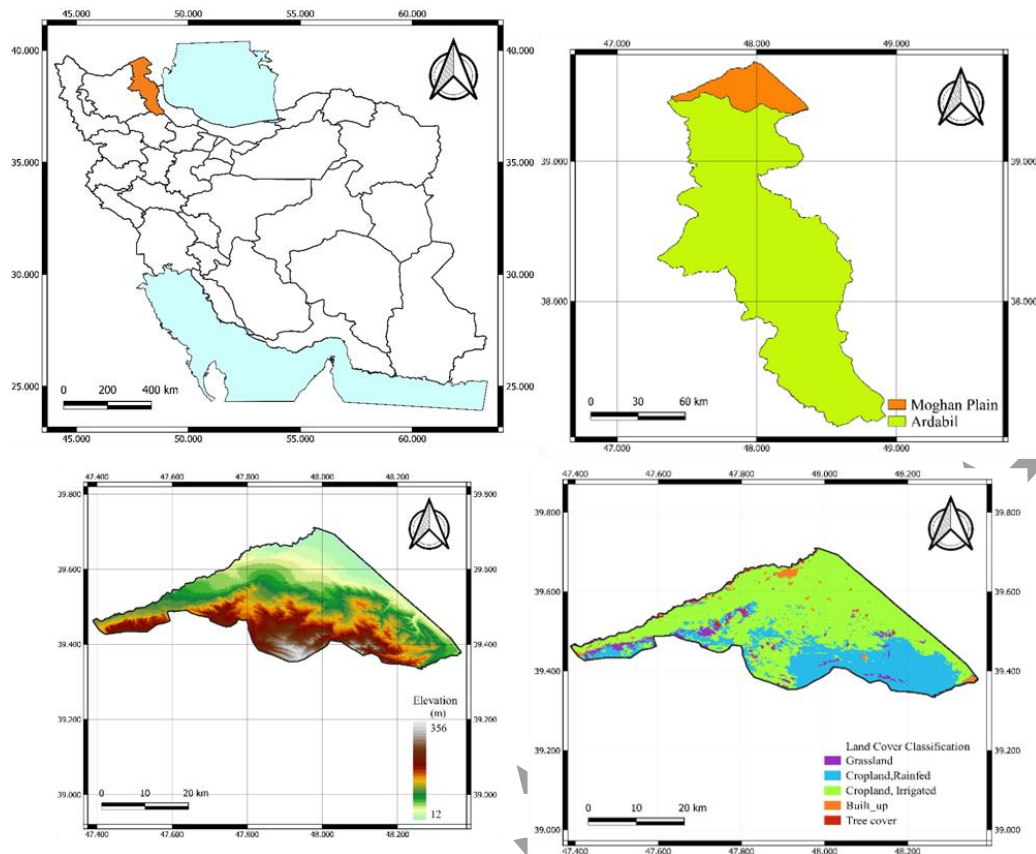


Figure 1. The geographical location of the study area, the changes in elevation within the region, and the land use map of the plain in 2022

جمع آوری اطلاعات

سنجنده MODIS

سنجنده MODIS توسط سازمان ملی هواشناسی و فضایی آمریکا (NASA) و سازمان مداری و اطلاعات مکان محور (USGS) توسعه داده شده است. MODIS از طریق ترکیب داده‌های اپتیکال و دمیی، اطلاعاتی درباره تغییرات دما و رطوبت سطح زمین را ارائه می‌دهد که به برآورد تبخیر-تعرق کمک می‌کند. با استفاده از داده‌های MODIS، میزان تبخیر-تعرق می‌تواند به صورت مکانی و زمانی تخمین زده شود. معمولاً از الگوریتم‌های مبتنی بر داده MODIS برای برآورد تبخیر-تعرق استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها بر اساس روش‌های فیزیکی و آماری که بر داده‌های MODIS و داده‌های مرجع تبخیر-تعرق مبتنی هستند، توسعه داده شده‌اند. در این پژوهش از پروداکت‌های مختلف برای برآورد تبخیر-تعرق استفاده شده است که جزئیات هر یک از پروداکت‌ها در جدول ۱ اشاره شده است.

Table 1. A brief description of the sensors and products used in the WaPOR platform and the METRIC and Py_SEBAL algorithms

ALGORITHM	DATA PRODUCT	MODEL	SATELLITE IMAGERY	TEMPORAL RESOLUTION	SPATIAL RESOLUTION
	MODIS	MOD16 A2	ET	8 Day	500 m
Py_SEBAL METRIC	MODIS	MOD13Q1	NDVI	16 Day	250 m
		SRTM	solar radiation	-	30 m
		MOD11A1		Daily	1km
		MOD09GA		Daily	500 and 1000 m
	MODIS	MOD09GQ	Surface albedo	Daily	250 m
			NDVI		
		WaPOR			
	CHIRPS v2, CHIRPS		Precipitation	Daily	5 km
	Based on Copernicus land cover map, 2015 MCD12Q1 LC		land cover map	Yearly	500 m
	MERRA/ GEOS-5		Weather data (temp, specific humidity, wind speed, air pressure)		

معرفی الگوریتم‌ها و مدل

الگوریتم Py_SEBAL³

Py_SEBAL الگوریتمی است که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون توسعه داده شده است (Hessels et al., 2017) و برای تخمین توازن انرژی سطح زمین استفاده می‌شود. این الگوریتم بر مدل توازن انرژی سطح زمین (SEBAL) مبتنی است و به منظور برآورد تبخیر-تعرق (ET) و سایر اجزای هیدرومتئورولوژیکی استفاده می‌شود. این الگوریتم از معادله بیلان انرژی برای محاسبه شار گرمای پنهان تبخیر در هر پیکسل استفاده می‌کند معادله (۱).

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

در این معادله λET شار گرمای نهان تبخیر (W/m^2)، R_n میزان تابش خالص خورشیدی (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) می‌باشد. Py_SEBAL از تصاویر ماهواره‌ای مانند MODIS و LANDSAT و داده‌های هواشناسی مانند

³ (Python Surface Energy Balance Algorithm for Land)

تابش خورشیدی، تابش مستقیم و غیرمستقیم و دمای هوا استفاده می‌کند. این داده‌ها به منظور محاسبه اجزای مختلف بیلان انرژی سطح زمین از جمله شار گرمای نهان، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس استفاده می‌شوند. با تخمین این متغیرها، Py_SEBAL اطلاعات مفیدی درباره مدیریت منابع آبی، روش‌های کشاورزی و مطالعات هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد.

این الگوریتم مراحل مختلفی را برای تخمین اجزای بیلان انرژی سطح زمین دنبال می‌کند. این مراحل عموماً شامل اصلاح جوی تصاویر حرارتی، محاسبه تابش خالص، تخمین شار گرمای خاک و تعیین شار گرمای محسوس و شار گرمای نهان است. Py_SEBAL با استفاده از مدل‌ها و الگوریتم‌های ریاضی این محاسبات را انجام می‌دهد و خروجی‌های نهایی را تولید می‌کند (Fakhar and Kaviani, 2022b).

الگوریتم⁴ METRIC

این الگوریتم یک روش تخمین تبخیر-تعرق (ET) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای است که به عنوان یک ابزار در زمینه مدیریت منابع آب و آبیاری استفاده می‌شود. METRIC بر اساس تعدادی از پارامترهای ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی، از جمله تابش خورشیدی دریافتی، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، دمای سطح زمین و دمای هوا، تبخیر-تعرق را محاسبه می‌کند. الگوریتم METRIC برای تخمین ET از روش تعمیم یافته تبخیر پتانسیلی استفاده می‌کند که بر اساس تعامل بین تابش خورشیدی و تبخیر-تعرق سطح زمین توسعه یافته است (Mondal et al., 2022). الگوریتم METRIC نیز همانند الگوریتم Py_SEBAL در محیط پایتون انجام شده ولی علاوه بر شاخص‌هایی که در الگوریتم Py_SEBAL به کار گرفته شده است، شاخص LAI و Zom نیز استفاده شده و به عبارتی تعداد فاکتورهایی که به منظور انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم به کار گرفته شده‌اند در الگوریتم METRIC بیشتر است (Fakhar and Kaviani, 2022b). دو الگوریتم METRIC مقدار تابش خالص همانند معادله (۲) محاسبه خواهد شد.

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + \varepsilon_0 R_{L\downarrow} - \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (2)$$

که در این معادله R_s طول‌موج کوتاه ورودی (W/m^2)، R_L طول‌موج بلند ورودی (W/m^2)، ε_0 انتشار سطحی، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$) و T_s دمای سطح زمین (برحسب کلوین) است.

