

## ارزیابی تغییرات تبخیر-تعرق حوضه ارس با استفاده از داده‌های تفکیک مکانی بالای محصول MOD16

مهناز صابر<sup>۱</sup>، پرومند صلاحی<sup>۲\*</sup> و عباس مفیدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری آب و هواشناسی همدانی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

<sup>۲</sup> استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

<sup>۳</sup> استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹)

### چکیده

در این پژوهش برای ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی مجموع تبخیر-تعرق (ET) در بخش جنوبی حوضه آبریز رودخانه ارس از محصول به‌دست آمده از داده‌های سنجنده مودیس ماهواره ترا (MOD16) برای یک دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۹) استفاده شد. تفکیک مکانی این داده‌ها ۵۰۰ متر و تفکیک زمانی آن ۸ روزه است. برای ارزیابی دقت داده‌های ET مودیس از داده‌های تبخیر ایستگاه‌های موجود در سطح حوضه و معیار RMSE استفاده شد. در طول دوره به‌طور کلی غرب حوضه، میانگین تبخیر-تعرق کمتری نسبت به شرق آن داشته است. تمامی هسته‌های بیشینه به غیر از هسته پارس‌آباد از سال ۲۰۰۰ وجود داشتند؛ اما هسته بیشینه در پارس‌آباد از ۲۰۰۱ به بعد تشکیل شده و به صورت تدریجی وسعت یافته است. بیشترین تغییر افزایشی مقدار ET دوره در کاربری زراعی آبی پارس‌آباد، جنگل‌های متراکم در خداآفرین و کلیبر، مراتع مرغوب جنوب شرقی اردبیل و مخلوط کشاورزی-باغی آن و بیشترین تغییر کاهش‌ی ET نیز در کاربری زراعت دیم، مخلوط مراتع فقیر و سایر کاربری‌ها در جنوب پارس‌آباد، بیله‌سوار و گرمی مغان و تا حدودی مراتع فقیر غرب حوضه مشاهده شد. تغییر افزایشی ET در قسمت‌های اشاره شده تا حدی ناشی از تغییر کاربری آنها تشخیص داده شد و همچنین می‌تواند ناشی از تغییرات افزایشی متغیرهای هواشناسی مؤثر بر آن از جمله دمای هوا، سرعت باد و... و نحوه مدیریت منابع آب نیز باشد که روشن شدن آن نیازمند تحقیقات مفصلی است. افزایش نیاز آبی گیاهان تنها یکی از تبعات افزایش ET خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر تعرق، حوضه ارس، سنجنده مودیس

## ۱ مقدمه

تبخیر تعرق (Evapotranspiration) ET خشکی، فرایند اصلی در سیستم اقلیم و پیونددهنده بین چرخه‌های کربن، انرژی و آب است (جونگ و همکاران، ۲۰۱۰). ET به‌شدت به فرایندهای انتقال انرژی مرتبط است؛ بنابراین، پایش این فرایند در هردو مقیاس زمانی و مکانی برای بهبود درک ما از برهم‌کنش بین خشکی و جو ضروری است (روهاف و همکاران، ۲۰۱۳). این پارامتر همچنین از جمله مؤلفه‌های مهم و مؤثر در بیلان و چرخه آب است که در مدیریت منابع آب بسیار حائز اهمیت و تخمین و برآورد این مؤلفه به‌دلیل ماهیت خود با پیچیدگی‌ها و دشواری‌هایی همراه است. در دهه‌های اخیر، چندین مدل تجربی بدین منظور ارائه شده است و برای برآورد محلی تا منطقه‌ای و جهانی توسعه داده شده‌اند (چن و همکاران، ۲۰۱۴). فراتر از این مدل‌ها، سنجش از دور به‌عنوان ابزار عملی برای تهیه داده مکانی ET سطح زمین شناخته شده است. داده‌های دورسنجی همچنین اطلاعات مکانی-زمانی در خصوص متغیرهای مؤثر بر ET را فراهم می‌سازد (لوس و همکاران، ۲۰۰۰). در همین راستا روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف مبتنی بر دورسنجی و تصاویر ماهواره‌ای برای تخمین این پارامتر ارائه شده (از قبیل الگوریتم سبال (SEBAL)، متریک (METRIC)، سبس (SEBS) و غیره) که مورد استفاده محققان زیادی قرار می‌گیرد. به‌عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات بستیانسن (۱۹۹۸)، سو (۲۰۰۲)، کلو و همکاران (۲۰۰۷)، ژینا و همکاران (۲۰۰۹)، سان و همکاران (۲۰۱۳)، مو و همکاران (۲۰۱۱)، مارشال و همکاران (۲۰۱۳)، شکار و ناندگیری (۲۰۱۶)، آلیس و همکاران (۲۰۱۷)، زیونگ و همکاران (۲۰۱۷)، بین و همکاران (۲۰۲۰)، پاسیولا و همکاران (۲۰۲۱)، پارسی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۹)، رحیم‌پور و همکاران (۱۳۹۹) اشاره نمود که از روش‌های مرسوم برای برآورد این پارامتر در سطح محلی تا جهانی

استفاده نموده‌اند. به مرور زمان محصولات دورسنجی متعددی برای موضوعات و کاربردهای متنوعی از داده‌های ماهواره‌ای بر اساس الگوریتم‌ها و روش‌های معینی تهیه و ارائه شده است. مزایا، محدودیت‌ها و عدم قطعیت محصولات ET بر حسب شرایط منطقه‌ای و مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت هستند (ونگ و همکاران، ۲۰۱۵). یکی از این تولیدات، MOD16 است. این محصول به‌طور وسیعی مورد استفاده پژوهشگران جهان قرار گرفته است که در اینجا به تعدادی از پژوهش‌های انجام شده با آن اشاره می‌گردد.

هو و همکاران (۲۰۱۵) داده تولیدات تبخیر و تعرق MOD16 و LSA-SAF (EUMETSAT Satellite Application Facility on Land Surface Analysis) را برای سال ۲۰۱۱ اروپا مقایسه کردند. برای این منظور ۱۵ سایت از بیوم‌های مختلف (از اراضی زراعی، علفزار، بوته‌زار، ساوانا گرفته تا جنگل) گزینش نمودند. نتایج نشان داد هردو مدل در اغلب مناطق اروپا مناسب هستند، به‌جز در نواحی نیمه‌خشک که آب در دسترس، فاکتور محدودکننده اصلی برای تبخیر و تعرق سطح زمین است. ونگ و همکاران (۲۰۱۵) نقاط ضعف و قوت تولیدات ET را در خشکی کانادا بررسی کردند. در خصوص MOD16، عدم اطمینان داده‌های مدل بیشتر مربوط به فصول سرد و مناطق با پوشش گیاهی پراکنده بود. نامبردگان پیشنهاد کرده‌اند در تکنیک‌های آتی مدل باید به رویکرد ترکیبی توجه شود. آگیلار و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از سنج‌های آماری مختلفی (RMSE) Root Mean Squared Error، ضریب تعیین (coefficient of determination (R-squared))، بایاس (BIAS) و شاخص انطباق (Concordance Index))، کارایی MOD16 در سنجش ET شمال غربی مکزیک را ارزیابی نمودند. در بهترین کارایی که مشاهده شد، RMSE بین

به مقایسه مقادیر ET واقعی محصول MOD16A2 با دما و بارش استان آذربایجان شرقی در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۰ با استفاده از همبستگی و تحلیل رگرسیون برای ایستگاه‌های اهر، سراب، سهند، مرند و میانه پرداختند و همبستگی مستقیم منفی بین دما و متغیر مورد مطالعه به دست آوردند.

در داخل کشور نیز پژوهش‌هایی درباره این متغیر برای محدوده حوضه ارس انجام شده است به‌عنوان نمونه، جهانبخش و همکاران (۱۳۹۱)، ۹ مدل برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل را در حوضه جنوبی رود ارس با هم مقایسه نمودند و با استفاده از روش بلانی-کریدل که ضریب همبستگی بالا با داده تبخیر ایستگاهی داشت نقشه‌های هم‌تبخیر حوضه را برای دوره ۲۰ ساله ۲۰۰۵-۱۹۸۶ ترسیم نمودند. اسمعیل‌پور و دین‌پژوه (۱۳۹۱) پس از برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل برای ۶ ایستگاه حوضه جنوبی رود ارس طی دوره آماری ۲۰۰۸-۱۹۸۶، روند بلندمدت و متغیرهای هواشناسی مؤثر بر آن را در دو مقیاس فصلی و سالانه بررسی کردند. روند سالانه ET برخی ایستگاه‌ها افزایشی و برخی دیگر کاهش غیرمعنی‌دار بود. همچنین تعداد ساعات آفتابی، درجه حرارت و سرعت باد روند صعودی داشتند. دین‌پژوه و همکاران (۱۳۹۷) در ارزیابی حساسیت تبخیر-تعرق مرجع شمال‌غرب ایران نسبت به تغییر پارامترهای هواشناسی مؤثر بر آن به این نتیجه دست یافتند که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیشترین مقدار ضریب حساسیت این متغیر در مقیاس سالانه و ماهانه مربوط به حداقل و حداکثر دما است.

