

مقاله علمی-پژوهشی

مقایسه برآوردهای تبخیرتعرق واقعی حاصل از ماهواره SENTINEL-2 با معادله پنمن مانیتث در حوضه گرگانرود - قره‌سو

امیرحسین پیرمون^۱، نوذر قهرمان^{۲*}، مهدی قمقامی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵

چکیده

پژوهش حاضر با هدف مقایسه تبخیرتعرق برآورد شده از ماهواره SENTINEL-2 با مقادیر متناظر از معادله پنمن مانیتث فائو (FAO 56 PM) انجام شده است. در این تحقیق با استفاده از محصولات ماهواره‌ای SENTINEL-2 تبخیرتعرق واقعی در ۸ ایستگاه حوضه گرگانرود - قره‌سو برای ۴ ماه گرم سال (مارس، آوریل، مه و ژوئن) در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ برآورد شد. شاخص آماری R^2 بین برآوردهای معادله و داده‌های SENTINEL-2 به ترتیب برای ایستگاه‌های رضوان، بندرترکمن، علی‌آبادکنول، گنبدکاوس، کلاله، گرگان، گرگان هاشم‌آباد و مینودشت برابر ۰/۹۵، ۰/۷۶، ۰/۸۶، ۰/۸۷، ۰/۸۰، ۰/۸۶، ۰/۸۴، ۰/۸۵ به دست آمد. همچنین شاخص آماری RMSE بین برآوردهای معادله PM نسبت به داده‌های SENTINEL-2 به ترتیب در ایستگاه‌های فوق‌الذکر ۰/۲۱، ۰/۳۰، ۰/۲۲، ۰/۳۷، ۰/۲۵، ۰/۳۱، ۰/۲۹، ۰/۲۰ تعیین شد. بالاترین تطابق داده‌های ماهواره SENTINEL-2 با برآوردهای معادله، مربوط به ایستگاه رضوان و کمترین همبستگی مربوط به ایستگاه گنبدکاوس است. افزایش وضوح مکانی از طریق استفاده از SENTINEL-2 می‌تواند دقت برآوردهای کمی تبخیرتعرق را به طرز معنی‌داری افزایش دهد. براین اساس، می‌توان از محصول تبخیرتعرق واقعی ماهواره SENTINEL-2 به‌عنوان جایگزین روش‌های رایج، در صورت عدم وجود یا کمبود داده‌های مشاهده‌ای در مناطقی با اقلیم خشک تا نیمه‌خشک استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تبخیرتعرق، تصاویر ماهواره‌ای، حوضه گرگانرود، SENTINEL-2

مقدمه

برآوردهای تبخیرتعرق است. تحقق این امر در گرو شناخت هر چه دقیق‌تر اجزای ترازمندی آب یعنی بارش، آب‌های سطحی، زیرزمینی و به‌خصوص تبخیرتعرق است (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷). از میان این اجزا، تبخیرتعرق واقعی از عوامل مهم محاسبه ترازمندی آبی یک حوضه بوده و معرف بخشی از تلفات بارندگی است. مقدار این متغیر به میزان آب موجود در خاک و گیاه، عناصر اقلیمی، نوع خاک و گیاه بستگی دارد که برهمکنش‌های پیچیده دارند. مدیریت بهینه منابع آب نیازمند تعیین دقیق مؤلفه‌های ترازمندی آب در هر منطقه است. تبخیرتعرق که شامل تبخیر از سطح آب یا خاک مرطوب و تعرق از سطح پوشش گیاهی است، یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین اجزای ترازمندی آب در هر منطقه است؛ بنابراین استفاده از روش‌های برآورد تبخیرتعرق در سطوح محلی و منطقه‌ای برای هر منطقه ضروری است. روش‌هایی که برای اندازه‌گیری تبخیرتعرق استفاده می‌شود به دو گروه روش‌های مستقیم و روش‌های سنجش‌ازدور

به دلیل واقع‌شدن بخش‌های عمده‌ای از کشور ایران در مناطق اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و نیز توزیع زمانی و مکانی ناموزون بارندگی‌ها، بروز تنش آبی چالشی فزاینده و رو به گسترش است. از طرفی افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی مستلزم تدقیق

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- گروه علوم و مهندسی آب‌و‌خاک، دانشکده تحقیقات کشاورزی هسته‌ای، پژوهشکده علوم و فناوری هسته‌ای، تهران، ایران

*-نویسنده مسئول: (Email: nghahreman@ut.ac.ir)

۳۰ درصد در مناطق کشاورزی است. مطالعه انجام شده در ایالت تورینگن در مرکز آلمان نشان می‌دهد که در این منطقه، پوشش‌های جنگلی برای محاسبه تبخیرتغرق واقعی با استفاده از ماهواره Copernicus SENTINEL-1 مناسب‌تر هستند. این مطالعه بر روی یک مساحت ۲۴۵۲ کیلومترمربع برای مدت ۵ سال انجام شد. تجزیه‌وتحلیل‌های انجام شده ارتباط قوی بین بازپرتو SENTINEL-1 و بازپرتو SAR C-Band 1 و برآوردهای تبخیرتغرق بر مبنای داده‌های هواشناسی را نشان داد. به‌ویژه در ساعات میانی روز همبستگی بین بازپرتو SENTINEL-1 و هر دو محصول تبخیرتغرق (اندازه‌گیری‌های محلی و محصولات MODIS) به مقادیر بالای R^2 بیش از ۰٫۸ رسید (Marlin.M et al., 2022).