الگوریتم Py_SEBAL و METRIC نیز تفاوت‌هایی دارند. از جمله اینکه روش تعمیم یافته METRIC از روش تعمیم یافته تبخیر پتانسیلی برای تخمین ET استفاده می‌کند. به عبارتی این روش بر اساس تعامل بین تابش خورشیدی و تبخیر-تعرق سطح زمین توسعه یافته است. همچنین METRIC بر اساس مدل‌های فیزیکی و روابط ریاضی پیچیده‌تری برای محاسبه ET استفاده می‌کند. در مقابل Py_SEBAL نیز از روش تعمیم یافته تبخیر پتانسیلی استفاده می‌کند، اما بر اساس روش SEBAL توسعه یافته است.

مدل⁵ WaPOR

WaPOR یک سامانه مبتنی بر داده‌های سنجش از دور است که برای ارزیابی بهره‌وری آب در کشاورزی و مدیریت منابع آب استفاده می‌شود. این سامانه با استفاده از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای و الگوریتم‌های پیشرفته، اطلاعاتی در مورد تبخیر-تعرق واقعی (Actual Evapotranspiration)، تبخیر-تعرق مرجع (Reference Evapotranspiration) و بهره‌وری آب (Water Productivity) را فراهم می‌کند. این اطلاعات می‌توانند به کشاورزان و مدیران منابع آب کمک کنند تا مصرف آب را بهبود بخشند و بهره‌وری آب را افزایش دهند (FAO, 2020). WaPOR از طریق الگوریتم ETLook که یک الگوریتم دو منبعی است (Bastiaanssen et al.,

⁴ Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration

⁵ Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data

(2012). به منظور برآورد تبخیر-تعرق استفاده می‌شود. در الگوریتم ETLook مقادیر تبخیر از سطح خاک، آب و گیاه با استفاده از

$$E = \frac{\Delta(R_{n,soil} - G) + \rho C_p \left(\frac{\Delta e}{r_{a,soil}}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{soil}}{r_{a,soil}}\right)} \quad (3)$$

معادله (۳) و مقدار تعرق از روزنه گیاه از معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$T = \frac{\Delta(R_{n,canopy} - G) + \rho C_p \left(\frac{\Delta e}{r_{a,canopy}}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{canopy}}{r_{a,canopy}}\right)} \quad (4)$$

این پایگاه داده‌ها را در سه سطح قاره‌ای (تفکیک مکانی ۲۵۰ متر) که شامل آفریقا و خاورمیانه بوده و در سطح یک قرار می‌گیرد، سطح دو (تفکیک مکانی ۱۰۰ متر) شامل ۲۱ کشور و ۴ حوزه رودخانه و سطح سوم شامل هشت منطقه آبیاری که دارای تفکیک مکانی ۳۰ متر است، ارائه می‌دهد (FAO and Delft, 2019).

محصول MOD16

MOD16 از محصولات سنجنده MODIS و بخشی از پروژه NASA/EOS است (Mu et al., 2011, 2007) که میزان تبخیر-تعرق جهانی از سطح زمین را با استفاده از داده‌های سنجنش از دور ماهواره‌ای تخمین زده و اطلاعات کلیدی را برای مدیریت منابع آب از سال ۲۰۰۱ فراهم می‌کند (Monteith, 1965). در این پژوهش علاوه بر مدل‌ها و الگوریتم‌های معرفی شده از محصول MOD16 نیز به منظور بررسی و مقایسه مقادیر برآورد شده استفاده شد. لازم به ذکر است تمامی پردازش‌های صورت گرفته برای این محصول در محیط GEE انجام شده است.

روش فائو پنمن مانیتث (FAO-56)

روش FAO-56 (روش پنمن-مانیتث) یک روش استاندارد است که توسط سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) توسعه داده شده است. گیاه مرجع، گیاهی فرضی، (معمولاً چمن) با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، آلبیدو ۲۳ درصد و مقاومت روزنه‌های آن در برابر تعرق ۷۰ ثانیه بر متر می‌باشد (Allen et al., 1998b; Abtew and Melesse, 2012). این گیاه باید خوب آبیاری شده، رشد فعال، ارتفاع یک‌دست و سایه‌اندازی کامل داشته باشد (Allen et al., 1998b). این روش با استفاده از عوامل هواشناسی مانند دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی، تبخیر-تعرق را محاسبه می‌کند. در این پژوهش به منظور برآورد تبخیر-تعرق از روش FAO-56 استفاده شد (معادله (۵)). روش FAO-56 روشی استاندارد برای محاسبه گیاه مرجع است، زیرا این روش قابل کاربرد در همه فصول و اقلیم‌های متفاوت است و نتایج آن دارای دقت زیادی نسبت به روش‌های فیزیکی از قبیل لایسیمتر و تشت تبخیر کلاس A است (Kulkarni et al., 2015).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma(900/T + 273.16)U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (5)$$

که در آن، ET_o تبخیر-تعرق مرجع (میلیمتر بر روز)، Rn تابش خالص ورودی به سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع بر روز)، G شار گرمای خاک (مگاژول بر مترمربع بر روز)، T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری (درجه سلسیوس)، u_2 میانگین روزانه

سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، γ ضریب ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) می باشد.

در ادامه تمامی داده های سنجنده MODIS برای محاسبه الگوریتم های مطرح شده از سایت [/https://earthexplorer.usgs.gov](https://earthexplorer.usgs.gov) دریافت شد. به طوری کلی در این پژوهش ۷۲ تصویر از پروداکت های مختلف MODIS برای ماه ها و سال های مدنظر دانلود شد که تاریخ تصاویر دریافت شده از هر پروداکت در شکل ۲ قابل ملاحظه است.

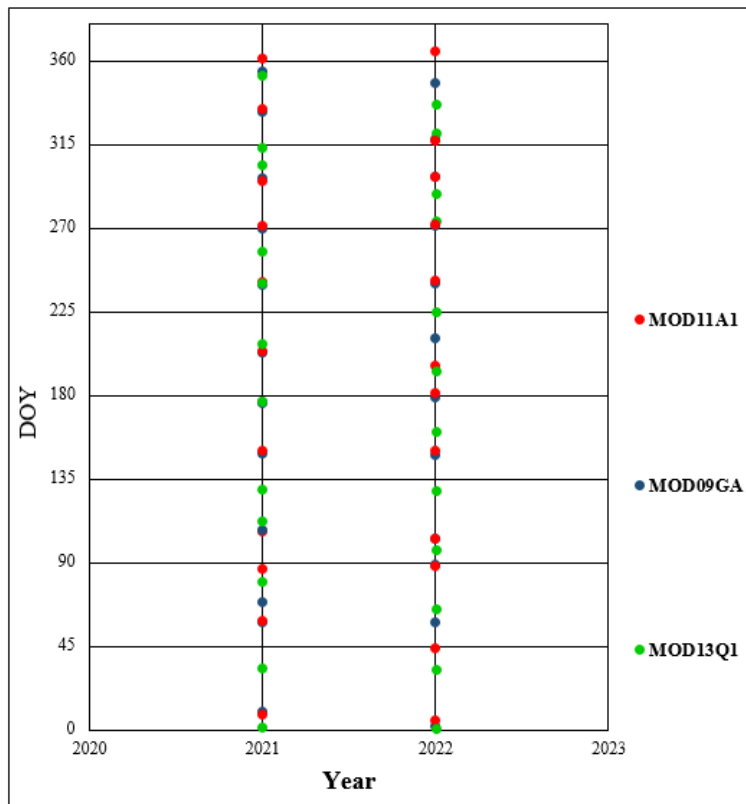


Figure 2. List of cloud-free and snow-free images examined for each product in the METRIC and Py_SEBAL algorithms