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد پژوهش‌های پیشین انجام شده در مورد ET حوضه ارس، بیشتر به بررسی روند آن معطوف بوده و یا بین روش‌های مختلف تخمین ET مقایسه‌ای صورت گرفته اما به بررسی این متغیر در محدوده ارس از بعد فضایی پیوسته و با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده با توان تفکیک افقی بالا چندان

۰/۴ تا ۰/۷۷ میلی‌متر در روز بود. در بقیه موارد مدل، مقادیر ET را با کم‌برآوردی تخمین زد. دگانو و همکاران (۲۰۱۸) دقت PET محصول MOD16A2 را با استفاده از سنجش‌های زمینی ایستگاه‌های پامپاس آرژانتین و MAE بررسی نمودند. نتایج نشان داد بیش‌برآوردی داده‌های محصول در بهار-تابستان بزرگ‌تر از پاییز-زمستان است. الفیصل و همکاران (۲۰۲۰) دقت MOD16A2 مودیس در برآورد تبخیر-تعرق منطقه جاوه شرقی اندونزی را از طریق مقایسه آن با داده‌های اقلیمی ایستگاه‌ها ارزیابی نمودند و نشان دادند فرآورده می‌تواند این متغیر را در مقایسه با داده‌های اقلیمی با دقت ۷۵ درصد و RMSE، ۱/۱ میلی‌متر در روز تخمین بزند. النشار و همکاران (۲۰۲۱)، ۱۲ محصول تبخیر و تعرق واقعی جهان از ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۹ را ضمن ارزیابی مقایسه‌ای از طریق معیارهای مختلف، با هم تلفیق کردند تا مجموعه جدیدی ایجاد کنند. آنان نتیجه‌گیری کردند هرچند هیچ فرآورده‌ای نمی‌تواند در همه مکان‌ها بهترین عملکرد را داشته باشد فرآورده پیشنهادی (تلفیقی) را می‌توان بدون بررسی سایر مجموعه داده‌ها و انجام ارزیابی‌های بیشتر استفاده کرد. نیشیدا و همکاران (۲۰۰۳)، روهاف و همکاران (۲۰۱۳)، مو و همکاران (۲۰۱۳)، جانگ و همکاران (۲۰۱۳)، جونوویس و همکاران (۲۰۱۴) نیز در پژوهش‌های خود به بررسی و ارزیابی محصول MOD16 و MOD16A2/A3 پرداخته‌اند. مربوطه و همکاران (۱۳۹۷) تبخیر و تعرق واقعی دو مزرعه ذرت در استان قزوین را طی فصل رشد با استفاده از محصول MOD16 و مدل SWAP برآورد کرده و با هم مقایسه نمودند. با در نظر گرفتن مدل SWAP به‌عنوان مبنای مقدار RMSE در دو مزرعه ۱/۴۶ و ۱/۹۴ میلی‌متر در روز محاسبه شد. آنان به این نتیجه رسیدند در صورت نبود داده‌های اندازه‌گیری، از مقادیر تخمینی محصول MOD16 می‌توان به‌عنوان جایگزین استفاده نمود. جعفری شندی و همکاران (۱۳۹۷)

کوهستانی و کوهپایه‌ای واقع شده است. ۱۸/۵ درصد بقیه را دشت‌هایی تشکیل داده‌اند که در همه قسمت‌های حوضه پراکنده‌اند (کیانی سفیدان جدید، ۱۳۸۴). رودخانه ارس، شاه‌رگ اصلی این حوضه است که طولی حدود ۱۲۶۴ کیلومتر دارد و از کوه‌های شرق کشور ترکیه سرچشمه می‌گیرد. این رود به لحاظ ژئوپلیتیکی حائز اهمیت فراوانی است و مرز مشترک بین ترکیه و ارمنستان، ایران و ارمنستان و ایران و جمهوری آذربایجان را تشکیل می‌دهد (کرس و شیفلر، ۲۰۱۰). این رود پس از طی مسیری در مرز مشترک بین ایران با جمهوری آذربایجان و ارمنستان، در خاک جمهوری آذربایجان به کورا پیوسته و به دریای خزر می‌ریزد و بخشی از حوضه آبریز آن را تشکیل می‌دهد. بخش جنوبی این حوضه در شمال غرب ایران واقع شده و قسمت‌هایی از سه استان اردبیل، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی را در بر می‌گیرد. موقعیت جغرافیایی حوضه و ایستگاه‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده و مشخصات ایستگاه‌های منتخب در جدول ۱ آورده شده است.

پرداخته نشده است. با توجه به نتایج پژوهش‌های متعدد انجام شده در زمینه بررسی کارایی و دقت محصول MOD16 در برآورد ET مناطق مختلف جهان، در این پژوهش ضمن ارزیابی دقت محصول MOD16A3GF در برآورد ET حوضه ارس از طریق مقایسه آن با داده‌های ایستگاهی، به توزیع فضایی آن در این حوضه طی ۲۰ سال (۲۰۱۹-۲۰۰۰) و تغییرات مکانی آن پرداخته می‌شود.

## ۲ محدوده مورد مطالعه و روش پژوهش

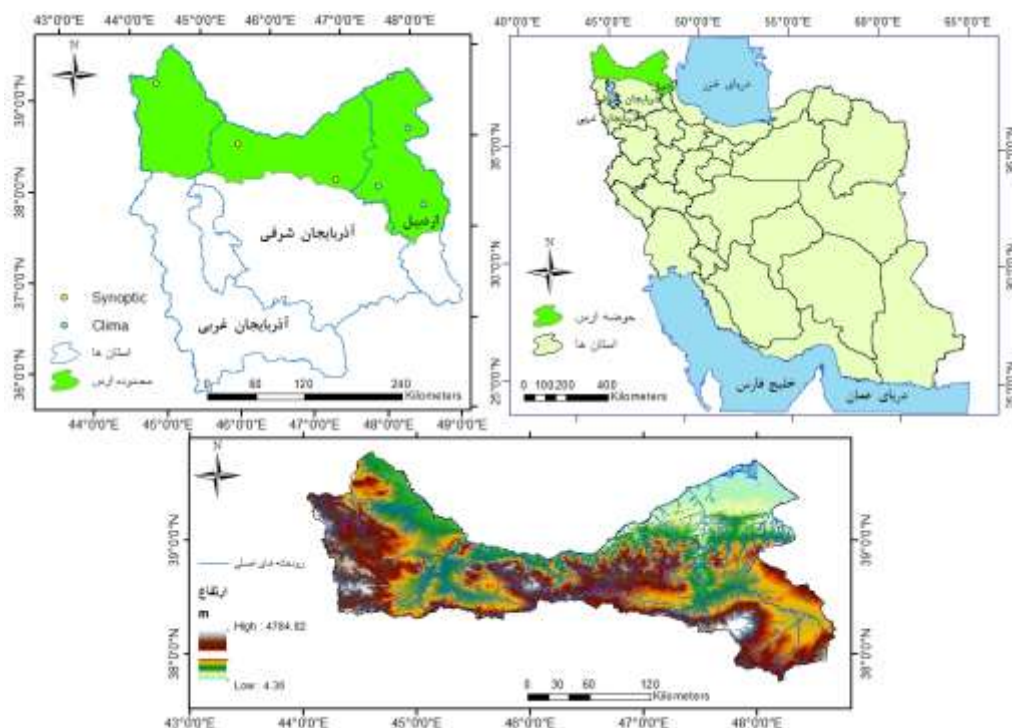
### ۲-۱ محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز ارس در ایران بین مختصات جغرافیایی  $39^{\circ} 46'$  تا  $44^{\circ} 41'$  طول شرقی و  $47^{\circ} 37'$  تا  $48^{\circ} 41'$  عرض شمالی واقع گردیده و رود ارس، مهم‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه منطقه مورد مطالعه به شمار می‌رود. مرتفع‌ترین نقطه در این حوضه، قله سبلان با ۴۸۱۱ متر از سطح دریا و پست‌ترین آن با ارتفاع ۲۰ متر در محل خروجی رودخانه ارس واقع در مرز ایران و جمهوری آذربایجان قرار دارد. مساحت این حوضه در خاک ایران بالغ بر ۳۹۴۷۸ کیلومتر مربع

بوده و حدود ۸۱/۵ درصد آن در مناطق

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های منتخب حوضه ارس.

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از دریا (متر)
۱	اردبیل	۴۸/۳۳	۳۸/۲۱	۱۳۳۵
۲	اهر	۴۷/۰۶	۳۸/۴۳	۱۳۹۰
۳	پارس‌آباد	۴۷/۷۶	۳۹/۶	۷۳
۴	جلفا	۴۵/۶۶	۳۸/۷۵	۷۳۷۲
۵	گرمی	۴۸/۰۵	۳۹/۰۵	۷۴۹
۶	ماکو	۴۴/۴۳	۳۹/۳۳	۱۴۱۱/۳
۷	مشگین‌شهر	۴۷/۶۸	۳۸/۳۸	۱۵۶۱



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی، ایستگاه‌ها و رودخانه‌های اصلی محدوده ارس.

## ۲-۲ داده و روش پژوهش

وبسایت NASA دریافت گردید. همچنین داده‌های آماده تبخیر ایستگاه‌های همدیدی منتخب حوضه ارس (جدول ۱) برای دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۰۰ از سازمان هواشناسی کشور و داده ET ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی از هواشناسی اردبیل اخذ گردید. ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی منتخب شامل: اردبیل، پارس‌آباد، گرمی و مشگین‌شهر و ایستگاه‌های همدیدی شامل: اهر، جلفا و ماکو می‌باشد. برای ارزیابی دقت محصول، داده ET هشت-روزه آن برای مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های اشاره شده، با اسکریپت‌نویسی استخراج شد. تعدادی از ایستگاه‌های حوضه نیز در یاخته‌ای با کلاس Fill Value قرار داشتند که شامل مراکز شهری/سکونتگاه، پهنه آبی، زمین بایر یا با پوشش تنک هستند و محصول برای آنها داده‌ای را ثبت نکرده است. بدین‌نحو که نزدیک‌ترین یاخته به هر ایستگاه به‌عنوان یاخته نماینده ایستگاه انتخاب گردید که محصول برای آنها داده تخمینی دارد. سپس مناظر با تاریخ ET

در این مطالعه برای بررسی تغییرات ET در حوضه آبریز ارس از داده‌های MOD16 برای دوره آماری ۲۰ ساله از ۲۰۱۹-۲۰۰۰ استفاده شد و کارایی و دقت فرآورده ارزیابی گردید. محصول MOD16 یکی از محصولات سنجنده MODIS ناسا است و یکی از ۵ مؤلفه‌ای که برآورد می‌شود، تبخیر-تعرق است. تولیدات تبخیر-تعرق MOD16A2/A3 در فواصل زمانی ۸ روزه و سالانه تولید می‌شود (مو و همکاران، ۲۰۱۳). مجموعه ششم این محصول، تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و تفکیک زمانی ۸ روزه دارد (رونینگ و همکاران، ۲۰۱۹) و فرمت آن HDF-EOS است. محدوده ارس در داخل یک گرانول با کد h21v05 قرار دارد که حرف h نمایانگر بعد افقی تقسیم‌بندی و حرف v نشانگر بعد عمودی گرانول است. تعداد شبکه‌های حوضه ۱۴۰۱۴ یاخته می‌باشد. داده‌های ET سالانه محصول MOD16A3GF با فرمت HDF از

است. داده‌های موردنیاز از MODIS به‌عنوان ورودی الگوریتم MOD16: داده‌های دورسنجی پوشش زمین، FPAR/LAI، سپیدایی و داده‌های غیرماهواره‌ای (داده روزانه هواشناسی MERRA GMAO با تفکیک افقی تقریبی  $0.5 \times 0.6$  درجه) تهیه‌شده توسط سازمان GMAO ناسا را شامل می‌شود (مو و همکاران، ۲۰۱۳؛ ونگ و همکاران، ۲۰۱۵). ET برآورد شده با MOD16 با ET اندازه‌گیری شده از ۲۳۲ حوضه آبریز صحت‌سنجی شده است (Mu et al, 2013). در الگوریتم بهبودیافته، رونینگ و همکاران (۲۰۱۹) با ترکیب داده‌های سنجش از دور و داده‌های هواشناسی جهانی، الگوریتم کلو و همکاران (۲۰۰۷) را که بر معادله پنمن-مانتیس (رابطه ۵) مبتنی است و هم رسانش پوشش گیاهی و هم ET را محاسبه می‌کند، اتخاذ کردند. مانتیس (۱۹۶۵) دمای سطح را از روابط (۱) تا (۳) حذف کرد تا به رابطه (۵) برسد. سایر پارامترهایی که برای بهبود الگوریتم ET به کار رفته است در جدول ۲ آورده شده است (رونینگ و همکاران، ۲۰۱۹).