در مطالعه دیگری در منطقه تارکونینا در مرکز ایتالیا در دو فصل رشد جهت بررسی توان بالقوه سنجنده چند طیفی ماهواره SENTINEL-2A برای تخمین متغیرهای گیاهی به‌ویژه آلایدو سطح (α) و شاخص مساحت برگ (LAI) که بر پویایی تبخیرتغرق پتانسیل (ETp) و نیازهای آبیاری خالص در محصول گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum L.*) تأثیر می‌گذارند، انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که SENTINEL-2A برای برآورد دقیق نیاز آبی گوجه‌فرنگی در سطح مزرعه مناسب است و اطلاعات مفیدی برای بهینه‌سازی آبیاری در اراضی کشاورزی فراهم می‌کند (Vanino et al., 2018). در پژوهش دیگری با ترکیب داده‌های سنجنش از راه دور و مدل تعادل انرژی دو منبعی (TSEB) با استفاده از تصاویر (SENTINEL-2 و SENTINEL-3) جهت تخمین تبخیرتغرق روزانه واقعی با دقت ۲۰ متر و به‌صورت روزانه در باغات زیتون در طول دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ در جنوب اسپانیا مناسب‌بودن روش‌های تلفیقی پیشنهادی برای بهینه‌سازی آبیاری در باغات زیتون تأیید شد (Aguirre-García et al., 2021). در مطالعه دیگری با استفاده از روش ادغام داده‌های LANDSAT و SENTINEL (L-S) تبخیرتغرق در بخشی از ایالت کالیفرنیا برآورد شد در این روش L-S نقشه‌های ET با رزولوشن بالاتر در حدود ۱۰ متر ایجاد شد و به‌طور قابل‌توجهی خطاهای تخمین روزانه ET را نسبت به روش تقریب خطی ساده (Lint) که فقط با استفاده نقشه‌های روزانه ET LANDSAT با رزولوشن ۳۰ متری تولید می‌شوند، کاهش داد. البته روش L-S پیشنهادی در شرایط با NDVI کمتر از ۰٫۴۰ نسبت به شرایط با NDVI بیشتر از ۰٫۴۰ بیشترین خطاها را نشان داد (Ramesh et al., 2020). در مجموع بر اساس بررسی منابع، کمبود مطالعات پیشین با استفاده از داده‌های این ماهواره در حوضه گرگان رود - قره‌سو و نیز اهمیت تدقیق برآوردهای تبخیرتغرق، مهم‌ترین دلایل برای اجرا این پژوهش بوده است.

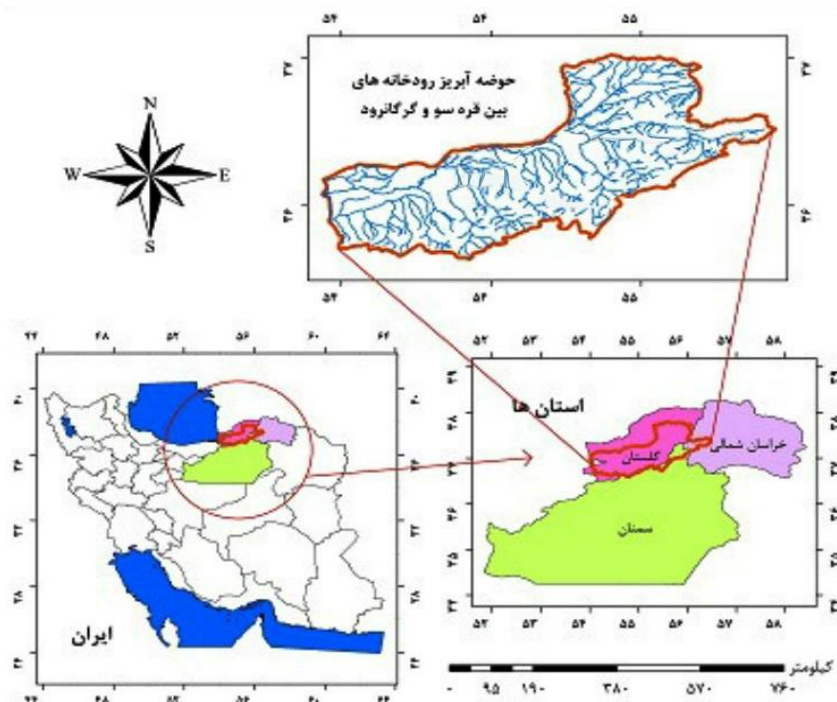
تقسیم می‌شوند. تبخیرتغرق تحت‌تأثیر عوامل مختلف از قبیل پارامترهای گیاهی، شرایط مدیریتی و محیطی است (فلاح قاله‌ری و همکاران، ۱۳۹۵). تعیین دقیق میزان تبخیرتغرق می‌تواند برای مدیریت بهینه و پایدار منابع آب در تعیین نیاز آبی گیاهان نقش بسزایی داشته باشد (کمالی و همکاران، ۱۳۹۷). برای محاسبه این کمیت نیاز به داده‌های باکیفیت بالا و قابل‌اعتماد است. اگرچه داده‌های زمینی دارای دقت نسبتاً بالا در ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند؛ ولی این داده‌ها نمی‌توانند بیانگر تغییرات تبخیرتغرق در گستره‌های وسیع باشد (میلانی و نیشابوری، ۱۳۹۷). مدل‌های برآورد تبخیرتغرق در شرایطی که تمام داده‌های مشاهداتی هواشناسی در دسترس نباشند، دارای خطاهای متعدد بوده و نیازمند واسنجی منطقه‌ای باتوجه‌به نتایج رهیافت ترازمندی آب یا لایسیمتری هستند. ترکیب داده‌های هواشناسی با اطلاعات سنجنش‌ازدور (نظیر تصاویر ماهواره‌ای) می‌تواند باعث افزایش دقت این روش‌ها شود. داده‌های ماهواره‌ای تبخیرتغرق موجود، از نظر ورودی مدل‌ها، پارامترسازی و الگوریتم‌ها متفاوت‌اند که موجب درجات متفاوتی از عدم قطعیت می‌شود؛ لذا انتخاب یک مجموعه‌داده خاص ماهواره‌ای که دقیقاً معرف شرایط هیدرو اقلیمی منطقه مطالعاتی باشد؛ چالشی اساسی است و ضرورت دارد تا به کمک روش‌هایی معتبر و فیزیکی، قابل‌اتکا بودن داده‌ها اعتبارسنجی شود. صحراگرد و همکاران (۱۳۹۸) مطالعه‌ای باهدف برآورد تبخیرتغرق واقعی با الگوریتم توازن انرژی سطحی سیال و تصاویر تلفیق شده ماهواره LANDSAT-8 و SENTINEL-2 انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که مدل سیال با تصاویر ماهواره‌ای LANDSAT-8، با $R^2 = 0/88$ و مدل سیال با تصاویر ماهواره‌ای تلفیق شده LANDSAT-8 و SENTINEL-2، با $R^2 = 0/90$ ، در مجموع همبستگی و تطابق مناسبی را با روش لایسیمتری داشته و نتایجی مشابه این روش را تخمین زده است. صالحی و شمس‌الدینی (۱۳۹۹) مطالعه‌ای باهدف ترکیب تصاویر MODIS و SENTINEL-2 به‌منظور تهیه نقشه‌های تبخیرتغرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر انجام دادند. جذر میانگین مربعات خطای مقایسه تبخیرتغرق ریزمقیاس‌نمایی شده با مقادیر معادله فائو - پنمن - مانتیت به میزان ۰/۶۴ میلی‌متر در روز نشان‌دهنده عملکرد بهتر روش ارائه‌شده جهت تولید نقشه‌های تبخیرتغرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر است. گزینسگی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی مدل‌سازی تبخیرتغرق واقعی با وضوح‌بالا از طریق ترکیب داده SENTINEL-2 و SENTINEL-3 پرداختند و اشاره داشتند که ماهواره SENTINEL-2 و SENTINEL-3 شامل ویژگی‌های مکانی، زمانی و طیفی موردنیاز برای تخمین دقیق تبخیرتغرق واقعی در مقیاس میدانی است. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های حرارتی با وضوح‌بالا به‌عنوان ورودی مدل TSEB یک رویکرد صحیح با ریشه نسبی میانگین مربعات خطای شار گرمای نهان حدود