آماره های مورد استفاده

به منظور بررسی و مقایسه آماری بین تبخیر-تعرق برآورد شده توسط الگوریتم های METRIC، Py_SEBAL، مدل WaPOR، محصول MOD16 و روش FAO-56 از شاخص های آماری متداول همچون میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE) خطای اریب میانگین (MBE) و ضریب همبستگی (r) استفاده شده است. که در آن ها ET_{mod} مقدار تبخیر-تعرق برآورد شده از هر یک از مدل ها، ET_{met} مقدار تبخیر-تعرق مشاهده شده از روش FAO-56، $\overline{ET_{met}}$ میانگین تبخیر-تعرق مشاهده شده از روش FAO-56 و ET_{mod} میانگین تبخیر-تعرق برآورد شده از هر یک از مدل ها و همچنین n تعداد داده ها می باشد.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_{met})^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{mod} - ET_{met}|}{n} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_{met})}{n} \quad (8)$$

$$SE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_{met})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$r = \frac{[\sum (ET_{met} - \overline{ET}_{met})(ET_{mod} - \overline{ET}_{mod})]^2}{\sqrt{\sum (ET_{met} - \overline{ET}_{met})^2 \sum (ET_{mod} - \overline{ET}_{mod})^2}} \quad (10)$$

نتایج و بحث

برآورد تبخیر-تعرق ماهانه یکی از عوامل مهم در برنامه‌ریزی منابع آب و مدیریت سیستم‌های آبی محسوب می‌شود؛ زیرا برآورد دقیق تبخیر-تعرق ماهانه کمک می‌کند تا بهترین استراتژی‌ها را برای مدیریت منابع آب در نظر گرفته شود. در شکل ۳ به بررسی میزان تبخیر-تعرق واقعی ماهانه پرداخته شده است. با توجه به این که روش FAO-56 به عنوان یک روش استاندارد برای برآورد تبخیر-تعرق در مناطق مختلف است، لذا در این قسمت به بررسی و مقایسه عددی مقادیر حاصل از تبخیر-تعرق توسط مدل‌های مختلف و روش FAO-56 پرداخته شد. بررسی خروجی حاصل از مدل‌ها نشان می‌دهد که کمترین میزان تبخیر-تعرق مربوط به ماه‌های دی، بهمن و اسفند است. از عوامل مهم کاهش نرخ تبخیر-تعرق در این ماه‌ها، دما و تشعشع خورشید است. تشعشع خورشیدی به عنوان منبع اصلی انرژی، باعث افزایش دما در سطح زمین و سطح آب‌ها و گیاهان می‌شود. این افزایش دما منجر به تبخیر آب و تعرق در رورنه گیاهان می‌شود، که در نتیجه آب به صورت بخار آب به محیط پیرامون منتقل می‌شود. این فرآیندها در نتیجه‌ی آن، تأمین رطوبت مورد نیاز برای اقلیم و گیاهان را فراهم می‌کنند. بنابراین می‌تواند نقش مهمی در تحریک فرآیند تبخیر-تعرق ایفا کند. بررسی مقادیر ماهانه تبخیر-تعرق نشان می‌دهد که میزان تبخیر-تعرق ماهانه در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به طور میانگین شش برابر مقادیر تبخیر-تعرق در ماه‌های بهمن و اسفند می‌باشد. علاوه بر عوامل مطرح شده در نرخ تبخیر-تعرق، عامل رطوبت نسبی نیز تاثیر بسزایی در میزان تبخیر-تعرق دارد؛ زیرا رطوبت نسبی، در ماه‌های سرد سال عموماً از مقدار عددی بالایی برخوردار می‌باشد و بالا بودن رطوبت نسبی می‌تواند موجب کاهش نرخ تبخیر-تعرق در این ماه‌ها شود. بررسی مدل‌های برآورد شده نشان می‌دهد که الگوریتم Py-SEBAL به نسبت سایر الگوریتم‌ها مقدار عددی نزدیک‌تری را به روش FAO-56 دارند اما در مقابل الگوریتم‌های دیگر رفتار متفاوتی را از خود ارائه داده‌اند. به طوری که روش WaPOR در ماه‌های سرد سال با بیش برآوردی نسبت به روش FAO-56 همراه است. اما در ماه‌های تیر و مرداد که گیاه به دلیل فعالیت‌های فیزیولوژیکی مانند تولید مواد غذایی و گل‌دهی به مقدار زیادی آب نیاز دارند و با مقدار نیاز آبی بیشتری همراه است، از دقت مناسبی برخوردار بوده و مقادیر نزدیک به مدل FAO-56 را دارا می‌باشد. بررسی تغییرات الگوریتم METRIC نشان می‌دهد که این الگوریتم در تمامی ماه‌های سال با بیش‌برآوردی نسبت به مدل FAO-56 همراه است. از جمله دلایل تفاوت در نرخ تبخیر تعرق و مقایسه این دو مدل می‌توان به فرضیات متفاوت میان این دو مدل اشاره کرد. در الگوریتم METRIC، فرض این است که تبخیر از سطح گیاهان به نسبت پتانسیل تبخیر آزاد، که تابعی از شدت تابش خورشیدی و دما است، رخ می‌دهد به طوری که در الگوریتم METRIC فرض می‌شود که تبخیر از سطح گیاهان به نسبت پتانسیل تبخیر آزاد، که تابعی از شدت تابش خورشیدی و دما است، رخ می‌دهد. همچنین در فرضیه

تبخیر قابل مشاهده، تبخیر از سطح گیاهان به نسبت تبخیر آزاد که تابعی از شدت تابش خورشیدی، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد است، رخ می‌دهد. در حالی که در مدل FAO-56 فرضیه شبکه آبیاری و فرضیه مقاومت استوماتیک مطرح است که هر یک به ترتیب بیانگر این موضوعات هستند که گیاهان بتوانند به طور مستقیم از رطوبت خاک تغذیه شوند و همچنین آبیاری کمکی دریافت کنند و تعرق گیاهان بستگی به مقاومت استوماتیک (مرتبط با انتقال آب از ریشه به برگ از طریق آوند) و تغییرات شدت تابش خورشیدی، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد دارد.

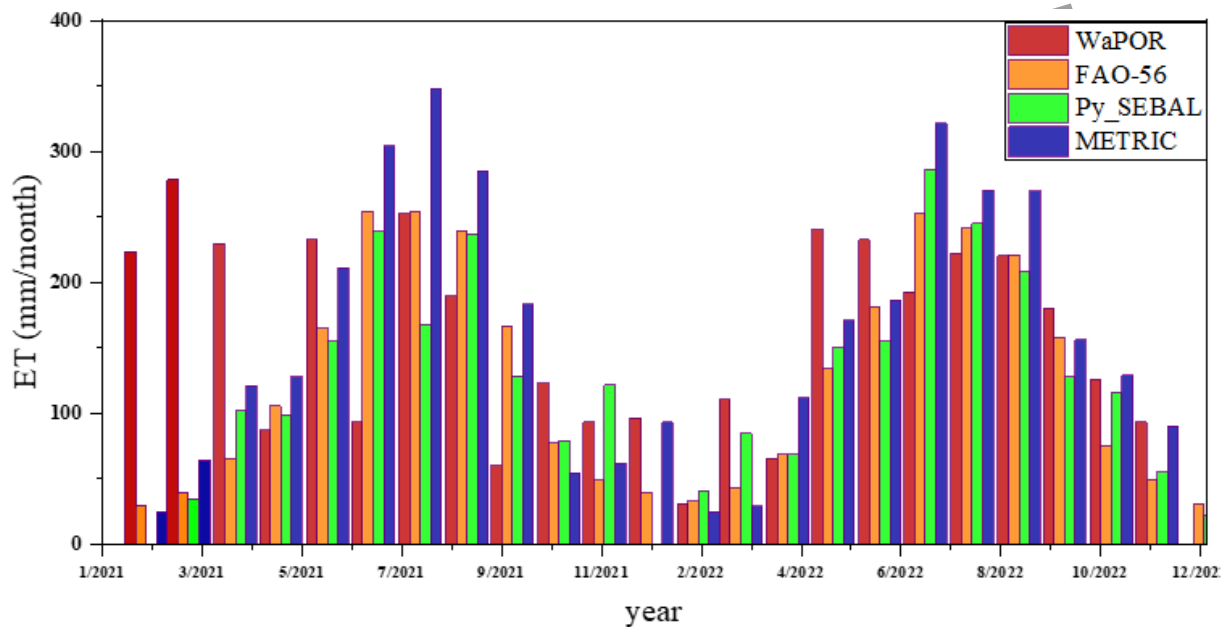


Figure 3. Estimated values of evapotranspiration by different models.