هشت‌روزه محصول، میانگین هشت-روزه برای داده تبخیر و تعرق ایستگاه‌ها (داده مشاهداتی) محاسبه شد. از میانگین هشت-روزه تبخیر و تعرق ایستگاه‌ها برای ارزیابی دقت محصول MOD16 در تخمین ET هشت-روزه ایستگاه‌های حوضه استفاده شد. لذا داده‌های ET محصول پس از اعتبارسنجی و مقایسه با داده‌های ایستگاهی حوضه، پهنه‌بندی شده و مورد تحلیل قرار گرفتند. همچنین سری‌زمانی ET هشت-روزه محصول تهیه و تغییرات زمانی-مکانی این متغیر طی ۲۰ سال بررسی شد.

## ۲-۲-۱ الگوریتم MOD16

الگوریتم MOD16 (مو و همکاران، ۲۰۱۱) برای محاسبه ET واقعی مبتنی بر معادله پنمن-مانتیس (مانتیس، ۱۹۶۵) است. این الگوریتم هم تقسیم‌بندی انرژی سطح و هم شرایط محیطی مؤثر بر ET را لحاظ می‌کند و تعرق پوشش گیاهی، تبخیر پوشش گیاهی و تبخیر خاک را شامل می‌شود (ونگ و همکاران، ۲۰۱۵). هسته الگوریتم، پارامتریزه کردن مقاومت مؤثر در برابر تبخیر از سطح خاک و پوشش گیاهی و تعرق از تاج پوشش گیاهان

جدول ۲. مقادیر پارامترهای به کار رفته در الگوریتم بهبودیافته ET

پارامتر	نرخ افت دمای استاندارد	دمای استاندارد در ارتفاع صفر (سطح دریا)	شتاب گرانشی استاندارد	ثابت قانون گاز	وزن مولکولی هوا	فشار استاندارد در ارتفاع صفر متر
واحد	$K m^{-1}$	K	$m s^{-2}$	$M^3 Pa mol^{-1} K^{-1}$	$Kg mol^{-1}$	Pa
مقدار	۰/۰۰۶۵	۲۸۸/۱۵	۹/۸۰۶۶۵	۸۳۱۴۳	۲۸/۹۶۴۴e-3	۱۰۱۳۲۵

که H و  $\lambda E$  و  $A'$  به ترتیب شارهای گرمای محسوس، گرمای نهان و انرژی در دسترس برای H و  $\lambda E$  است؛  $R_{net}$  تابش خالص؛ G، شار گرمای خاک؛  $\Delta s$ ، شار ذخیره گرمایی؛  $\lambda$ ، گرمای نهان تبخیر؛  $\rho$ ، چگالی هوا؛  $C_p$ ، ظرفیت گرمایی ویژه هوا؛  $T_a$  و  $T_s$  دمای سطح آئروپونامیک و دمای هوا؛  $r_a$ ، مقاومت

انرژی در سطح زمین به مؤلفه‌هایی جزءبندی می‌شود که مطابق روابط ۱ تا ۳ به دست می‌آیند (رونینگ و همکاران، ۲۰۱۹):

$$H = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad (۱)$$

$$\lambda E = \frac{\rho C_p (e_{sat} - e)}{\lambda (r_a + r_s)} \quad (۲)$$

$$A' = R_{net} - \Delta s - G = H + \lambda E \quad (۳)$$

## ۲-۲-۲ معیار اعتبارسنجی

در این پژوهش از جذر میانگین مربعات خطا، میانگین مطلق خطا، همبستگی، ضریب تعیین و خطای بایاس میانگین به عنوان معیار ارزیابی و بررسی دقت داده ET برآوردی محصول MOD16 استفاده شد. توابع یادشده به صورت رابطه (۷ و ۸) تعریف می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (ET_{est} - ET_{obs})^2}{n}} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |ET_{est} - ET_{obs}|}{n} \quad (8)$$

که در این رابطه  $n$  تعداد زوج داده‌ها،  $ET_{obs}$  مقدار داده تبخیر و تعرق مشاهداتی در زمان  $t$ ،  $ET_{est}$  مقدار داده تخمینی تبخیر و تعرق در زمان  $t$  است. دامنه تابع، از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت متغیر است و هرچند بهترین حالت متصور برای این تابع این است که برابر صفر باشند؛ اما این اتفاق چندان رایج نبوده و هر مدلی با درصدی از خطای تخمین همراه است. مقادیر RMSE کوچک‌تر نشان‌گر توانایی بهتر محصول در تخمین ET است (مو و همکاران، ۲۰۰۷). رونینگ و همکاران (۲۰۱۹) میانگین خطای مطلق ET روزانه محصول MOD16 را ۰/۳۳ کیلوگرم در مترمربع در روز به دست آورده‌اند. هرچند به مقدار خطا در مناطق و اقلیم‌های مختلف اشاره‌ای نکرده‌اند.

## ۳ بحث

### ۳-۱ ارزیابی و واسنجی داده‌ها

بررسی داده‌های تبخیر ایستگاهی و محصول ET نشان داد که دقت محصول در نقاط مختلف حوضه متفاوت است (جدول ۳). در بین ایستگاه‌های حوضه بیشترین ضریب همبستگی و ضریب تعیین بین این دو داده به ترتیب به میزان ۰/۶۰ و ۰/۳۶ در ایستگاه ماکو و کمترین آن در ایستگاه مشگین‌شهر ملاحظه گردید. خطای بایاس میانگین در اغلب ایستگاه‌ها ناچیز و نزدیک به صفر بوده و در مشگین‌شهر و گرمی بین ۰/۱ تا ۰/۲ متغیر است. بیشترین

آرودینامیک؛  $e_{sat}$  و  $e$ ، فشار بخار آب در سطح تبخیر شونده و فشار بخار آب در هوا؛  $\Gamma_s$ ، مقاومت سطح در مقابل تبخیر و تعرق (مقاومت مؤثر در برابر تبخیر از سطح زمین و تعرق از تاج‌پوش گیاهی) است.

ثابت رطوبت‌سنجی  $\gamma$  از رابطه (۴) به دست می‌آید (رونینگ و همکاران، ۲۰۱۹):

$$\gamma = \frac{c_p P_a M_a}{\lambda M_w} \quad (4)$$

که  $M_w$  و  $M_a$ ، جرم مولکولی هوای خشک و هوای مرطوب و  $P_a$ ، فشار جو است. شار گرمای نهان از رابطه (۵) به دست می‌آید (رونینگ و همکاران، ۲۰۱۹):

$$\lambda E = \frac{S A' + \rho c_p \left( \frac{e_{sat} - e}{r_a} \right)}{S + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} = \frac{S A' + \rho c_p \frac{VPD}{r_a}}{S + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (5)$$

که  $S = d(e_{sat})/dT$  شیب منحنی مربوط به فشار بخار آب اشباع ( $e_{sat}$ ) نسبت به دما؛  $A'$ ، انرژی در دسترس تقسیم شده بین شارهای گرمای نهان و محسوس بر روی سطح خشکی و  $VPD = e_{sat} - e$ ، کسری فشار بخار هوا است.

در رابطه (۶) معادله‌ای که پنمن در سال ۱۹۴۸ آن را بر اساس داده‌های استاندارد هواشناسی، شامل: ساعات آفتابی، دما، رطوبت نسبی و باد ارائه داد، آورده شده است. اصل معادله برای تخمین  $ET_0$  بر حسب میلی‌متر در روز است:

$$ET_0 = \frac{(\Delta/\Delta + \gamma)(R_n - G) + K_w(\gamma)(\Delta + \gamma)(a_w + b_w u_2)(e_s - e_a)}{\lambda} \quad (6)$$

که  $K_w$ : مقدار ثابت (۶/۴۳)،  $a_w$  و  $b_w$ ، ضرایب تابع باد،  $u_2$ ، سرعت باد در ارتفاع دو متری (بر حسب متر بر ثانیه)،  $\lambda$ ، گرمای نهان تبخیر ( $MJ \text{ kg}^{-1}$ )،  $R_n$ ، تابش خالص در سطح محصول ( $MJm^{-2}$  در روز)،  $G$ ، شار حرارتی خاک ( $MJm^{-2}$  در روز)،  $(e_s - e_a)$ ، کسری فشار بخار اشباع ( $KPa$ )،  $\Delta$ ، شیب منحنی فشار بخار ( $^{\circ}C^{-1}$ ) و  $\gamma$ ، ثابت رطوبتی ( $0.054 kPa^{\circ}C^{-1}$ ) است (Dehghani (Sanij et al, 2004: 94).

پارس آباد و گرمی و کمترین دقت آن مربوط به جلفا و اهر است. هرچند MOD16 در این حوضه ET را کمتر از داده ایستگاهی برآورد می‌کند با وجود این، مزیت پوشش‌دهی کل حوضه از سوی داده محصول در قیاس با داده ایستگاهی پراکنده و با توزیع نامنظم، قابل قبول است.

دقت محصول در ایستگاه اقلیم‌شناسی پارس آباد با RMSE برابر ۴/۲ میلی‌متر در روز و کمترین دقت آن در جلفا به میزان ۱۰ میلی‌متر در روز مشاهده شد. RMSE ماکو، اردبیل، مشکین‌شهر و اهر نیز به ترتیب ۴/۶، ۴/۸، ۵ و ۶/۶ میلی‌متر در روز به دست آمد. بر اساس معیار MAE بیشترین دقت محصول مربوط به برآورد ET ایستگاه‌های

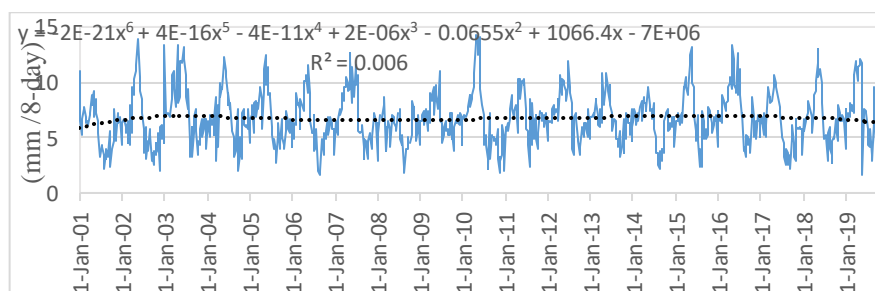
جدول ۳. نتایج برخی از شاخص‌های ارزیابی زوج داده‌های ET مشاهداتی ایستگاه‌های حوضه ارس و ET محصول MOD16.