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

منطقه تحقیق حاضر حوضه آبریز گرگان رود - قره‌سو انجام شده است. حوضه آبریز رودخانه‌های گرگان رود - قره‌سو با نام اختصاری قره‌سو - گرگان یک حوضه آبریز درجه‌دو به شمار می‌رود و

زیرمجموعه حوضه آبریز دریای مازندران است. مساحت این حوضه، ۱۳۰۶۱ کیلومتر مربع و شامل دو رود قره‌سو و گرگان است (شرکت مهندسی مشاور کنکاش جاماب، ۱۳۸۷). شکل ۱ موقعیت قرارگیری حوضه در کشور را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت قرارگیری حوضه گرگان رود - قره‌سو

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از دودسته داده به شرح زیر استفاده شد:

داده‌های هواشناسی: داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های همدیدی حوضه گرگان رود - قره‌سو از در دوره آماری موجود از

سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. این داده‌ها شامل: میانگین دما، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، بارندگی، سرعت باد و مجموع ساعت آفتابی هستند. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های همدیدی منطقه مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	میانگین بلندمدت دما (°C)	میانگین بلندمدت بارش (mm)
۱	رضوان	۳۷٫۲	۵۵٫۲	۱۱٫۳	۵۹۰٫۷
۲	بندر ترکمن	۳۶٫۹	۵۴٫۰	۱۸٫۳	۴۵۴٫۵
۳	علی‌آبادکتول	۳۷٫۱	۵۵٫۷	۱۶٫۰	۶۰۷٫۶
۴	کلاله	۳۶٫۸	۵۴٫۲	۱۷٫۵	۵۳۸٫۲
۵	گرگان	۳۷٫۳	۵۵٫۴	۱۵٫۴	۵۳۱٫۸
۶	هاشم‌آباد	۳۶٫۹	۵۴٫۴	۱۵٫۶	۵۲۰٫۵
۷	گنبدکاووس	۳۶٫۹	۵۴٫۸	۱۸٫۳	۳۲۷٫۵
۸	مینودشت	۳۷٫۳	۵۵٫۶	۱۶٫۶	۷۶۳٫۸

داده‌های ماهواره SENTINEL-2

ماهواره SENTINEL-2، یک مأموریت دیدبانی و پایش پوشش زمین و تغییرات است. این مأموریت شامل دو ماهواره یکسان به نام‌های SENTINEL-2A و SENTINEL-2B است که در جهت مخالف در مدار قرار دارند. ماهواره اول در تاریخ ۲۳ ژوئن ۲۰۱۵ و ماهواره دوم در تاریخ ۷ مارس ۲۰۱۷ با موشک VEGA اروپا به فضا پرتاب شدند. ماهواره SENTINEL-2 دارای ۱۳ باند طیفی است که هر کدام به اندازه‌های مختلفی از ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر در هر پیکسل تفکیک می‌شوند. این باندها شامل باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه هستند. SENTINEL-2 دارای پوششی جهانی از خشکی‌ها و گستره‌های آبی از ۵۶ درجه جنوبی تا ۸۴ درجه شمالی است. با فاصله گذر مجدد ۱۰ روزه و تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر، این ماهواره قادر به پایش بسیار دقیق و مکرر از سطح زمین است. گستره دید این ماهواره تا ۲۹۰ کیلومتر می‌رسد که این امکان را به ماهواره می‌دهد تا مناطق گسترده‌ای از زمین را هم‌زمان در رصد خود داشته باشد و داده‌های مهمی از سطح زمین شامل اطلاعات چند طیفی مختلف از سطح زمین، خشکی‌ها، آب‌ها و تغییرات پوشش زمین ارائه می‌دهد. با توجه به قابلیت‌های منحصربه‌فرد این ماهواره، می‌تواند در زمینه‌های مختلفی از جمله تغییرات اقلیمی، نظارت بر سطح زمین، مدیریت بلایا طبیعی و امنیت غذایی بکار رود (Phiri et al., 2020).