در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر موضوع و مقایسه داده‌ها با مدل FAO-56 از شاخص‌های آماری استفاده شد (جدول ۲-). بررسی شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که روش Py_SEBAL با مقدار $R=0.97$ و $RMSE=1.88$ (mm/month) بیشترین میزان همبستگی را با مقدار FAO-56 دارد. بعد از الگوریتم Py_SEBAL، الگوریتم METRIC با مقدار $R=0.89$ و $RMSE=1.5$ (mm/month) بیشترین میزان همبستگی را داشته است. بررسی محصول MOD16 و پایگاه WaPOR با مقادیر روش FAO-56 نشان می‌دهد که در دو روش از دقت مناسبی برخوردار هستند اما اختلاف در مقادیر نشان می‌دهد که مدل WaPOR تبخیر-تعرق را بهتر توصیف می‌کند. بررسی دیگر شاخص‌های آماری مربوط به محصول MOD16 و مدل WaPOR نشان می‌دهد که روش WaPOR به طور میانگین در دقت برآورد تبخیر-تعرق بهتر عمل می‌کند. از جمله دلایلی که باعث شده است WaPOR نسبت به روش MOD16 دقت بهتری داشته باشد. انطباق‌پذیری محلی است زیرا مدل WaPOR به عنوان یک روش مبتنی بر ماشین‌بردار پشتیبان قابلیت انطباق‌پذیری محلی را داراست به این معنی که مدل WaPOR به طور دقیق‌تر و با توجه به ویژگی‌های منطقه‌ای خاص تبخیر-تعرق را برآورد می‌کند. بنابراین این انعطاف‌پذیری محلی می‌تواند بهبود قابل توجهی در دقت برآورد تبخیر-تعرق ایجاد کند. از دیگر مزیت‌های مدل WaPOR می‌توان به قابلیت مدل‌سازی پارامترهای زمینی مانند ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی اشاره کرد که از آن‌ها می‌توان در مدل‌سازی تبخیر-تعرق استفاده نمود. بنابراین این اطلاعات زمینی می‌تواند تاثیر قابل توجهی در برآورد تبخیر-تعرق توسط WaPOR داشته باشد.

Table 2. Evaluation of values obtained from the FAO-56 model and other models using statistical indices

	R (-)	RMSE (mm/month)	NRMSE	MBE (mm/month)	MAE (mm/month)	SE (mm/month)
Py_SEBAL	0.97	1.88	2.35	2.18	-1.07	0.57
METRIC	0.89	1.5	1.14	0.34	1.54	0.78
WaPOR	0.86	1.98	2.12	2.87	-1.41	0.91
MOD16	0.71	2.39	3.08	-0.8	2.58	1.48

در شکل ۴ نقشه پراکندگی مکانی تبخیر-تعرق روزانه توسط مدل ۴ و به طور میانگین در ماه‌های May، Mar، Aug و Oct تهیه شد. علت انتخاب ماه‌های مذکور بررسی تغییرات نیاز آبی در سطح منطقه در طی فصول مختلف است. بررسی خروجی مدل‌ها نشان می‌دهد که هر چهار مدل به طور تقریبی در برآورد مقدار تبخیر-تعرق و تفکیک و رعایت پهنه‌بندی از دقت‌های متفاوتی برخوردار بوده‌اند. به طوری که بررسی نقشه پراکندگی میزان تبخیر-تعرق مدل MOD16 در ماه Mar نشان می‌دهد که مدل MOD16 به نسبت سه مدل WaPOR، Py_SEBAL و METRIC در برآورد میزان تبخیر-تعرق در اراضی دیم با درصدی خطا همراه بوده است. در بررسی تغییرات میزان تبخیر-تعرق در ماه May ملاحظه می‌شود که حدود ۴۰ درصد از اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری در مدل MOD16 مقادیر میانگین پیکسل ۴ میلی‌متر و کمتر در روز را دارا بودند. در حالی که در مدل WaPOR میانگین تبخیر-تعرق روزانه ماه May در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری برابر با $\frac{6}{23}$ میلی‌متر است که نشان می‌دهد مدل MOD16 در ماه May به نسبت مدل WaPOR با ۵۵٪ خطا و کم برآوردی همراه است. اما در مقابل پراکندگی تغییرات مدل Py_SEBAL و METRIC نشان می‌دهد که این دو مدل تا حد زیادی در برآورد میزان تبخیر-تعرق در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری نتایج مشابه یکدیگر را ارائه داده‌اند. علت پایین بودن میزان تبخیر-تعرق در ماه Mar در این منطقه ناشی از دمای پایین، بارش کم و پوشش گیاهی کم در منطقه مورد مطالعه در مرحله اولیه فصل رشد است که به تدریج با افزایش تراکم پوشش گیاهی در ماه‌های May، Aug و Oct مقدار تبخیر-تعرق نیز افزایش می‌یابد. به طور کلی بررسی مدل MOD16 نشان می‌دهد که این مدل در ماه‌های سرد سال و مناطق تحت پوشش شبکه آبیاری از دقت مناسبی در این منطقه برخوردار نیست. اما مدل WaPOR و الگوریتم‌های Py_SEBAL و METRIC تقریباً در تمامی ماه‌های بررسی شده در فصول مختلف در اراضی دیم از دقت مناسب و مشابهی نسبت به یکدیگر برخوردار هستند. یکی از دلایل مهمی که باعث می‌شود محصول MOD16 در برآورد تبخیر-تعرق از دقت مناسبی برخوردار نباشد، عدم در نظر گرفتن متغیرهای مهم است زیرا محصول MOD16 تعدادی از متغیرهای مهم مانند نوسانات دما، رطوبت، باد و تغییرات فصلی را ممکن است در حداقل برآورد خود در نظر نگیرد. در حالی که این متغیرها می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر تبخیر-تعرق داشته باشند. بنابراین در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر مدل‌های برآورد شده به مقایسه عددی و پیکسل به پیکسل هر یک از مدل‌ها با مدل WaPOR که نتایج مناسبی در برآورد میزان تبخیر-تعرق و دقت قابل قبولی در تفکیک میزان نیاز آبی اراضی دیم، تحت پوشش شبکه آبیاری و مراتع داشته است پرداخته شد (شکل ۵).

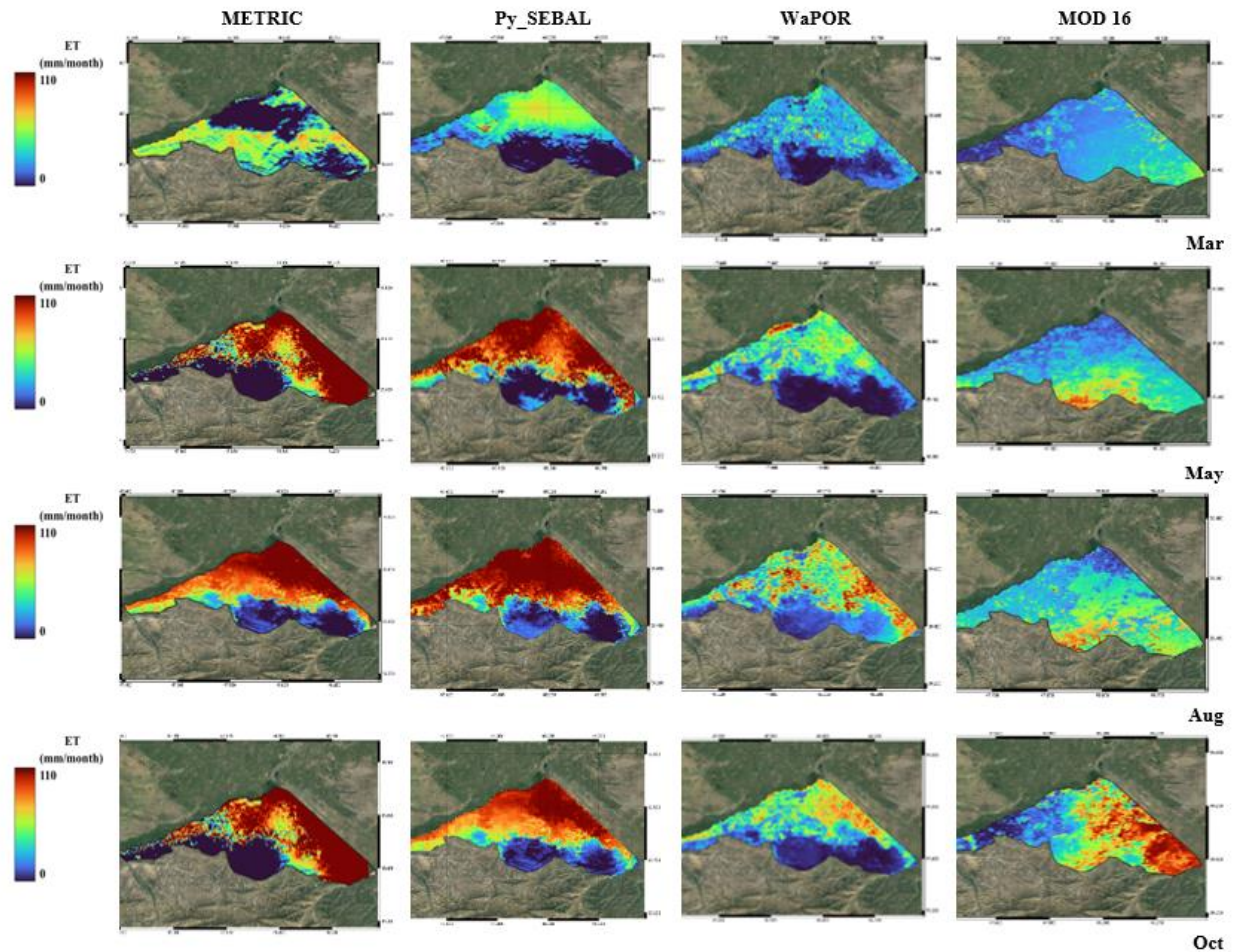


Figure 4. Map of the spatial distribution of average monthly actual evapotranspiration in different months of key cultivation seasons in the Moghan plain in 2022