تابع ارزیابی	اهر	جلفا	ماکو	اردبیل	پارس‌آباد	مشکین‌شهر	گرمی
تعداد	۵۲۱	۵۱۴	۱۴۴	۴۸۱	۴۷۳	۴۱۶	۲۸۶
RMSE (mm/day)	۶/۶	۱۰/۱	۴/۶	۴/۸	۴/۲	۵	۵/۳
MAE (mm/day)	۵/۶	۸/۶	۳/۴	۳/۸	۲	۴	۲/۲
R <sup>2</sup>	۰/۱۱	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۰	۰/۱۵

۲۰۰۶ به مقدار ۱/۶ میلی‌متر برآورد شده است. در شکل (پ-۱) نیز سری‌زمانی مذکور برای ۷ ایستگاه منتخب حوضه ترسیم شده است. ET هشت-روزه ایستگاه‌ها، فراز و نشیب زیادی را نشان می‌دهد که با توجه به تغییرات آن در ماه‌های مختلف سال و کمینه و بیشینه داشتن آن طی سال طبیعی است. میانگین ET هشت-روزه کل ۱۸۴۰۱۴ ساله ۲۰ ساله ۶/۷ میلی‌متر محاسبه شد و در ایستگاه‌های ماکو، پارس‌آباد، گرمی، اردبیل، اهر، مشکین‌شهر و جلفا به ترتیب ۱۱/۶، ۱۰/۲، ۸/۳، ۷/۱، ۶/۷، ۶/۴ و ۴/۴ میلی‌متر به دست آمد. لذا در کل، ET

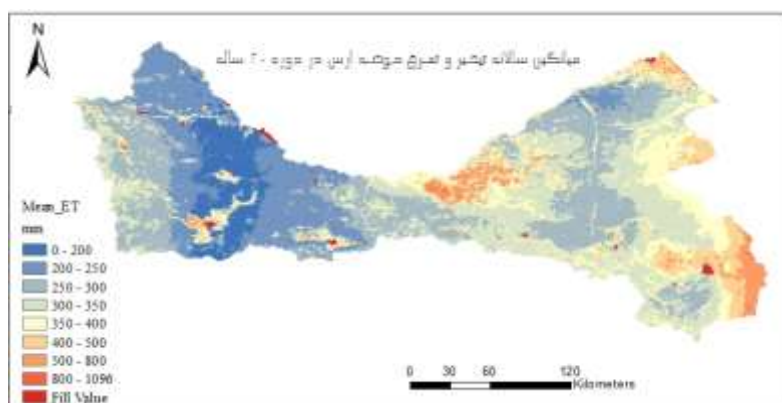
### ۳-۲ سری‌زمانی متغیر در حوضه ارس

برای بررسی الگوی رفتار تغییرات زمانی ET حوضه ارس، سری‌زمانی میانگین هشت-روزه آن بر حسب میلی‌متر برای میانگین کل یاخته‌های محصول MOD16 در حوضه ارس در بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۱۹-۲۰۰۰) ترسیم گردید (شکل ۲). این نمودار نشان می‌دهد متغیر مورد مطالعه در دو سه سال ابتدای این دوره افزایش جزئی داشته اما در ادامه روند آن تقریباً تغییر قابل توجهی را نشان نمی‌دهد و در انتهای دوره کاهش نسبی مشاهده می‌شود. همچنین بیشترین مقدار ET هشت-روزه حوضه برای ۱ می ۲۰۱۰ به مقدار ۱۴/۲ میلی‌متر و کمترین آن برای ۲۱ آگوست



شکل ۲. نمودار سری‌زمانی میانگین هشت-روزه ET (میلی‌متر در ۸ روز) یاخته‌های حوضه ارس در بازه زمانی ۲۰ ساله.





شکل ۳. نقشه میانگین ET یاخته‌های محصول MOD16 در حوضه ارس طی دوره ۲۰ ساله (۲۰۱۹-۲۰۰۰).

پارس آباد را در بر می‌گیرد. هسته‌های طبقه بعدی در شرق گرمی، شمال و غرب اردبیل و حوالی خوی وجود دارند. به غیر از هسته‌های خداآفرین و کلیبر و حوالی خوی و لکه‌های موضعی کوچک غرب حوضه، تقریباً سایر بیشینه‌ها به صورت نواری غیرممتد در شرق حوضه در راستای شمالی-جنوبی متمرکز هستند.

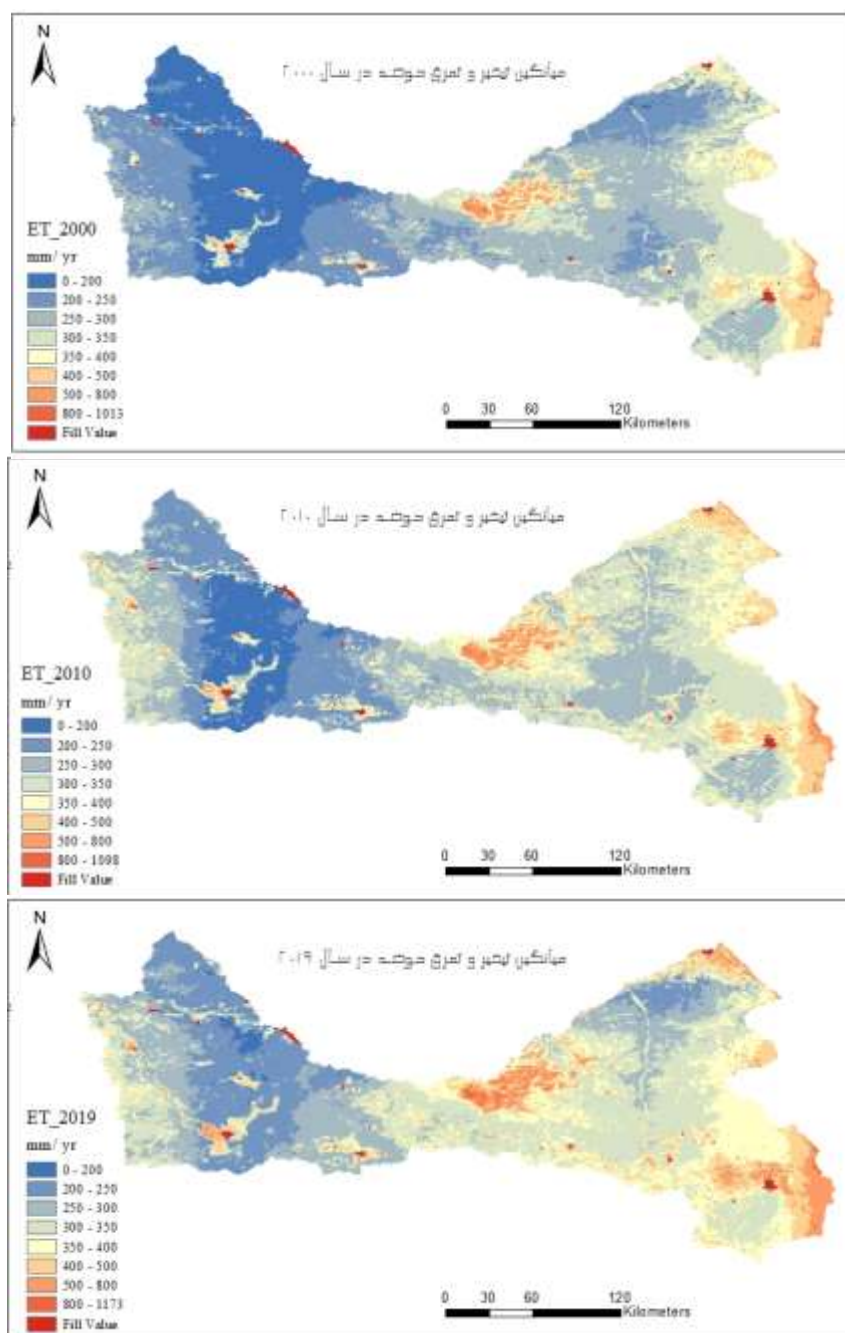
در سال ۲۰۰۰ (شکل ۴)، بالاترین میزان ET متعلق به هسته‌هایی در شرق اردبیل و نمین، خداآفرین و کلیبر و در مرتبه بعدی به نوار شرقی حوضه در راستای شمالی-جنوبی در اطراف پارس آباد و گرمی مغان بوده است. از جنوب غربی پارس آباد و شرق اهر در راستای شمالی-جنوبی حوضه دو هسته کمینه (کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر) و یک هسته کوچک در جنوب اردبیل ملاحظه می‌شود. نیمه غربی حوضه به استثنای حریم مراکز شهری مثل خوی، ET کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهند. نکته حائز اهمیت در این سال، گستره تحت پوشش طبقات دارای مقادیر کمتر از ۴۰۰ میلی‌متر است که حدود ۸۸ درصد حوضه را در بر می‌گیرد.

در میانه دوره (سال ۲۰۱۰)، وسعت هسته‌های بیشینه نسبت به این سال وسیع‌تر شده و علاوه بر خداآفرین و کلیبر، اردبیل، پارس آباد و گرمی، هسته‌های ثانویه‌ای در غرب حوضه نیز پدیدار شده‌اند. به طوری که در این سال،

ماکو، پارس آباد، گرمی و اردبیل بیشتر از میانگین حوضه و اهر، مشگین شهر و جلفا کمتر از میانگین حوضه است.