پروژه Sen-ET (Sentinels for Evapotranspiration) توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) تأمین مالی شده و هدف اصلی این پروژه توسعه یک روش بهینه برای تخمین ET بادقت بالا در مقیاس فضایی کوچک (ده‌ها متر) با استفاده از ترکیب اطلاعات ماهواره‌ای 3 و SENTINEL-2 است. این دو ماهواره که توسط برنامه Copernicus اتحادیه اروپا اجرا می‌شوند، داده‌های بررسی زمین باکیفیت و تواتر بالا ارائه می‌دهند. روش توسعه‌یافته برای تخمین ET به‌عنوان یک پلاگین متن‌باز برای نرم‌افزار SNAP (Sentinel Application Platform) پیاده‌سازی شده است که به‌رایگان برای تمامی کاربران در دسترس است. SNAP ابزار قدرتمندی برای پردازش و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای است و پلاگین Sen-ET قابلیت‌های آن را برای تخمین ET تقویت می‌کند.

این افزونه از یک مدل انتقال گرما و تبخیر پنمن مانتیث (FAO Penman-Monteith) استفاده می‌کند. مدل پنمن مانتیث -فانو یکی از مدل‌های مرسوم و مورداعتماد برای محاسبه تبخیرتقرق واقعی است. این مدل بر مبنای توازن انرژی بین سطح زمین و جو، بر اساس شرایط هواشناسی و عوامل محیطی مختلف تعریف شده است. از جمله ورودی‌های این مدل می‌توان به دمای سطح زمین، شاخص NDVI، رقوم ارتفاعی، و مقادیر مربوط به رطوبت هوا و فشار هوا

اشاره کرد (ESA Sen-ET., 2020).

معادله پنمن مانتیث - فانو

برای محاسبه تبخیرتقرق پتانسیل (ET_0) با استفاده از معادله پیشنهادی نشریه 56 FAO Penman-Monteith. از داده‌های ایستگاه‌های منتخب، شامل میانگین دما، حداقل دما، حداکثر دما، رطوبت نسبی، بارندگی، سرعت باد و ساعت آفتابی استفاده شد. (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که در آن، ET_0 تبخیرتقرق پتانسیل برحسب میلی‌متر بر روز، R_n تشعشع خالص در سطح گیاه برحسب مگاژول بر مترمربع بر ساعت، G چگالی شار حرارتی خاک برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز، T متوسط درجه حرارت روزانه برحسب درجه سانتی‌گراد، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری برحسب متر بر ثانیه، e_s میانگین فشار بخار اشباع هوا در ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متری برحسب کیلوپاسکال، e_a میانگین فشار بخار واقعی هوا در ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متری برحسب کیلوپاسکال، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع در میانگین درجه حرارت برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد و γ ثابت سایکرومتری برحسب کیلوپاسکال برحسب درجه سانتی‌گراد است.

$$\Delta = \frac{2503 \times e \frac{17.27T_{mean}}{T_{mean} + 237.3}}{(T_{mean} + 237.3)^2} \quad (2)$$

$$R_n = 0.77R_s - \left(\sigma \left[\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \right) \quad (3)$$

رابطه (۲) شیب منحنی فشار بخار اشباع (Δ) و رابطه (۳) تابش خالص (R_n) را محاسبه می‌کند، در این رابطه σ ثابت استفان بولتزمن هست. برای محاسبه R_s باید مطابق رابطه (۴) عمل کرد.

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N}) R_a \quad (4)$$

در این رابطه a_s ، b_s ، n ، N ، R_a به ترتیب برابر ۰/۲۵، ۰/۵۰، ساعت آفتابی، زاویه ساعت آفتابی و تابش فرازمینی که در رابطه (۵) آورده شده می‌باشد.

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (5)$$

که در آن G_{sc} ، δ ، φ ، ω_s ، d_r به ترتیب برابر ثابت خورشیدی، معکوس فاصله نسبی بین زمین، زاویه غروب آفتاب، عرض جغرافیایی و زاویه انحراف خورشید می‌باشد.

$$U_2 = U_z \frac{4.87}{\ln 67.8z - 5.42} \quad (6)$$

ضریب تعیین (R^2) این ضریب بیانگر میزان تطابق بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط یک مدل آماری است. ضریب تعیین معمولاً از $-\infty$ تا 1 متغیر بوده و از آن برای اندازه‌گیری عملکرد مدل استفاده می‌شود. عدد 1 نشان‌دهنده تطابق کامل بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی مدل است.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(F_i - \bar{F}))^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2 \times \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (13)$$

میانگین درصد مطلق خطا ($MAPE^4$) نشان‌دهنده میزان دقت یک مدل در پیش‌بینی درصدی است. این معیار از میانگین درصد خطای مطلق بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط مدل محاسبه می‌شود که در مقایسه با MAD و MSE میزان خطا را بهتر نشان می‌دهد. معمولاً از 0 تا $+\infty$ متغیر بوده که مقادیر کوچک‌تر MAPE دارای تطابق بهتری هستند.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right|}{n} \times 100 \quad (14)$$

در معادلات فوق A_i مقدار واقعی، F_i مقدار برآورد شده و n تعداد داده موجود می‌باشد (Chicco et al., 2021).

نتایج و بحث

برآورد تبخیر تعرق با استفاده از معادله فائو پنمن مانتیث

در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های ۸ ایستگاه همدیدی در منطقه مورد مطالعه و متغیرهای مورد استفاده در فرمول فائو پنمن مانتیث، با اعمال ضریب گیاهی، محاسبات میزان تبخیر تعرق واقعی برحسب میلی‌متر بر روز در بازه زمانی مورد نظر انجام شده که در جدول ۲ قابل ملاحظه است.