به منظور اعتبارسنجی بیشتر عملکرد مدل‌های برآورد شده در اراضی دیم، تحت پوشش شبکه و مراتع با داده‌های مدل WaPOR مورد بررسی قرار گرفت. بررسی خروجی‌های به دست آمده نشان می‌دهد که در بین اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری مدل Py_SEBAL با مقدار $R^2=0.77$ بیشترین میزان همبستگی را با مقادیر حاصل از مدل WaPOR دارد. همبستگی هر یک از این مدل‌ها ممکن است با توجه به اقلیم و کاربری اراضی متفاوت است. به طوری که در بررسی‌های انجام‌شده بین مدل‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم METRIC نسبت به الگوریتم Py_SEBAL و محصول MOD16 همبستگی مناسب‌تری دارد. به طوری که الگوریتم METRIC با $R^2=0.51$ بیشترین میزان همبستگی را داشته است. از جمله عواملی که باعث افزایش میزان همبستگی در اراضی دیم در الگوریتم METRIC است می‌توان به محدودیت آبیاری در این اراضی اشاره کرد. با توجه به این‌که در اراضی دیم، میزان آبیاری معمولاً محدود است و گیاهان با محدودیت منابع آبی مواجه هستند. این محدودیت آبیاری باعث تغییرات مشخصی در تبخیر-تعرق گیاهان می‌شود. بنابراین الگوریتم METRIC قادر است به خوبی به این تغییرات پاسخ دهد و تبخیر-تعرق در شرایط آبیاری محدود را دقیق‌تر تخمین بزند. همچنین علاوه بر بررسی مقادیر تبخیر-تعرق در اراضی دیم و تحت پوشش شبکه بررسی‌های مدل‌ها نشان می‌دهند که محصول MOD16 و الگوریتم METRIC دقت قابل قبولی را در بررسی اراضی مرتع از خود نشان می‌دهند. به طوری که میزان همبستگی در اراضی مرتع با استفاده از الگوریتم METRIC و محصول MOD16 به ترتیب برابر با $R^2=0.61$ و $R^2=0.62$

است. لذا به طور کلی می‌توان این انتظار را داشت که الگوریتم METRIC و محصول MOD16 در اراضی با پوشش گیاهی ضعیف‌تر و تراکم کمتر، در این منطقه نتایج بهتری را ارائه داده است.

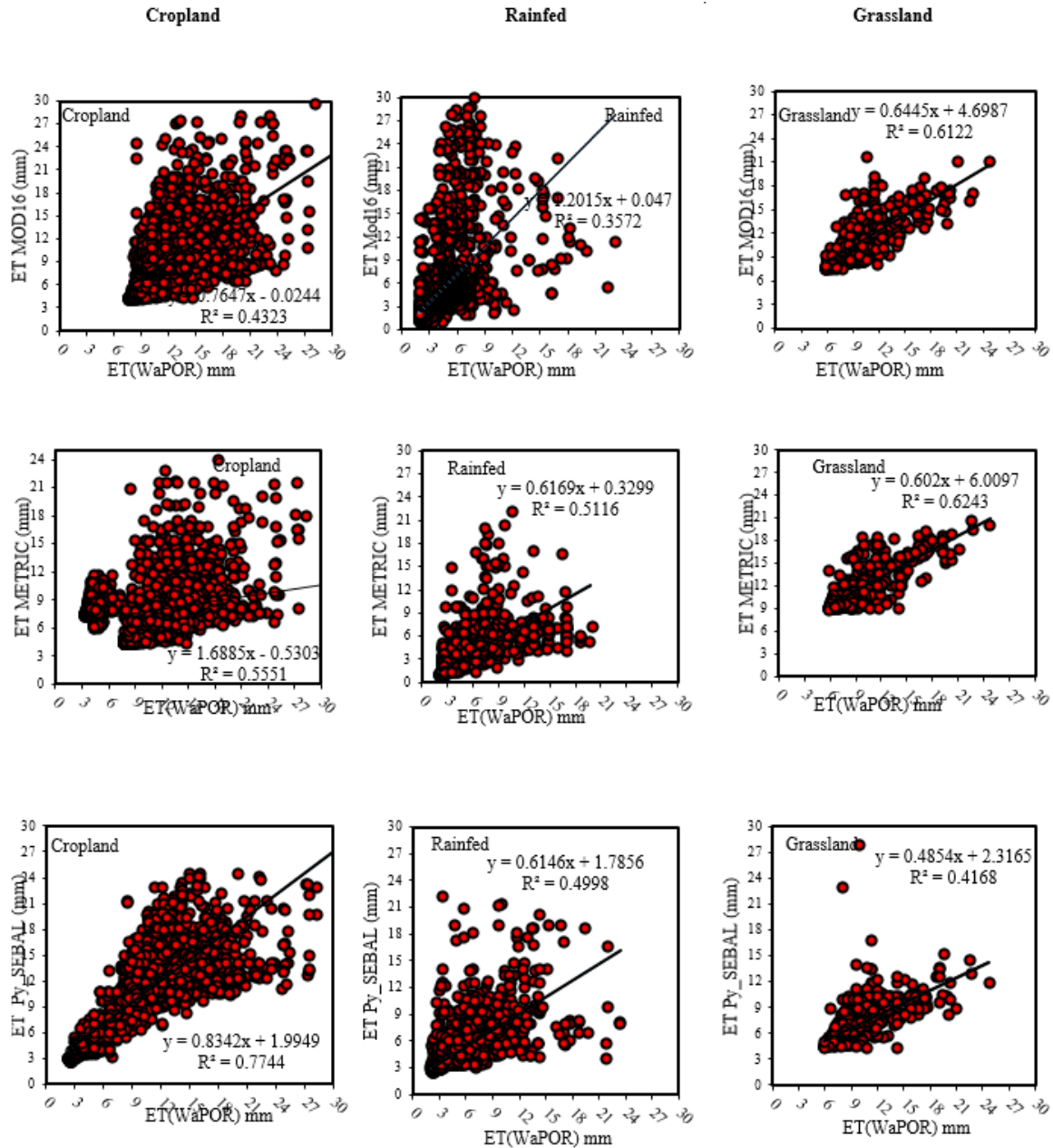


Figure 5. Comparison of evapotranspiration values obtained from the WaPOR model with evapotranspiration values derived from the Py_SEBAL, METRIC, and MOD16 models in three different land types

تجزیه و تحلیل

سطح و توزیع تبخیر-تعرق معمولاً تحت تاثیر عوامل محیطی مختلف قرار دارد. در این پژوهش بر اساس اصول معمولی، کمی‌پذیری و در دسترس بودن چهار عامل محیطی شامل DEM, Albedo, LST و NDVI از عوامل هواشناسی، پوشش گیاهی و توپوگرافی برای تعیین اثرات عوامل انتخابی بر میزان تبخیر-تعرق انتخاب شدند. بررسی خروجی‌های حاصله نشان می‌دهد که بین