### ۳-۳ بررسی فضایی متغیر در حوضه ارس

مقادیر فضایی میانگین ۲۰ ساله ET حوضه ارس در دوره ۲۰ ساله از ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ نشان می‌دهد (شکل ۳) با اندکی اغماض می‌توان گفت در مقیاس سالانه نیمه غربی حوضه، ET کمتری نسبت به شرق آن دارد و با مرکزیت هسته بزرگی با مقادیر کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در شمال خوی غالباً دارای ET کمتر از ۳۵۰ میلی‌متر هستند. در شرق حوضه نیز یک هسته کمینه (کوچک‌تر از هسته خوی) درست در جنوب رودخانه ارس و به مرکزیت جنوب غربی پارس آباد مشاهده می‌شود که هاله‌های بعدی آن در راستای شمالی-جنوبی قرار دارند و در مواجهه با غرب اردبیل که ET بیشتری دارد، امکان اتصال هاله‌های اطراف این هسته به هسته ثانویه و کوچک‌تر با ET حدود ۲۵۰ میلی‌متر واقع در جنوب غربی فراهم نمی‌شود. به طور کلی می‌توان گفت حدود ۲۳ درصد حوضه، ET کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر، نیمی از حوضه، ET کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر و حدود ۷۶ درصد حوضه ET کمتر از ۳۵۰ میلی‌متر دارند. چند هسته (ET بین ۵۰۰-۱۱۰۰) به ویژه در شرق حوضه ارس وجود دارد که بزرگ‌ترین آن در خداآفرین و کلیبر، نمین، شرق اردبیل و جنوب شرقی و جنوب



شکل ۴. نقشه‌های توزیع فضای مقادیر ET در حوضه ارس طی سال‌های ابتدا، میانه و انتهای دوره ۲۰ساله.

داخل این مساحت نیز تغییراتی از نظر درصد شمول برخی طبقات نسبت به سال ۲۰۰۰ ملاحظه می‌شود از جمله آنها، افزایش گستره مناطق تحت پوشش طبقه ۴ است که در نوار غربی و نیمه شرقی حوضه نمود بارزی دارد. در این سال، گستره فضایی طبقه ۵ نیز نسبت به سال ۲۰۰۰

وسعت بخش‌های دارای ET بیشتر از ۳۵۰ میلی‌متر از ۱۲ درصد سال ۲۰۰۰ به ۲۲ درصد افزایش یافته و در مقابل، از وسعت مناطق دارای ET کمتر از این مقدار، کاسته شده و به ۷۷ درصد مساحت حوضه تقلیل پیدا کرده است. علاوه بر کاهش مساحت تحت پوشش طبقات ۴-۱، در

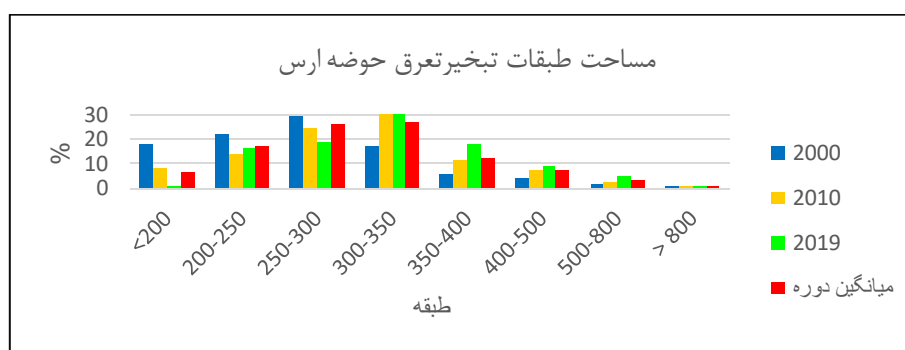
### ۳-۴ بررسی مساحت طبقات ET حوضه ارس در بازه ۲۰ساله

مطابق شکل (۵) بر اساس متوسط سالانه ET در بازه ۲۰ساله، بیش از نیمی از مساحت حوضه ارس در دو طبقه ۴ و ۳ با دامنه‌ای بین ۳۵۰ و ۲۵۰ میلی‌متر قرار دارند. طبقه کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر و در مرتبه بعدی طبقه بین ۳۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر نیز به ترتیب حدود ۱۷ و ۱۲ درصد از کل مساحت حوضه را پوشش می‌دهند و طبقه ۴۰۰-۵۰۰ میلی‌متر و کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر مجموعاً حدود ۷ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شوند. مساحت مقادیر بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر و بیشتر از آن، به‌طور میانگین کمتر از ۳/۵ درصد حوضه را در بر گرفته‌اند. سهم درصدی دو طبقه مذکور در ابتدای دوره ۲۰ساله حدود ۱/۵ درصد حوضه بوده اما در سال ۲۰۱۰ به ۲/۵ درصد و در سال ۲۰۱۹ به ۵/۴ درصد افزایش پیدا کرده است. گستره مکانی تحت پوشش طبقه ۱ (کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر) در ابتدای دوره حدود ۱۸ درصد بوده که از مقایسه آن با طبقه متناظر در میانگین دوره ۲۰ساله (۶/۵) می‌توان دریافت اوایل دوره تبخیر-تعرق کمتری نسبت به نیمه دوم دوره داشته است چراکه سهم درصدی طبقات ۱ تا ۳ (تا ۳۰۰ میلی‌متر) در ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ نسبت به میانگین، عدد افزایشی، ولی درصد همین طبقات در سال ۲۰۰۰ نسبت به میانگین، عدد کوچک‌تری را نشان می‌دهد. شمول فضایی این طبقات در دوره ۵۰ درصد، از حدود ۷۰ درصد ابتدای دوره، به حدود ۴۷ درصد در میانه دوره (۲۰۱۰) و ۳۶ درصد انتهای دوره (۲۰۱۹) کاهش یافته است. در مقابل، درصد پوشش فضایی طبقات بین ۳۰۰ تا بالای ۸۰۰ میلی‌متر در سال ۲۰۱۰ و به‌ویژه ۲۰۱۹ نسبت به میانگین دوره افزایش داشته و تقریباً به رقم دوبرابر طبقات متناظر خود در سال ۲۰۰۰ رسیده‌اند.

لازم به‌ذکر است طیف رنگ اختصاصی برای Fill Value که شامل مراکز شهری/سکونتگاه، پهنه آبی، زمین

افزایش یافته که بیشتر شامل شمال شرقی حوضه (دشت مغان) و هاله‌ای به دور هسته شمال اهر می‌شود، هرچند این طبقه در قیاس با میانگین دوره، افزایشی را نشان نمی‌دهد. سال ۲۰۱۹، از مساحت مناطق دارای ET کمتر از ۳۵۰ میلی‌متر کاسته شده و حدود ۶۶ درصد حوضه ارس را در بر می‌گیرد. در عوض، مساحت مناطق تحت پوشش ET بالاتر از ۳۵۰ میلی‌متر در مقایسه با میانگین و ابتدای دوره در بخش شرقی و مرکزی حوضه افزایش یافته و در کل به ۳۳ درصد رسیده است. مناطق دارای ET بین ۴۰۰-۳۰۰ تقریباً نیمی از حوضه را شامل می‌شوند. در این سال شمال اردبیل شاهد افزایش ET در حدود ۳۵۰ میلی‌متر و تغییر طبقه از ۴ به ۵ بوده است. همانند سال ۲۰۱۰، در این سال نیز منتهی‌الیه غرب حوضه با افزایش ET مواجه بوده و یکپارچگی نسبی آن به‌ویژه در حریم مراکز شهری دستخوش تغییراتی شده‌اند. در نیمه شرقی حوضه نیز همچنان کانون‌های بیشینه اولیه در اطراف اردبیل، پارس‌آباد و خداآفرین و کلیبر از نظر فضایی گسترده‌تر شده‌اند.

نکته جالب توجه در خصوص هسته‌های کمینه شرق حوضه این است که در ابتدای دوره، دو هسته شمالی و جنوبی با ET کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر به همراه هاله‌های دارای مقادیر تا ۲۵۰ میلی‌متر دیده می‌شود. این هسته‌ها در سال ۲۰۱۰ با افزایش دامنه مواجه بوده است؛ به‌طوری‌که هسته شمالی تقریباً از بین رفته و دامنه‌ای بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد؛ هسته جنوبی هم که با هاله اطراف خود یکی شده با افزایش ET مواجه بوده و مقدار آن به ۲۵۰ میلی‌متر رسیده است. در حالی که در انتهای دوره، هسته شمالی هرچند از لحاظ وسعت کاهش یافته اما همچنان برقرار است ولی اثری از هسته جنوبی مشاهده نمی‌شود و مناطق سابقاً تحت گستره آن هسته، ذیل پوشش طبقه‌ای با ET کمتر از ۳۵۰ میلی‌متر قرار گرفته است.



شکل ۵. مساحت هر یک از طبقات ET حوضه ارس به درصد.

اشاره شد. نقشه تفاضل ۲۰ ساله نیز از نظر کلیات مشابه دهه دوم است اما تفاوت‌هایی نیز دارد؛ از جمله این که دامنه تغییرات آن بزرگ‌تر از دهه‌ای است و بین ۱۶۰ میلی‌متر کاهش و ۷۹۰ میلی‌متر افزایش متغیر است. هرچند این مطلب لزوماً به معنای افزایش گستره در برگیری مناطق درگیر با افزایش حداکثری ET نبوده بلکه بیشتر مختص بخش‌هایی از همان هسته‌های پیشینه از قبیل خداآفرین، کلیر و شرق اردبیل، منتهی‌الیه شمال‌شرقی دشت مغان در پارس‌آباد است. به عبارتی، ET مناطق ذکر شده در سال ۲۰۱۹ در مقایسه با سال ۲۰۰۰ کاهش یافته است. بیشترین مقدار کاهش ET در دوره ۲۰ ساله نیز مربوط به نواحی مرکزی دشت مغان و دو هسته کم‌وسعت حوالی جنوب اردبیل و شمال‌شرقی اهر است. غرب حوضه در شمال خوی نیز شاهد کاهش مقدار ET در سال ۲۰۱۹ نسبت به ابتدای دوره بوده است البته نه به صورت یکپارچه و با همان شدت مرکز دشت مغان، بلکه کاهش ملایم‌تر و کمتری را تجربه کرده است. سایر بخش‌های حوضه نیز افزایش کمتری داشته‌اند.