خروجی ماهواره SENTINEL-2

اعداد خروجی از ماهواره SENTINEL-2 بسیار نزدیک برآوردهای معادله Penman-Monteith بوده‌اند. جدول ۳، محصول تبخیر تعرق واقعی ماهواره در بازه زمانی مورد مطالعه و به تفکیک ایستگاه‌های حوضه را نشان می‌دهد.

شاخص آماری R^2 بین تبخیر تعرق FAO Penman-Monteith و داده‌های SENTINEL-2 برای ایستگاه‌های مختلف مقایسه گردید که به دلیل محدودیت صفحات صرفاً برای ایستگاه رضوان در شکل ۲ نشان داده شده و مقدار آن $R^2 = 0.94$ به دست آمده است. صحراگرد و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان دادند، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای SENTINEL-2 دقت تبخیر تعرق محاسبه شده افزایش می‌یابد. به

$$\gamma = \frac{0.665 \times 10^{-3} \times P}{0.665} \quad (7)$$

$$e_s = 0.6108 \times e^{\frac{(17.27 \times T_{max})}{(T_{max} + 237.3)}} + 0.6108 \times e^{\frac{(17.27 \times T_{min})}{(T_{min} + 237.3)}} \quad (8)$$

$$e_a = \frac{RH \times e_s}{100} \quad (9)$$

روابط (۶-۹) به ترتیب سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از زمین (U_2)، ثابت سایکرومتری (γ)، فشار بخار اشباع (e_s) و فشار بخار واقعی (e_a) است که با محاسبه متغیرها، می‌توان مقدار تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET_0) را به میلی‌متر در روز بدست آورد.

$$ET_C = K_C \times ET_0 \quad (10)$$

که در آن: ET_C تبخیر تعرق گیاه برحسب میلی‌متر بر روز، K_C ضریب گیاه بدون واحد و ET_0 تبخیر تعرق پتانسیل برحسب میلی‌متر بر روز است. از ضریب گیاهی برای تبدیل تبخیر تعرق پتانسیل برآورد شده از معادله پنمن مانتیث - فائو به تبخیر تعرق واقعی استفاده شد. مقادیر اولیه K_C از نشریه فائو استخراج و ضمن مقایسه با مقادیر توصیه شده محلی بر حسب اقلیم و روابط موجود در نشریه فائو ۵۶ اصلاح شد.

بررسی عملکرد محصولات ماهواره‌ای

برای ارزیابی و مقایسه برآوردهای ماهواره‌ای و مدل پنمن مانتیث از شاخص‌های زیر استفاده شد.

خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE^1$) نشان‌دهنده اندازه میانگین انحراف معیار میان داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط یک مدل آماری است. این معیار معمولاً برای اندازه‌گیری خطای مطلق میان دو توزیع استفاده می‌شود. معمولاً از 0 تا $+\infty$ متغیر بوده که مقادیر کوچک‌تر RMSE نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2}{n}} \quad (11)$$

میانگین قدر مطلق خطا (MAE^2) نشان‌دهنده میانگین انحراف مطلق بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط مدل است. این معیار به‌عنوان یک اندازه دقیق از خطای مدل استفاده می‌شود. معمولاً از 0 تا $+\infty$ متغیر بوده که مقادیر کوچک‌تر MAE دارای تطابق بهتر هستند.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right|}{n} \quad (12)$$

3 Coefficient of Determination

4 Mean Absolute Percentage Error

1 Root Mean Square Error

2 Mean Absolute Error

دقت مکانی و زمانی امکان تخمین بهتری از تبخیر تعرق را در مناطق کوچکتر فراهم می‌کند. اعداد سایر شاخص‌های آماری داده‌های ماهواره SENTINEL-2 برای ایستگاه‌های مختلف به دست آورده که در جدول ۵ نشان داده شده است.

نحوی که ضریب تعیین رابطه برآوردهای مدل سبال با تصاویر ماهواره‌ای LANDSAT-8، برابر با $(R^2 = 0/88)$ و مدل سبال با تصاویر ماهواره‌ای تلفیق شده LANDSAT-8 و SENTINEL-2،

جدول ۲- تبخیر تعرق واقعی برآورد شده از معادله Penman-Monteith ایستگاه‌های حوضه (mm/day)

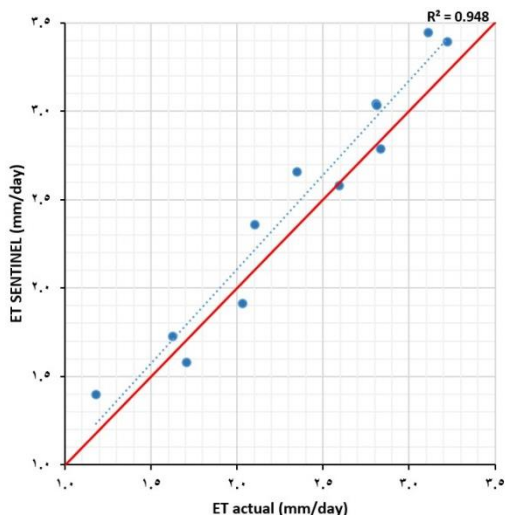
سال	ایستگاه ماه	رضوان	بندر ترکمن	علی‌آبادکتول	کلاله	گرگان	گرگان هاشم‌آباد	گنبد کاووس	مینودشت
۲۰۱۶	مارس	۱/۷	۲/۴	۲/۲	۲/۶	۲/۵	۲/۰	۱/۹	۱/۴
	آوریل	۲/۴	۳/۰	۲/۶	۳/۲	۳/۲	۲/۸	۲/۱	۲/۱
	مه	۲/۸	۳/۴	۳/۰	۳/۸	۳/۶	۳/۳	۲/۲	۲/۷
	ژوئن	۳/۲	۳/۹	۳/۶	۴/۳	۳/۵	۳/۹	۳/۰	۲/۵
۲۰۱۷	مارس	۱/۲	۲/۵	۲/۳	۱/۸	۲/۸	۲/۱	۱/۸	۱/۵
	آوریل	۲/۱	۲/۵	۳/۷	۳/۱	۳/۲	۲/۸	۲/۴	۲/۲
	مه	۲/۸	۳/۰	۳/۲	۳/۸	۳/۸	۳/۵	۳/۲	۲/۳
	ژوئن	۳/۱	۳/۸	۳/۹	۳/۵	۳/۶	۳/۳	۳/۹	۲/۸
۲۰۱۸	مارس	۱/۶	۲/۵	۲/۴	۲/۶	۲/۶	۲/۳	۲/۱	۲/۶
	آوریل	۲/۰	۳/۵	۲/۵	۳/۲	۳/۵	۳/۲	۲/۴	۲/۶
	مه	۲/۶	۳/۲	۳/۶	۳/۷	۳/۵	۳/۲	۲/۷	۳/۱
	ژوئن	۲/۸	۲/۴	۲/۹	۳/۶	۲/۵	۳/۳	۳/۲	۲/۵