ET و LST بیشترین همبستگی منفی با مقدار $R^2=98.24$ وجود دارد. علت این میزان همبستگی بالا می‌تواند ناشی از مکانیزم‌های فیزیکی و بیولوژیکی مرتبط با تبخیر-تعرق باشد به طوری که دما یکی از عوامل اساسی در تنظیم فرآیندهای تبخیر-تعرق است. زیرا با افزایش دما، سرعت تبخیر آب از سطح افزایش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش انرژی حرارتی آب و تحریک حرکت ذرات آب درون گیاهان و سطح زمین است. بنابراین افزایش دما می‌تواند منجر به افزایش تبخیر-تعرق شود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که دمای سطح زمین تأثیر مستقیمی بر حرارت موجود در محیط دارد. در دشت مغان، دما بر اندازه‌گیری دمای سطح زمین (LST) تأثیر بیشتری داشته و همبستگی بالاتری با تبخیر-تعرق دارد. بنابراین افزایش دما می‌تواند منجر به افزایش نیروی حرارتی و انرژی حرارتی آب شده و بنابراین تبخیر-تعرق را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. بعد از دمای سطح زمین شاخص NDVI بیشترین همبستگی مثبت را با مقدار $R^2=0.77$ با مقادیر تبخیر-تعرق Py_SEBAL در سطح منطقه داشته است. علت این میزان همبستگی بالا تراکم پوشش گیاهی در سطح وسیعی از این منطقه مورد مطالعه است. زیرا بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه تحت پوشش شبکه آبیاری قرار دارد. لذا عموماً میزان آبیاری بیشتری در دسترس گیاهان است و این میزان آب بیشتر می‌تواند منجر به رشد بهتر و سبزتر گیاهان شود، که در نتیجه باعث افزایش سطح NDVI می‌شود. از سوی دیگر، در اراضی دیم که به طور معمول به طور محدود آبیاری می‌شوند و بیشتر از بارش‌های طبیعی و رطوبت خاک برای رشد گیاهان استفاده می‌کنند، ممکن است میزان آب محدود باشد و گیاهان نسبت به اراضی آبیاری شده کمتر رشد کنند. بنابراین، سطح NDVI در اراضی دیم ممکن است کمتر از سطح NDVI در اراضی آبیاری شده باشد. بنابراین یکی از دلایل همبستگی بالای ET نسبت به شاخص NDVI سطح وسیعی از اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری است. NDVI در تعیین مقدار ET در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین پوشش گیاهی که با افزایش NDVI تعیین می‌شود به میزان تقریبی ۳۰٪ در افزایش میزان ET در مناطق آسیایی موثر است (Li et al., 2021). آلبیدو می‌تواند تأثیر مستقیم و غیر مستقیمی بر تبخیر-تعرق داشته باشد. آلبیدو بالا، یعنی سطح زمین بیشترین نور خورشید را بازتاب می‌کند و کمترین مقدار نور را جذب می‌کند. این بازتاب نور باعث کاهش تأمین انرژی حرارتی به سطح زمین می‌شود و در نتیجه میزان تبخیر را کاهش می‌دهد. به عبارتی دیگر، سطح زمین با آلبیدو بالا دارای دمای پایین‌تری است و این می‌تواند به منظور کاهش نیاز به تبخیر آب توسط گیاهان و سایر سطوح زمینی منجر شود. آلبیدو پایین می‌تواند منجر به افزایش تولید حرارت و دمای سطح زمین شود. در بررسی‌های انجام شده میان تبخیر-تعرق و آلبیدو نشان می‌دهد که آلبیدو با مقدار $R^2=51.85$ نشان‌دهنده وجود یک ارتباط مثبت متوسط بین دو متغیر آلبیدو و تبخیر-تعرق است. در ادامه به بررسی همبستگی ارتباط نقشه DEM منطقه و مقادیر تبخیر-تعرق در سطح مورد مطالعه پرداخته شد، بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نقشه DEM منطقه با مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده در محدوده مورد مطالعه کمترین میزان همبستگی را با مقدار عددی داشته است که علت این موضوع می‌تواند ناشی از عدم وجود اختلاف ارتفاع در محدوده مورد مطالعه باشد. بنابراین در مناطقی که تغییرات ارتفاعی بسیار محدودی دارند تأثیر زیادی در بررسی میزان تبخیر-تعرق در منطقه نخواهند داشت.

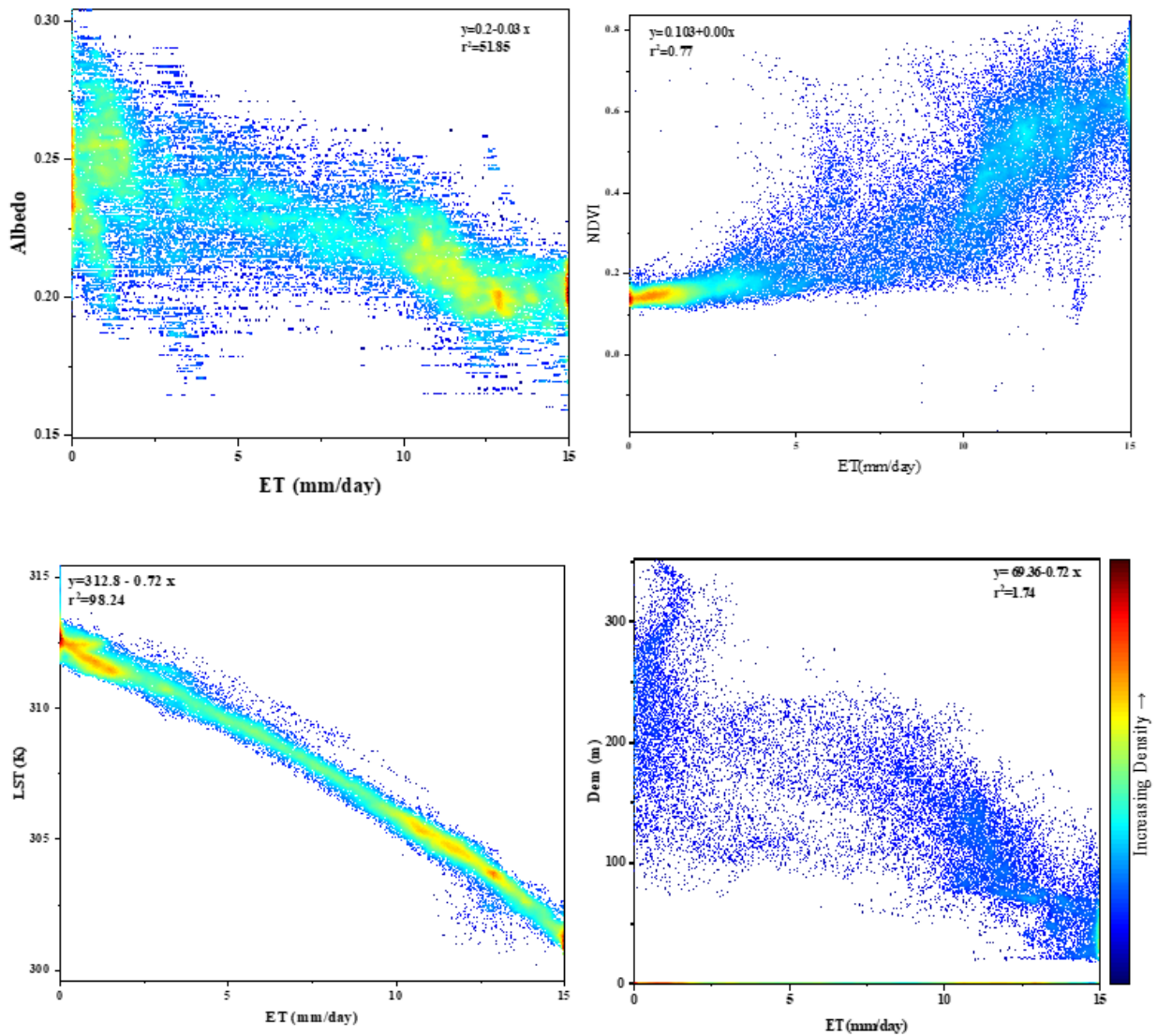


Figure 6. Correlation analysis plot between ET (Evapotranspiration) and LST (Land Surface Temperature), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), Albedo, and DEM (Digital Elevation Model)