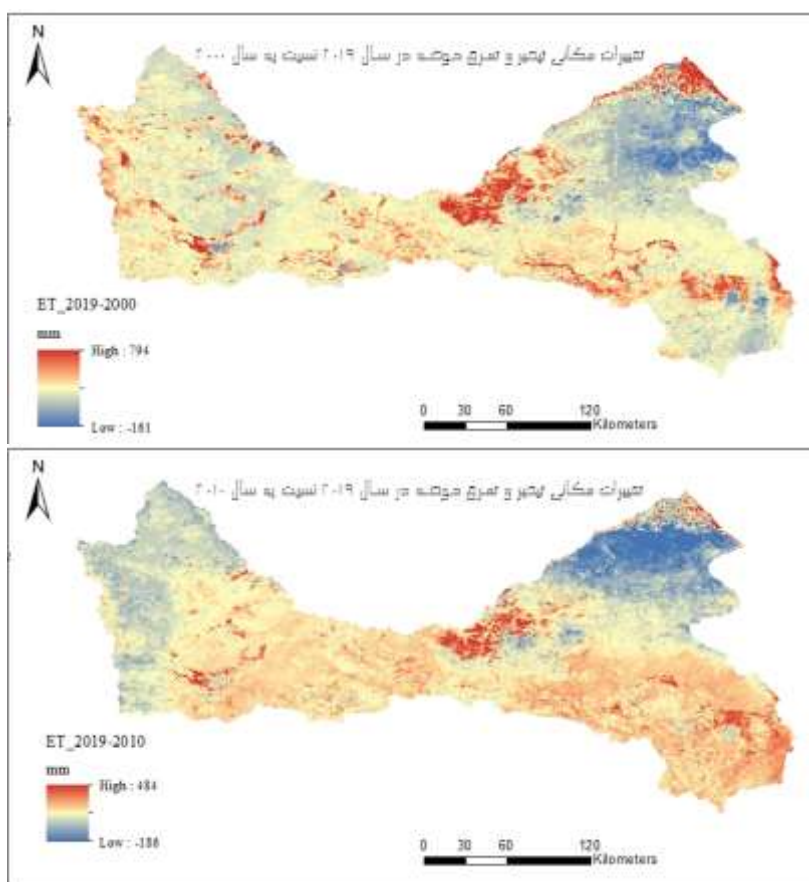
### ۳-۶ ارتباط متغیر ET با نوع کاربری و پوشش گیاهی حوضه ارس

به منظور اطلاع از نوع کاربری و پوشش گیاهی و ارتباط آنها با تغییرات ET حوضه، نقشه آنها در شکل‌های ۷ و ۸

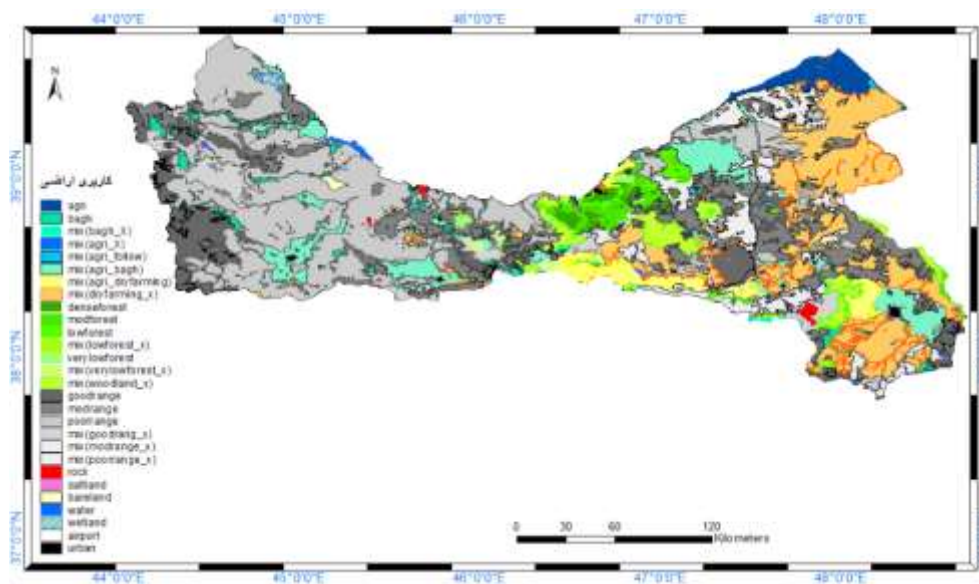
بایر یا با پوشش تنک است در نقشه‌ها به ترتیب ۰/۴۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۹ و مجموعاً ۰/۵۲ از حوضه را به خود اختصاص دادند.

### ۳-۵ تغییرات فضایی متغیر ET در حوضه ارس در بازه زمانی مورد مطالعه

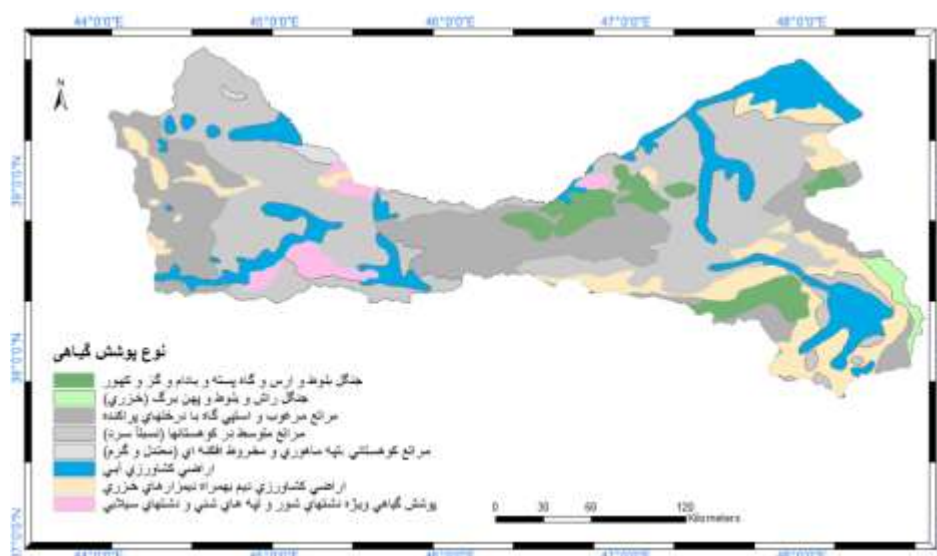
به منظور ارزیابی تغییرات مکانی ET سالانه حوضه در بستر زمان، نقشه‌های تفاضل انتهای دوره از میانه و ابتدای دوره ترسیم شد (شکل ۶). در خصوص تغییرات مکانی ET حوضه در نیمه دوم دوره (۲۰۱۹-۲۰۱۰) بیشترین مقدار کاهش (حداکثر تا ۱۸۰ میلی‌متر) به شمال‌شرقی حوضه در دشت مغان به استثنای منتهی‌الیه آن در پارس‌آباد مربوط می‌شود جایی که در سال ۲۰۱۹ هسته کمینه‌ای را نشان می‌دهد در حالی که در سال ۲۰۱۰ اثر چندان بارزی از این هسته به غیر از یک نوار باریک دیده نمی‌شود. با مقایسه نقشه میانگین دوره و نقشه سال ۲۰۱۰ می‌توان استدلال کرد که یکی از دلایل این امر می‌تواند وجود بی‌هنجاری منفی سال ۲۰۱۰ در این محل از حوضه باشد. چراکه بر خلاف سایر نقشه‌ها در نقشه این سال، منطقه مذکور با افزایش یک‌الی دو طبقه‌ای ET مواجه بوده است. بیشترین مقدار تغییر افزایشی (حداکثر تا ۴۸۰ میلی‌متر) نیز مربوط به هسته‌های پیشینه از جمله شامل خداآفرین، کلیر، نمین، شرق اردبیل، پارس‌آباد و خوی است که پیش‌تر به آنها



شکل ۶. نقشه‌های تغییرات مکانی ET حوضه ارس در بستر زمان (مقایسه تفاضل داده سال ۲۰۱۹ با ۲۰۱۰ و ۲۰۰۰).



شکل ۷. نقشه کاربری اراضی حوضه ارس.



شکل ۸. نقشه پوشش گیاهی حوضه ارس.

داشتن هسته کمینه در طول سالها، تغییرات کاهشی در دوره ۲۰ساله دارد و مراتع مرغوب جنوب غربی و منتهی الیه غرب حوضه نیز هرچند ET کمتری دارند و تغییرات کاهشی را نشان می دهند اما بعضاً شکل گیری و توسعه خزنده لکه های موضعی با ET بیشتر در کاربری هایی مثل زراعی-باغی در قیاس با حوالی خود که در نقشه تفاضل دوره در حوضه نمودار شده، در صورتی که با همین روال پیش برود نشانه ای از تغییر به نفع مقادیر افزایشی در آینده است. هسته کمینه ET واقع در جنوب غربی پارس آباد و غرب بیله سوار و گرمی و شمال کلپیر، پوشش مرتعی فقیر و مخلوط آن با دیگر کاربری ها و مخلوط زراعی دیم با دیگر کاربری ها دارد

پایش تغییرات سالانه کاربری اراضی حوضه با استفاده از لایه نوع اول پوشش زمین طبقه بندی IGBP نشان داد در قسمت هایی که در اواخر دوره نسبت به ابتدای دوره با افزایش ET روبه رو بوده اند، تغییراتی از نظر نوع کاربری و درصد تحت پوشش آن رخ داده است. به عنوان مثال دو درصد از پوشش علفزار اردبیل کاسته شده و به همین میزان بر مساحت کاربری مزارع آن افزوده شده است. از

آورده شده است. اغلب بخش های حوضه ارس با پوشش مرتعی اعم از مرغوب، متوسط و فقیر و یا مخلوط مرتع و سایر کاربری ها پوشیده شده است که در غرب به صورت منسجم تر از شرق است. بخش های خداآفرین و کلپیر به عنوان هسته بیشینه ET، در برگزیده جنگل متراکم هستند که با وجود انبوه درختان بلوط، ارس و گاه پسته و بادام و گز و کهور، در همراهی با ارتفاع و شیب زیاد، بالا بودن مقدار ET در آنجا را تا حد زیادی توجیه می کند، هرچند ممکن است علل دیگری هم در آن دخیل باشند، زیرا این بخش ها نیز جز نواحی هستند که طی دوره مورد مطالعه، شاهد تغییرات افزایشی زیادی بوده اند. کاربری زراعی آبی در حوالی پارس آباد و در مرتبه بعد، مخلوط زراعی دیم و دیگر کاربری، در بیله سوار و گرمی مغان، درختستان نوار مرزی نمین، زراعی-باغی اردبیل و مراتع مرغوب جنوب شرقی آن نیز از جمله کاربری های واقع در نیمه شرقی حوضه هستند که با تغییرات افزایشی ET مواجه بوده اند و هسته های بیشینه تغییرات افزایشی ET حوضه بر روی این محل ها شکل گرفته اند. در مقابل، نیمه غربی حوضه دارای پوشش مرتعی متوسط با ET کمتر، ضمن

شدند و شرق و جنوب شرقی اردبیل و نمین، خداآفرین و کلیبر و حوالی پارس آباد را در بر می‌گیرند که با نزدیک شدن به انتهای دوره، این هسته‌ها از نظر مساحت، وسیع تر و از نظر مقدار، بیشتر می‌شوند. به غیر از هسته پارس آباد، سایر هسته‌های بیشینه از سال ۲۰۰۰ البته نه به وسعت و شدت سال ۲۰۱۹ وجود داشتند؛ ولی هسته پارس آباد از سال ۲۰۰۱ به بعد تشکیل شده و در سال‌های بعدی بر وسعت آن افزوده شده است. یکی از علل وجود هسته‌های بیشینه در شرق حوضه ارس می‌تواند ناشی از نزدیکی این قسمت از حوضه به یکی از منابع رطوبتی (دریای خزر) باشد که موحدانش (۱۳۷۳)، نیز علت پربارش بودن شرق حوضه ارس تا حوالی اهر را ناشی از دریافت رطوبت و بارش کافی حاصل از عبور جریان هوای مرطوب با منشأ خزری عنوان کرده است که بخش‌های غربی حوضه از این جریان‌ها به دلیل دوری بهره‌چندانی را نمی‌برند.