جدول ۳- تبخیر تعرق واقعی ماهواره SENTINEL-2 در ایستگاه‌های مطالعاتی (mm/day)

سال	ایستگاه ماه	رضوان	بندر ترکمن	علی‌آبادکتول	کلاله	گرگان	گرگان هاشم‌آباد	گنبد کاووس	مینودشت
۲۰۱۶	مارس	۱/۶	۲/۹	۲/۴	۲/۱	۲/۱	۱/۸	۲/۳	۱/۶
	آوریل	۲/۷	۳/۲	۲/۶	۲/۷	۳/۰	۲/۸	۲/۳	۲/۱
	مه	۲/۸	۳/۶	۲/۷	۳/۳	۳/۳	۳/۷	۲/۷	۲/۸
	ژوئن	۳/۴	۳/۷	۳/۱	۴/۱	۳/۹	۳/۷	۳/۱	۲/۵
۲۰۱۷	مارس	۱/۴	۲/۶	۲/۳	۲/۰	۳/۰	۱/۷	۱/۶	۱/۷
	آوریل	۲/۴	۲/۳	۳/۴	۳/۲	۳/۲	۳/۰	۲/۴	۲/۰
	مه	۳/۰	۳/۴	۳/۳	۳/۵	۳/۶	۳/۸	۳/۴	۲/۰
	ژوئن	۳/۵	۳/۵	۳/۸	۳/۲	۳/۲	۲/۹	۳/۷	۲/۷
۲۰۱۸	مارس	۱/۷	۲/۹	۲/۳	۲/۰	۲/۵	۲/۰	۱/۷	۲/۴
	آوریل	۱/۹	۳/۸	۲/۹	۳/۰	۳/۷	۳/۵	۲/۴	۲/۳
	مه	۲/۶	۳/۳	۳/۷	۳/۲	۳/۲	۳/۶	۳/۰	۲/۸
	ژوئن	۳/۰	۲/۸	۳/۰	۳/۵	۲/۴	۳/۶	۳/۶	۲/۵

همچنین در جدول ۴ مقدار تبخیر تعرق واقعی برای ایستگاه رضوان و در شکل ۳ مقایسه مقادیر تبخیر تعرق محاسبه شده برای ایستگاه فوق‌الذکر آمده است.

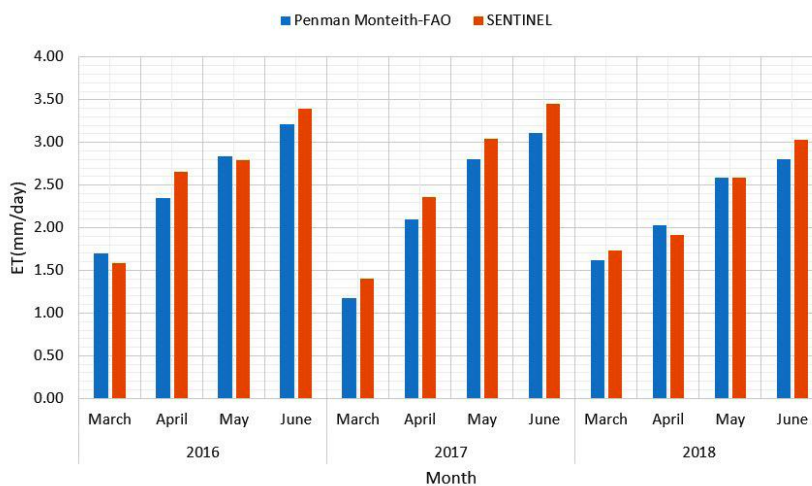
همان‌طور که ذکر شد ماهواره SENTINEL-2 قادر به تصویربرداری بادقت مکانی بالا در مقیاس تا ده‌ها متر هستند این



شکل ۲- مقایسه تبخیر تعرق برآورد شده FAO Penman-Monteith و داده‌های SENTINEL-2 برای ایستگاه رضوان

جدول ۴- مقدار تبخیر تعرق واقعی در ایستگاه رضوان (mm/day)

سال	ماه	Penman-Monteith	SENTINEL-2
۲۰۱۶	مارس	۱/۷	۱/۶
	آوریل	۲/۴	۲/۷
	مه	۲/۸	۲/۸
	ژوئن	۳/۲	۳/۴
۲۰۱۷	مارس	۱/۲	۱/۴
	آوریل	۲/۱	۲/۴
	مه	۲/۸	۳/۰
	ژوئن	۳/۱	۳/۵
۲۰۱۸	مارس	۱/۶	۱/۷
	آوریل	۲/۰	۱/۹
	مه	۲/۶	۲/۶
	ژوئن	۲/۸	۳/۰



شکل ۳- مقایسه مقادیر تبخیر تعرق محاسبه شده به روش فائو پنمن-مانتیت و داده‌های ماهواره‌ای SENTINEL-2 در ایستگاه رضوان