بررسی تغییرات تبخیر-تعرق در اراضی با کاربری متفاوت

در اراضی با کاربری متفاوت، خواص فیزیکی و شیمیایی و شرایط سطح زیرین خاک در انواع مختلف کاربری اراضی مواردی همچون بافت خاک، محتوای آب خاک، جذب انرژی تابشی و شرایط پوشش گیاهی که عوامل تاثیرگذار بر تغییرات مکانی و زمانی تبخیر-تعرق هستند، متفاوت است. شکل ۷-ا میانگین عملکرد تبخیر-تعرق را تحت انواع مختلف کاربری اراضی در طول فصل رشد نشان می‌دهد. مقدار تبخیر-تعرق روزانه برای اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری با میانگین ۱۲ میلی‌متر در روز بالاترین مقدار را شامل می‌شود. مقادیر تبخیر-تعرق در اراضی دیم و مرتع نیز به ترتیب برابر با ۴/۹ و ۲/۵ میلی‌متر بر روز است. با توجه به این که سطح وسیعی از منطقه را اراضی تحت پوشش آبیاری فرا گرفته و این سطح از میزان تبخیر-تعرق بالایی به نسبت سایر اراضی قرار دارد، لذا در ادامه به بررسی حجم میزان تبخیر-تعرق در هر یک از کلاس‌ها پرداخته شد. شکل ۷-ب درصد مساحت هر یک از زمین‌های با کاربری مختلف را نیز نشان می‌دهد. زمین‌های تحت پوشش شبکه آبیاری که ۶۴٪ از اراضی منطقه را شامل می‌شود

از حجم تبخیر-تعرق بالایی نیز برخوردار است. به طوری که حجم میزان تبخیر-تعرق که از کل مساحت این اراضی در منطقه رخ می‌دهد برابر با $16/8 \times 10^4 \text{ m}^3$ است که به نسبت میزان حجم تبخیر-تعرق از اراضی دیم که برابر با $3/66 \times 10^4 \text{ m}^3$ می‌باشد حدود ۴/۵ برابر بیشتر است. بنابراین اهمیت افزایش بهره‌وری در مناطق تحت پوشش شبکه آبیاری در مناطقی همچون دشت مغان که سطح وسیعی از منطقه را پوشش می‌دهد از اهمیت بسزایی برخوردار است. زیرا برنامه‌ریزی دقیق آبیاری با توجه به نیازهای گیاهان، خصوصیات خاک و شرایط آب و هوایی منطقه، میزان آب مصرفی را بهینه می‌کند. استفاده از روش‌های مانیتورینگ و کنترل مستمر شرایط آبیاری می‌تواند در تنظیم بهینه زمان و میزان آبیاری کمک کند.

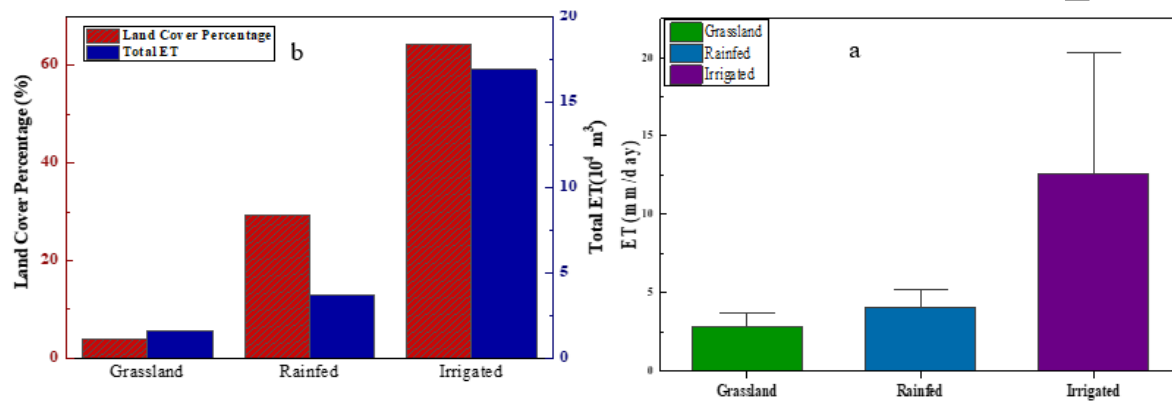


Figure 7. Daily average evapotranspiration in different land types of the Moghan plain. (a) Percentage of cultivated area for each land type and the volume of evapotranspiration in each land type (b).

نتیجه‌گیری

سنجش از دور به وسیله‌ای موثر برای تخمین ET در مقیاس منطقه‌ای یا حتی جهانی تبدیل شده است. با این حال، اعتبارسنجی دقت نتایج ET برآورد شده با استفاده از سنجش از دور همچنان چالش برانگیز است. در این پژوهش با استفاده از چهار مدل METRIC، Py_SEBAL، WaPOR، و MOD16 به برآورد میزان تبخیر-تعرق در دشت مغان پرداخته شد. بررسی نقشه پراکندگی میزان تبخیر-تعرق مدل MOD16 در ماه Mar نشان می‌دهد که مدل MOD16 به نسبت سه مدل Py_SEBAL، WaPOR، و METRIC در برآورد میزان تبخیر-تعرق در اراضی دیم با درصدی خطا همراه بوده است. در بررسی تغییرات میزان تبخیر-تعرق در ماه May ملاحظه شد که حدود ۴۰ درصد از اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری در مدل MOD16 مقادیر میانگین پیکسل ۴ میلی‌متر و کمتر در روز را دارا بودند در حالی که در مدل WaPOR میانگین تبخیر-تعرق روزانه ماه May در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری برابر با ۶/۲۳ میلی‌متر است که نشان می‌دهد مدل MOD16 در ماه May به نسبت مدل WaPOR با ۵۵٪ خطا و کم برآوردی همراه است. بررسی مقایسه عددی هر یک از مدل‌ها با روش FAO-56 به عنوان یک روش مرجع برای مقایسه و برآورد تبخیر-تعرق نشان داد مدل Py_SEBAL بیشترین میزان همبستگی را با مقدار FAO-56 دارد.

به منظور اعتبارسنجی دقیق‌تر عملکرد مدل‌های برآوردی در مناطق مختلف، از داده‌های مدل WaPOR نیز استفاده شده و نتایج به دست آمده با مدل‌های برآوردی مقایسه شد. خروجی‌های به دست آمده نشان می‌دهد که در بین اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری مدل Py_SEBAL بیشترین میزان همبستگی را با مقادیر حاصل از مدل WaPOR دارد. در این منطقه به منظور بررسی سایر عوامل موثر بر میزان تبخیر-تعرق و پارامترهای تاثیرگذار، مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از مدل Py_SEBAL با سایر پارامترهای تاثیرگذار

همچون DEM، Albedo، LST و NDVI بررسی و مقایسه شد. بررسی‌های انجام شده نشان داد که بین ET و LST بیشترین همبستگی منفی وجود دارد. بعد از دمای سطح زمین شاخص NDVI بیشترین همبستگی مثبت را با مقادیر تبخیر-تعرق Py_SEBAL در سطح منطقه داشته است. علت این میزان همبستگی بالا تراکم پوشش گیاهی در سطح وسیعی از منطقه مورد مطالعه است. با توجه به این که الگوریتم‌های مختلفی به منظور برآورد تبخیر-تعرق پدید آمده است لذا ادغام نتایج مدل‌های مختلف و استفاده از روش‌های ترکیبی، می‌تواند به افزایش دقت و استنباط بهتر در برآورد نرخ تبخیر-تعرق منجر شود. در نهایت در حال حاضر پدیده تغییر اقلیم در حال افزایش است. بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر نرخ تبخیر-تعرق و تطابق مدل‌ها با این تغییرات می‌تواند در تعیین پایداری و قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها کمک کند.