با وجود این که در حوضه ارس، هسته بیشینه ET در بخش‌های نظیر خداآفرین و کلیبر تا حدی با عامل ارتفاع زیاد و شیب بالا همراهی دارد اما این ارتباط بین عوامل یاد شده با ET بیشتر و تغییرات آن برای تمامی حوضه قابل تعمیم نیست چراکه دشت اردبیل با وجود ارتفاع پایین و شیب کم نیز هسته بیشینه را نشان می‌دهد و در عین حال جنوب غربی حوضه با وجود ارتفاع زیاد و شیب بالا، ET بالایی غیر از حوالی مرکز شهری مثل خوی، مشاهده نمی‌شود.

به لحاظ تغییرات تفاضل ET در انتهای دوره نسبت به ابتدای آن، از بین کاربری‌های اراضی و پوشش گیاهی حوضه ارس، کاربری زراعی آبی در پارس آباد، جنگل‌های متراکم (بلوط، ارس و گاه‌آسته و بادام و گز و کهور) در خداآفرین و کلیبر، مراتع مرغوب جنوب شرقی اردبیل و مخلوط کشاورزی-باغی آن، تغییر افزایشی قابل توجهی را نشان می‌دهند. این یافته با بررسی

زمین‌های بایر کاسته شده اما به اراضی شهری و مسکونی و درختستان افزوده شده است. در پارس آباد پوشش علفزار ۱۲-۷ درصد کاهش و مزارع ۱۰-۷ درصد افزایش یافته‌اند. همچنین اراضی بایر کاهش و زمین شهری افزایش یافته است در خداآفرین و کلیبر از مساحت پوشش جنگلی در میانه دوره کاسته شده اما در ۲۰۱۹ بر مساحت آن افزوده شده است. علفزارهای آنها تا ۲۰۱۹، ۴ درصد از مساحت خود را از دست داده و مزارع ۳ درصد افزایش یافته‌اند. درصد زمین بایر و پهنه آبی نیز افزایش داشته که این پهنه‌ها به دلیل احداث سد در آنجاست. درصد موزائیک پوشش گیاهی طبیعی و مزرعه نیز تا ۲۰۱۹ در این دو شهرستان افزایش داشتند. به‌طور کلی از تغییرات کاربری رخ داده در سه هسته بیشینه تغییر افزایشی ET می‌توان چنین استنباط کرد که کاهش علفزار به نفع افزایش مزارع، با توجه به نیاز آبی بالای مزارع در مقایسه با علفزارهای عمدتاً خودرو و نیز افزایش سطح جنگل در کلیبر و خداآفرین با توجه به افزایش تعریق درختان تا حد زیادی می‌تواند در بالا رفتن مقدار ET آنها مؤثر واقع شود.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش دقت MOD16 در برآورد تبخیر-تعرق حوضه ارس برای دوره ۲۰ساله (۲۰۱۹-۲۰۰۰) و تغییرات زمانی-مکانی آن ارزیابی شد. هرچند دقت این محصول در نقاط مختلف حوضه یکسان نیست اما داده‌های تخمینی ET این فرآورده می‌تواند ضمن برطرف کردن نقاط ضعف داده‌های نقطه‌ای، انتخاب خوبی در نواحی بدون داده ایستگاهی باشد. ارزیابی ET جنوب حوضه آبریز ارس با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس نشان داد که نیمه غربی حوضه، در تمامی نقشه‌ها (سال ۲۰۱۹، ۲۰۱۰، ۲۰۰۰ و میانگین دوره) میانگین کمتری نسبت به شرق آن دارد. در مقابل، هسته‌های بیشینه ET در نیمه شرقی حوضه واقع

تغییرات سالانه کاربری اراضی این قسمت‌ها مشخص شد که تا حد زیادی ناشی از تغییر و کاهش کاربری علفزار (مرتع) و بایر به مزارع آبی و افزایش سطح جنگل متراکم خداآفرین و کلیبر است که افزایش ET را در پی داشته است. در خصوص کاربری‌های زراعی آبی بر افزایش نیاز آبی گیاهان و لزوم تحقیقات بیشتر و تجدید نظر در نوع سیستم آبیاری و استفاده از کانال‌های سرپوشیده به جای کانال‌های روباز تأکید دارد؛ اما با توجه به این که چندین متغیر اقلیمی از قبیل دما، سرعت باد، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، بارش و عوامل جغرافیایی بر ET تأثیرگذار هستند، افزایش ET می‌تواند ناشی از تغییر همان متغیرها باشد که نیاز به بررسی دقیق‌تر تغییرات آنها احساس می‌شود. همچنان که دین‌پژوه و همکاران (۱۳۹۷) از طریق حساسیت‌سنجی متغیرهای معادله پنمن-مانتیس-فانو به این نتیجه رسیدند که به‌ازای افزایش ۲۰ درصدی حداکثر دما به شرط ثابت ماندن سایر پارامترها، مقدار ETo در اردبیل حداکثر تا ۱۵/۵ درصد افزایش را نشان داد. اسمعیل‌پور و دین‌پژوه (۱۳۹۱) نیز در تحلیل روند بلندمدت متغیرهای هواشناسی مؤثر بر ETo حوضه ارس (۲۰۰۸-۱۹۸۶) دریافته‌اند که در اهر (به‌عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه به کلیبر و خداآفرین) روند ETp، حداقل، حداکثر و متوسط دمای هوا، سرعت باد و ساعات آفتابی و در اردبیل سه متغیر دمایی، حداقل رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی و در پارس‌آباد متغیر ساعات آفتابی افزایش داشته‌اند. در مقابل نواحی دارای روند افزایشی ET، زراعی دیم، مخلوط مراتع فقیر و سایر کاربری‌ها در جنوب پارس‌آباد، بیله‌سوار و گرمی مغان و تا حدودی مراتع فقیر غرب حوضه ارس، از جمله کاربری‌هایی است که ET آنها در این دوره، تغییرات کاهشی داشته است.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی عناصر مهم و مؤثر در ET بر اساس داده‌های به‌روز برای حوضه ارس بررسی شود تا ضمن علت‌یابی دقیقی از وجود تغییرات

افزایشی و کاهشی در قسمت‌های مختلف حوضه، به عمل آید؛ در صورتی که علت کاهش ET در بخشی مربوط به نحوه مدیریت منابع آب باشد، از روش‌های به کار رفته در آن نواحی برای سایر قسمت‌های حوضه نیز استفاده شود و اگر علت افزایش ET به نوسانات اقلیمی بازمی‌گردد تصمیمات مقتضی برای مدیریت بهینه منابع آب، تطبیق نوع کشت و انتخاب گونه‌های با نیاز آبی کمتر اتخاذ شود.

### منابع

اسمعیل‌پور، م.، دین‌پژوه، ی.، ۱۳۹۱، تحلیل روند بلندمدت تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه جنوبی رود ارس. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۳ (۳): ۲۱۰-۱۹۳.

پارسی‌نژاد، م.، رجا، ا.، چهره‌نگار، ب.، ۱۳۹۹، تحلیل کاربردی مقادیر تبخیرتعرق برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای در شناسایی مناطق با پتانسیل صرفه‌جویی مصرف آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶ (۳): ۳۸۸-۳۹۳.

جعفری‌شندی، ف.، جهان‌بخش اصل، س.، رضایی بنفشه، م.، مسعودیان، ا.، ۱۳۹۷، بررسی تغییرات زمانی تبخیر و تعرق واقعی و ارتباط آن با دما و بارش در استان آذربایجان شرقی با استفاده از فرآورده دورسنجی مودیس ترا، پژوهش‌های جغرافیایی، ۵۰ (۴): ۶۹۶-۶۸۵.

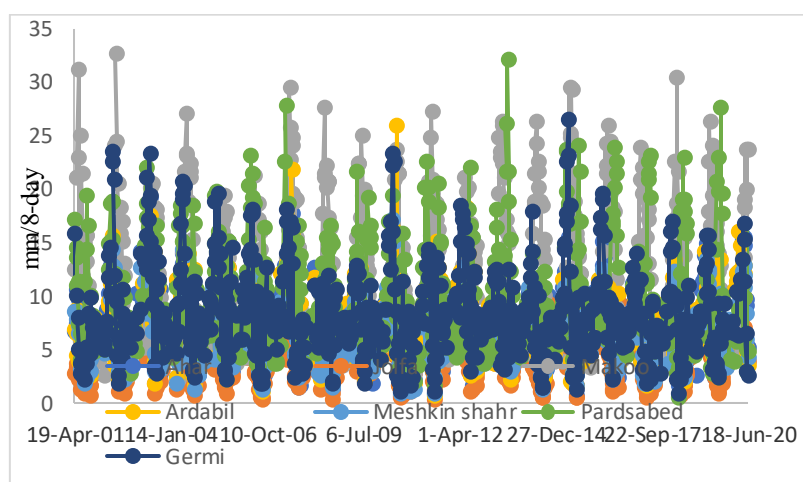
جهانبخش، س.، رضایی بنفشه، م.، اسمعیل‌پور، م.، تدینی، م.، ۱۳۹۱، ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیرتعرق پتانسیل و توزیع مکانی سالانه آن در حوضه جنوبی رود ارس، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۶ (۴۰): ۴۶-۲۵.