جدول ۵- شاخص‌های آماری مقایسه برآوردهای FAO Penman-Monteith و ماهواره SENTINEL-2

شاخص آماری	رضوان بندر ترکمن	علی‌آبادکتول	گنبدکاووس	کالاله	گرگان	گرگان هاشم‌آباد	مینودشت
RMSE (mm/day)	۰/۲۱	۰/۳۰	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۲۰
MAE (mm/day)	۰/۱۸	۰/۲۸	۰/۱۷	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۱۷
R ²	۰/۹۵	۰/۷۶	۰/۸۶	۰/۸۰	۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۸۵
MAPE (%)	۸/۲۳	۹/۸۱	۵/۵۷	۷/۴۰	۹/۹۵	۱۰/۵۶	۷/۴۳

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر باهدف ارزیابی و مقایسه چند گروه از برآوردهای تبخیرتقرق واقعی محصولات ماهواره‌ای SENTINEL-2 که دارای کاربری زیست‌محیطی وسیعی هستند جهت انجام شد که نتایج تبخیرتقرق تولیدشده از داده‌های همدیدی برای مارس ۲۰۱۶ تا ژوئن ۲۰۱۸ که ۴ ماه گرم سال است استفاده شده بین تبخیرتقرق FAO Penman-Monteith و داده‌های ماهواره SENTINEL-2 بهترین عملکرد مربوط به ایستگاه رضوان با $RMSE=0/21$ ، $MAE=0/18$ ، $R^2=0/95$ و ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به ایستگاه گنبدکاووس با $RMSE=0/37$ ، $MAE=0/33$ ، $R^2=0/86$ است. که همسو با نتایج مطالعات حاکی از عملکرد بهتر داده‌های ماهواره‌ای SENTINEL-2 در مناطقی با اقلیم نسبتاً خشک، می‌باشد. در صورت فقدان یا کمبود داده‌های مشاهداتی در حوضه گرگان رود - قره‌سو، می‌توان از داده‌های ماهواره SENTINEL-2 با تفکیک مکانی مناسب آن به‌عنوان جایگزین روش‌های مرسوم و تجربی استفاده کرد.

منابع

- ابراهیمی پاک، ن.، تافته، آ.، اگدرنژاد، ا. و اسدی کپورچال، ص. ۱۳۹۷. تعیین ضرایب تبخیر - تعرق ماهانه گندم زمستانه با استفاده از روش‌های مختلف تخمین تبخیر - تعرق و تفت تبخیر در دشت قزوین. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۸(۴): ۱۰۷-۱۲۱.
- ستاری، م.، نهرین، ف. و عظیمی، و. ۱۳۹۲. پیش‌بینی تبخیر - تعرق مرجع روزانه با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل درختی M5 (مطالعه موردی: ایستگاه بناب). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۷(۱): ۱۰۴-۱۱۳.
- شرکت مهندسی مشاور کنکاش جاماب. ۱۳۸۷. طرح جامع آب کشور: حوضه آبریز گرگان رود.
- صالحی، ح. و شمس‌الدینی، ع. ۱۳۹۹. ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل-۲ به‌منظور تهیه نقشه‌های تبخیر - تعرق روزانه با قدرت

طبق مقایسات انجام شده بین تبخیرتقرق مدل FAO Penman-Monteith و داده‌های ماهواره‌ای SENTINEL-2، بهترین عملکرد مربوط به ایستگاه رضوان با مقادیر: $RMSE=0/21$ ، $MAE=0/18$ ، $R^2=0/95$ است، درحالی‌که ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به ایستگاه گنبدکاووس با مقادیر: $RMSE=0/37$ ، $MAE=0/33$ ، $R^2=0/86$ و $MAPE=10/56$ است. نتایج پژوهش گزینگی و همکاران هم به‌صورت مشابه نشان‌دهنده عملکرد بهتر ماهواره SENTINEL-2 در مناطقی که با ابرناکی کمتر است (Guzinski et al., 2020). از این‌رو، در ایستگاه رضوان در استان سمنان که دارای اقلیم خشک‌تر و ساعات آفتابی بیشتر است، محصولات این ماهواره دقت مناسب‌تری نسبت به ایستگاه‌های مناطق شمالی حوزه داشته است. در مقابل، در ایستگاه گنبدکاووس به دلیل مرطوب هوا و احتمالاً ابرناکی بیشتر، دقت برآوردها نسبت به سایر ایستگاه‌ها کمتر بوده است. وانینو و همکاران در پژوهش خود دقت بالای حسگر MSI در ماهواره SENTINEL-2A که می‌تواند پارامترهای محصول مانند آلبیدو، شاخص مساحت برگ موردنیاز در برآوردهای نیاز آبی را تخمین بزند، تأیید کردند (Vanino et al., 2018). در پژوهش آگویر گارسیا و همکاران، دقت مناسب یک مدل ترکیبی ترازمندی انرژی سطح با تصاویر ماهواره‌های SENTINEL-2,3 و در برآورد تبخیرتقرق کانوپی‌های درختان زیتون در اسپانیا تأیید شد (Aguirre-García et al., 2021). نتایج مطالعه سینگ و همکاران نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی ترکیب داده‌های LANDSAT و SENTINEL-2 به‌منظور افزایش دقت تخمین‌های روزانه ET به طرز چشمگیری مؤثر است (Singh et al., 2020). یکپارچگی داده‌ها از این دو منبع ماهواره‌ای خطاهای نسبی را به طور قابل‌توجهی در مقایسه‌های منطقه‌ای و پیکسلی کاهش می‌دهد. به طور خاص، خطاهای نسبی از ۴۸٪ به ۱۰٪ در مقایسه‌های منطقه‌ای و از ۴۹٪ به ۱۷٪ در مقایسه‌های پیکسلی کاهش یافت همچنین این مطالعه تأییدکننده کارایی رویکرد ترکیب داده‌های این دو منبع ماهواره‌ای در توانایی کاهش خطاها و ارائه تخمین‌های دقیق‌تر تبخیرتقرق بود (Mancino et al., 2020).

- RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Computer Science. 5(7):e623. doi: 10.7717
- ESA Sen-ET. 2020. "ESA Sen-ET." ESA Sen-ET. <https://www.esa-sen4et.org/>
- Guzinski, R., Nieto, H., Sandholt, I. and Karamitlios, G. 2020. Modelling High-Resolution Actual Evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 Data Fusion. Remote Sensing. 12(9):1433. doi: 10.3390/rs12091433.
- Mancino, G., Ferrara, A., Padula, A. and Nolè, A. 2020. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment. Remote Sensing. 12(2):291. doi: 10.3390/rs12020291.
- Mueller, M. M., Dubois, C., Jagdhuber, T., Hellwig, F. M., Pathe, C., Schmullius, C., and Steele-Dunne, S. 2022. Sentinel-1 Backscatter Time Series for Characterization of Evapotranspiration Dynamics over Temperate Coniferous Forests. Remote Sensing. 16;14(24):6384. doi: 10.3390/rs14246384.
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V.R., Murayama, Y. and Ranagalage, M. 2020. Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping. A Review. Remote Sensing. 12(14): 2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
- Singh, R., Khand, K., Kagone, S., Schauer, M., Senay, G. and Wu, Z. 2020. A novel approach for next-generation water-use mapping using Landsat and Sentinel-2 satellite data. Hydrological Sciences Journal. 65(14):2508-19. doi: 10.1080/02626667.2020.1817461.
- Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Bolognesi, S. F., D'Urso, G., Di Bene, C., Pennelli, B., Vuolo, F., Farina, R., Pulighe, G. and Napoli, R. 2018. Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. Remote Sensing of Environment. 15(215): 452-470. doi: 10.1016/j.rse.2018.06.035
- تفکیک مکانی ۱۰ متر. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۶): ۱۸۸۱-۱۸۹۲.
- صحراگرد، س.، ناصری، ع.، الباجی، م. و کابلی زاده، م. ۱۳۹۹. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم توازن انرژی سطحی سبال و تصاویر تلفیق شده ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ (مطالعه موردی: کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک‌خان). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۱): ۱۵۶-۱۶۷.
- عنابی میلانی، ا. و نیشابوری، م. ۱۳۹۷. مقایسه برخی روابط تجربی برآورد تبخیر - تعرق مرجع برای دشت تبریز با استفاده از لایسیمتر و ارائه مدلی برای تعیین آن از روی داده‌های هواشناسی. دانش آب‌و خاک (دانش کشاورزی). ۲۸(۱): ۴۱-۵۴.
- فلاح قاهره، غ.، باعقیده، م. و رضایی، ح. ۱۳۹۵. برآورد نیاز آبی محصول سیب‌زمینی در اقلیم تربت‌حیدریه و تخمین تبخیر تعرق واقعی بر اساس تبخیر تعرق مرجع. نشریه انسان و محیط زیست. ۳۷: ۴۹-۶۰.
- کمالی، م. ا.، فرید حسینی، ع.، انصاری، ح. و غلامی سفیدکوهی، م. ع. ۱۳۹۷. تعیین نیاز آبی و ضریب گیاهی ذرت با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور و الگوریتم سبال. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲(۱): ۲۵-۳۹.
- Aguirre-García, S.-D., Aranda-Barranco, S., Nieto, H., Serrano-Ortiz, P., Sánchez-Cañete, E.-P. and Guerrero-Rascado, J.-L. 2021. Modelling actual evapotranspiration using a two source energy balance model with Sentinel imagery in herbaceous-free and herbaceous-cover Mediterranean olive orchards. Agricultural and Forest Meteorology. 311:108692. doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108692.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. p.17.
- Chicco, D., Warrens, M.J. and Jurman, G. 2021. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and

Comparison of Actual Evapotranspiration Estimations of SENTINEL-2 Satellite and Penman-Monteith Equation in Gorganrud-Gharehsoo Basin

A. Pirmoon¹, N. Ghahreman^{2*}, M. Ghamghami³

Received: Aug.11, 2023

Accepted: sep. 16, 2023

Abstract

Evapotranspiration (ET) as a major component of the hydrological cycle and an important variable in the calculation of the earth's surface water and energy balance has a key role in agricultural water management. Under limited meteorological data, ET estimations using empirical models are less accurate and require adjustments based on water balance approach or lysimetric measurements. Combining ground observations with remote sensing information (such as satellite images) can improve the accuracy of these estimations. In this study, SENTINEL-2 satellite products were used to estimate actual evapotranspiration values in 8 stations of the Gorganrud-Gharehsoo basin, north of Iran, during the period 2016 to 2018. Considering the number of required images and significant variations of ET during warm season, a four months period of April to June was selected for comparisons. The Penman Monteith equation estimations using observed data of study stations was chosen as an evaluation metric of satellite products. Comparisons were evaluated using statistical indices of R^2 , RMSE. The coefficient of determination (R^2) values between Penman-Monteith equation (PM) estimations and SENTINEL-2 outputs for the study stations of Rezvan, Bandar Turkman, Aliabad-e-katul, Gonbadkavos, Kalaleh, Gorgan, Gorgan Hashem-Abad, and Minoodasht, were 0.95, 0.76, 0.86, 0.87, 0.80, 0.86 and 0.84, respectively. The highest correlation of SENTINEL-2 and PM equation was obtained in Rezvan station, while the lowest correlation was observed in Ghonbad kavos stations. According to results, the SENTINEL-2 evapotranspiration estimations can be used in regions with inadequate observed data. The finer spatial resolution of SENTINEL-2 improves the ET estimations accuracy. This satellite products may be recommended for regions with inadequate weather stations especially in semi arid regions.

Keywords: Evapotranspiration, Gharehsoo Basin, Satellite Images, SENTINEL-2

1- M.Sc. Graduate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

3 -Assistant Professor, Department of Soil and Water, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: nghahreman@ut.ac.ir)