REFERENCE

- Allen, R.; Tasumi, M.; Trezza, R.; Waters, R.; Bastiaanssen, W. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)—Advanced Training and Users Manual—Idaho Implementation (Version 1.0); *The Idaho Department of Water Resources*: Boise, ID, USA, 2002.
- Abtew, W., Melesse, A., 2012. Evaporation and evapotranspiration: measurements and estimations. *Springer Science & Business Media*.
- Allen, R., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J.M.H., Bastiaanssen, W., Kjaersgaard, J., 2011. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrol. Process.* 25, 4011–4027.
- Allen, R.G., 1977. FAO irrigation and drainage paper.
- Allen, R.G., Burnett, B., Kramber, W., Huntington, J., Kjaersgaard, J., Kilic, A., Kelly, C., Trezza, R., 2013. Automated calibration of the metric-landsat evapotranspiration process. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 49, 563–576.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998a. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome* 300, D05109.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998b. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). *Food Agric. Organ. United Nations, Rome* 300.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133, 380–394.
- Allen, R.; Tasumi, M.; Trezza, R.; Waters, R.; Bastiaanssen, W. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)—Advanced Training and Users Manual—Idaho Implementation (Version 1.0); *The Idaho Department of Water Resources*: Boise, ID, USA, 2002.
- Barideh, R., Veysi, S., Ebrahimipak, N., Davatgar, N., 2022. The challenge of reference evapotranspiration between the WaPQR data set and geostatistical methods. *Irrig. Drain.* 71, 1268–1279.
- Bastiaanssen, W.G.M., Cheema, M.J.M., Immerzeel, W.W., Miltenburg, I.J., Pelgrum, H., 2012. Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Water Resour. Res.* 48.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *J. Hydrol.* 212, 198–212.
- Bhattarai, N., Quackenbush, L.J., Im, J., Shaw, S.B., 2017. A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sens. Environ.* 196, 178–192.
- Chen, J.M., Chen, X., Ju, W., Geng, X., 2005. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. *J. Hydrol.* 305, 15–39.
- Elnmer, A., Khadr, M., Kanae, S., Tawfik, A., 2019. Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. *Agric. Water Manag.* 213, 682–692.
- Fakhar, M.S., Kaviani, A., 2022a. Evaluation of FAO WaPOR product and PYSEBAL algorithm in estimating The amount of water consumed. *Iran. J. Soil Water Res.* ISSN 2423, 7833. (In Persian).
- Fakhar, M.S., Kaviani, A., 2022b. Estimation of actual evapotranspiration using automatic calibration in PY_SEBAL and METRIC algorithms in Qazvin plain. *Iran. J. Soil Water Res.* (In Persian).
- FAO, 2020. WaPOR Database Methodology: Version 2 Release, April 2020.

19. FAO, Delft, I.H.E., 2019. WaPOR Quality Assessment. Technical Report on the Data Quality of the WaPOR FAO Database Version 1.0.
20. Hessels, T., van Opstal, J., Trambauer, P., Bastiaanssen, W., Faouzi, M., Mohamed, Y., ErRaji, A., 2017. pySEBAL Version 3.3. 7.
21. Jaafar, H.H., Ahmad, F.A., 2020. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sens. Environ.* 238, 111034.
22. KANG, M., Cho, S., 2021. Progress in water and energy flux studies in Asia: A review focused on eddy covariance measurements. *J. Agric. Meteorol.* 77, 2–23.
23. Kulkarni, A.K., Masuti, R., Limaye, V.S., 2015. Comparative study of evaluation of evapotranspiration methods and calculation of crop water requirements at Chaskaman command area in Pune region, *India. Int. J. Res. Eng. Technol.* 4, 326.
24. Li, Q., Liu, W., Zheng, L., Liu, S., Zhang, A., Wang, P., Jin, Y., Liu, Q., Song, B., 2023. Divergence in Quantifying ET with Independent Methods in a Primary Karst Forest under Complex Terrain. *Water* 15, 1823.
25. Li, S., Wang, G., Sun, S., Hagan, D.F.T., Chen, T., Dolman, H., Liu, Y., 2021. Long-term changes in evapotranspiration over China and attribution to climatic drivers during 1980–2010. *J. Hydrol.* 595, 126037.
26. Li, T., Xia, J., Zhang, L., She, D., Wang, G., Cheng, L., 2021. An improved complementary relationship for estimating evapotranspiration attributed to climate change and revegetation in the Loess Plateau, China. *J. Hydrol.* 592, 125516.
27. Maroufpoor, S., Bozorg-Haddad, O., Maroufpoor, E., 2020. Reference evapotranspiration estimating based on optimal input combination and hybrid artificial intelligent model: Hybridization of artificial neural network with grey wolf optimizer algorithm. *J. Hydrol.* 588, 125060.
28. Mondal, I., Thakur, S., De, A., De, T.K., 2022. Application of the METRIC model for mapping evapotranspiration over the Sundarban Biosphere Reserve, *India. Ecol. Indic.* 136, 108553.
29. Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment, in: *Symposia of the Society for Experimental Biology*. Cambridge University Press (CUP) Cambridge, pp. 205–234.
30. Mu, Q., Heinsch, F.A., Zhao, M., Running, S.W., 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sens. Environ.* 111, 519–536.
31. Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W., 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.* 115, 1781–1800.
32. Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J.A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., 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. *Ippc*.
33. Paredes, P., Pereira, L.S., 2019. Computing FAO56 reference grass evapotranspiration PM-ET_o from temperature with focus on solar radiation. *Agric. Water Manag.* 215, 86–102.
34. Pereira, L.S., Paredes, P., López-Urrea, D.J., Jovanovic, N., 2021. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agric. Water Manag.*
35. Roerink, G.J., Su, Z., Menenti, M., 2000. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Phys. Chem. Earth, Part B Hydrol. Ocean. Atmos.* 25, 147–157.
36. Song, L., Liu, S., Kustas, W.P., Zhou, J., Xu, Z., Xia, T., Li, M., 2016. Application of remote sensing-based two-source energy balance model for mapping field surface fluxes with composite and component surface temperatures. *Agric. For. Meteorol.* 230, 8–19.
37. Su, Z., 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrol. earth Syst. Sci.* 6, 85–100.
38. Teixeira, A.H. de C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M., Bos, M.G., 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. *Agric. For. Meteorol.* 149, 462–476.
39. Usman, M., Liedl, R., Awan, U.K., 2015. Spatio-temporal estimation of consumptive water use for assessment of irrigation system performance and management of water resources in irrigated Indus Basin, *Pakistan. J. Hydrol.* 525, 26–41.
40. Vorobevskii, I., Luong, T.T., Kronenberg, R., Grünwald, T., Bernhofer, C., 2022. Modelling evaporation with local, regional and global BROOK90 frameworks: importance of parameterization and forcing. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 26, 3177–3239.
41. Wang, Z.-M., Batelaan, O., De Smedt, F., 1996. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Phys. Chem. Earth* 21, 189–193.
42. Waters, R., Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M., Trezza, R., 2002. Sebal. Surf. energy Balanc. algorithms

- land. Idaho implementation. *Adv. Train. Users Manual, Idaho, USA.*
43. Wu, B., Zhu, W., Yan, N., Xing, Q., Xu, J., Ma, Z., Wang, L., 2020. Regional actual evapotranspiration estimation with land and meteorological variables derived from multi-source satellite data. *Remote Sens.* 12, 332.
 44. Yang, Yanmin, Zhou, X., Yang, Yonghui, Bi, S., Yang, X., Li Liu, D., 2018. Evaluating water-saving efficiency of plastic mulching in Northwest China using remote sensing and SEBAL. *Agric. water Manag.* 209, 240–248.
 45. Zhang, Y., Liu, C., Tang, Y., Yang, Y., 2007. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res. Atmos.* 112.

نسخه آماده انتشار

Estimation of actual evapotranspiration using remote sensing data for improved water management

Mohadese sadat Fakhar¹, Abbas Kaviani^{2*}

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: Fakhar.ikiu@gmail.com

2. Associate professor in Dept., of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: kaviani@eng.ikiu.ac.ir

Abstract

Spatial quantification of actual evapotranspiration (ET) is crucial for water resource management and planning in arid regions. This research focuses on the investigation and estimation of evapotranspiration using Py_SEBAL and METRIC algorithms, as well as the WaPOR model and MOD16 product, during the years 2021 and 2022 in the Moghan Plain located in Ardabil Province. The results of each model are compared with the FAO-56 method, which is a standard approach for estimating evapotranspiration in different areas. The results indicate that the Py_SEBAL algorithm shows the highest correlation with the FAO-56 method, with an R value of 0.97 and an RMSE (mm/month) of 1.88. Next, the METRIC algorithm demonstrates the highest correlation with an R value of 0.89 and an RMSE (mm/month) of 1.5. To further validate the performance of the estimation models in different areas, the WaPOR database is also utilized. The obtained outputs indicate that among the irrigated lands covered by the water network, the Py_SEBAL algorithm exhibits the highest correlation with the values derived from WaPOR, with an R² value of 0.77. After Py_SEBAL, METRIC demonstrates a relatively suitable correlation with an R² value of 0.55. Considering the land use map of the region, more than 60% of the area is covered by the irrigation network. Since Py_SEBAL yields the best results in the conducted investigations for these lands, the estimation of evapotranspiration volume is focused on the entire region. The results indicate that the volume of evapotranspiration is approximately 4/5 times higher per hectare in irrigated lands compared to drylands.

Keywords: Moghan plain, METRIC, MOD16, Py_SEBAL, WaPOR