دین‌پژوه، ی.، جهان‌بخش اصل، س.، فروغی، م.، ۱۳۹۷، تحلیل حساسیت تبخیر تعرق به تغییر در پارامترهای هواشناسی در شمال غرب و غرب ایران، نشریه



- estimation models for use in semi-arid environments. *Agricultural Water Management* 64: 91–106
- Degano, M. F., Rivas, R. E., Sánchez, J. M., Carmona, F. and Niclòs, R., Assessment of the Potential Evapotranspiration MODIS Product Using Ground Measurements in the Pampas. Conference: 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). DOI: 10.1109/ARGENCON.2018.8646143
- Elnashar, A., Wang, L., Wu, B., Zhu, W. and Zeng, H., 2021, Synthesis of global actual evapotranspiration from 1982 to 2019. *Earth System Science Data*, 13, 447–480. <https://doi.org/10.5194/essd-13-447-2021>
- Faisol, A., Indarto, I., Novita, E. and Budiyo., 2020, An evaluation of MODIS global evapotranspiration product (MOD16A2) as terrestrial evapotranspiration in East Java – Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. DOI: 10.1088/1755-1315/485/1/012002
- Hu, G., Jia, L., Menenti, M., 2015, Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. *Remote Sensing of Environment*. 156, 510-526.
- Jang, K., Kang, S., Lim, Y.-J., Jeong, S., Kim, J., Kimball, J. S. and Hong, S. Y., 2013, Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 12927–12940, doi:10.1002/2013JD020639
- Jia, L., Xi, G., Liu, S., Huang, C., Yan, Y. and Liu, G., 2009, Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. *Hydrology Earth System Sciences*. 13, 1775–1787.
- Jun, X., Bingfang, W. and Shufu, L., 2017, Estimation and Calibration of Remote Sensed Evapotranspiration for Hai River Basin. <https://www.researchgate.net/publication/267783554>
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.I., Sheffield, J., Goulden, M. L., Bonan, G. B., Cescatti, A., Chen, J., de Jeu, R., Dolman, A. J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J. S., Law, B. E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K. W., Papale, D., Richardson, A. D., Rouspard, O., Running, S. W., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S. and Zhang, K., 2010, Recent حفاظت منابع آب و خاک، ۸ (۲): ۱۴-۱.
- رحیم‌پور، م، کریمی، ن، مهدیان، ف، ۱۳۹۹، ارزیابی مدل SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در شرایط کمبود داده (مطالعه موردی دشت رفسنجان). فصلنامه فضای جغرافیایی، ۲۰ (۷۰)، ۱۸-۱.
- مربوطه، ب، اشرف‌زاده، ا، وظیفه‌دوست، م، خالدیان، م، ۱۳۹۷، مقایسه تبخیر و تعرق واقعی محصول MOD16 و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAP (مطالعه موردی: مزارع تحت کشت ذرت در استان قزوین)، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۲)، ۷۱-۶۲.
- موحدان‌ش، ع، ۱۳۷۳، هیدرولوژی آب‌های سطحی ایران، تهران، انتشارات سمت، چاپ اول، ۳۷۸ صفحه.
- Aguilar, A. L., Flores, H., Crespo, G., Marín, M. I., Campos, I. and Calera, A., 2018, Performance Assessment of MOD16 in Evapotranspiration Evaluation in Northwestern Mexico. *Water* 2018, 10, 901; doi:10.3390/w10070901
- Allies, A., Demarty, J., Olioso, A., Issoufou, H. B., Mainassara, I., Chazarin, J., Oï, M., Velluet, C., Bahir, M. and Cappelaere, B., 2017, Estimating evapotranspiration from remote sensing: the case of Sahelian Africa. *IAHS Scientific Assembly 2017*. IAHS2017-164
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A. and Holtslag, A. A. M., 1998, A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation, *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212.
- Chen, Y., Xia, J., Liang, Sh., Eeng, J., Fisher, J. B., Li, X., Liu., Ma, Z., Miyata, A., Mu, Q., Sun, L., Tang, J., Wang, K., Wen, J., Xue., Y., Yu, G., Zha, T., Zhang, L., Zhang, Q., Zhao, T., Zhao, L. and Yuan, W., 2014, Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China. *Remote Sensing of Environment* 140 (2014) 279–293.
- Cleugh, H. A., Leuning, R., Mu, Q., Running, S. W., 2007, Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment* 106, 285–304.
- Dehghani Sanij, H., Yamamoto, T. and Rasiah, V., 2004, Assessment of evapotranspiration

- water-balance model calibrated on satellite land surface temperature over the Heihe basin. *Journal of Arid Environments* **188** (2021) 104466.
- Ruhoff, A. L., Paz, A. R., Aragao, L. E. O. C., Mu, Q., Malhi, Y., Collischonn, W., Rocha, H. R. and Running, S. W., 2013, Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (8), 1658–1676. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.837578>
- 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), Version 2.2, June 10, 2019.
- Shekar, N. C. S., Nandagiri, L., 2016, Actual Evapotranspiration Estimation Using a Penman-Monteith Model. *Int'l Journal of Advances in Agricultural & Environmental Engg. (IJAAEE)* **3**, Issue 1 (2016) ISSN 2349-1523 EISSN 2349-1531
- Su, Z., 2002, the surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **6**(1), 85-99.
- Sun, Z., Gebremichael, M., Ardö, J. and de Bruin, H. A. R., 2011, Mapping daily evapotranspiration and dryness index in the East African highlands using MODIS and SEVIRI data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **15**, 163–170. doi:10.5194/Hess-15-163-2011
- Wang, S. Pan, M. Mu, Q. Shi, X. Mao, J. Brümmer, C. Jassal, R. Krishnan, P. Li, J. and Black, T., 2015, Comparing Evapotranspiration from Eddy Covariance Measurements, Water Budgets, Remote Sensing, and Land Surface Models over Canada. *Journal of hydrometeorology*. **16**, 1540–1560, doi:10.1175/JHM-D-14-0189.1
- Yin, L. Wang, X. Feng, X. Fu, B. and Chen, Y., 2020, A Comparison of SSEBop-Model-Based Evapotranspiration with Eight Evapotranspiration Products in the Yellow River Basin, China. *Remote Sens.* **12**, 2528; doi:10.3390/rs12162528
- decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, **467**, 951-954.
- Kerres, M. and Schiffler, M., 2010, Adaptation to Climate Change in the Kura-Aras River Basin. BMZ. Federal ministry for Economic Cooperation and Development.
- Los, S. O., Collatz, G. J., Sellers, P. J., Malmstrom, C. M., Pollack, N. H., DeFries, R. S., et al., 2000, A global 9-yr biophysical land surface dataset from NOAA AVHRR data. *Journal of Hydrometeorology*, **1**(2): 183-199.
- Marshall, M., Tu, K., Funk, C., Michaelsen, J., Williams, P., Williams, C., Ardö, J., Boucher, M., Cappelaere, B., de Grandcourt, A., Nickless, A., Nouvellon, Y., Scholes, R. and Kutsch, W., 2013, Improving operational land surface model canopy evapotranspiration in Africa using a direct remote sensing approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **17**, 1079–1091, doi:10.5194/hess-17-1079-2013
- Monteith, J. L., 1965, Evaporation and environment. In: B.D. Fogg, ed. *The state and movement of water in living organisms*. Symposium of the Society of Experimental Biology **XIX**. Cambridge: Cambridge University Press, 205–234, doi:10.1002/iroh.19670520242.
- Mu, Q., Heinsch, F. N., Zhao, M. and Running, S. W., 2007, Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*. **111**(4), 519-536.
- Mu, Q., Zhao, M. and Running, S. W., 2011, Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, **115** (8), 1781-1800.
- Mu, Q., Zhao, M. and Running, S. W., 2013, Algorithm Theoretical Basis Document: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Collection 5. NASA Headquarters
- Nishida, K., Nemani, R. R., Glassy, J. M. and Running, S. W., 2003, Development of an Evapotranspiration Index from Aqua/MODIS for Monitoring Surface Moisture Status. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, **41**(2), 493-501.
- Paciolla, N., Corbari, Ch., Hu, G., Zheng, Ch., Menenti, M., Jia, L. and Mancini, M., 2021, Evapotranspiration estimates from an energy-



شکل پ-۱. نمودار سری‌زمانی میانگین ET هشت‌روزه (میلی‌متر) ایستگاه‌های منتخب حوضه ارس در بازه زمانی ۲۰ساله.

## Evaluation of evapotranspiration changes in the Aras basin using spatial high resolution MOD16 product

Mahnaz Saber<sup>1</sup>, Bromand Salahi<sup>2\*</sup> and Abbas Mofidi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>2</sup> Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor of Climatology, Faculty of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 01December 2021, Accepted: 08 February 2022)

### Summary

In this study, to evaluate the spatiotemporal changes of total evapotranspiration (ET) in the southern part of the Aras river basin, the MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration ET Product (MOD16) for collection 6 for a statistical period of 20 years (2000-2019) was used. The spatial resolution of this data is 500 meters, and its temporal resolution is 8-day. First, the product ET data was compared with the evaporation stations data, and the accuracy of the product was evaluated and validated using correlation, determination coefficient, Root Mean Squared Error (RMSE), and Mean Absolute Error (MAE). Then ET time series was calculated for the whole basin and its trend was plotted. Annual ET maps and their spatial change maps for the 20-year period were also mapped. In addition, the area of each ET class was calculated as a percentage, and the class changes over time were examined. The results showed that during the period in general, the west of the basin had lower average evapotranspiration than the east. All maximum cores except Parsabd core, have existed since 2000, but the maximum core in Parsabad has been formed since 2001 and has gradually. The results showed, the percentage of the spatial coverage of classes larger than 300 mm in 2010 and especially in 2019 has increased compared to the average period. It has almost doubled to the number of their respective classes in 2000. The ET of the basin and the type of land use and land cover were investigated to find a possible relationship between them. The most increasing change in the ET amount at irrigated agro-use in Parsabad, dense forests in Khodaafarin and Kaleybar, high quality pastures southeastern and agricultural-horticultural mixture in Ardabil and in constant, the most decreasing change in the ET amount at rainfed agricultural use, a mixture of poor pastures and other uses in the south of Parsabad, Bilesvar and Garmi Moghan and to some extent poor pastures in the west of the basin were observed. The increasing change in ET in the mentioned areas was partly due to their land use change. Annual land use changes in these areas showed that it was largely due to the change and reduction of grassland (pasture) and bareland to irrigated fields and the increase in the percentage of dense forest at Khodaafarin and Kaleybar, which led to an increase in ET. Regarding irrigated agricultural uses, it emphasizes the increasing water needs of plants and the need for further research and revision of the type of irrigation system and the use of indoor canals instead of open canals. The increase in ET can also be due to the increasing changes in the meteorological variables that affect it, such as air temperature, wind speed, etc. and how water resources management, the clarification of which requires detailed research. Increased water needs of plants will be only one of the consequences of increasing ET.

**Keywords:** Evapotranspiration, Aras Basin, MOD16

\*Corresponding author:

bromand416@yahoo.com