

## تحلیل مقایسه‌ای سه مدل سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در عرصه‌های پخش سیلاب گریبانگان فسا

علی جعفری<sup>۱\*</sup>، حمید حسینی‌مردی<sup>۲</sup>، مجتبی پاک‌پرور<sup>۳</sup>، امیر اسلامی<sup>۴</sup>

- ۱- استادیار بخش تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی بوشهر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بوشهر، ایران
- ۲- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
- ۳- دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
- ۴- دانشیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

مدیریت پایدار آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مستلزم برآورد دقیق اجزای تعادل آب، به‌ویژه تبخیر-تعرق واقعی (ETA) است. در کشاورزی آبی، تبخیر-تعرق واقعی به‌ویژه برای درک مصرف آب به‌وسیله پوشش گیاهی، حیاتی است. در سال‌های گذشته، با توجه به محدودیت‌های اندازه‌گیری ETA مبتنی بر میدان، مدل‌های سنجش از دور ماهواره‌ای مانند متریک، سیبال و سپس اهمیت بیشتری دارند. در این پژوهش، عملکرد این سه مدل در برآورد ETA در دشت گریبانگان استان فارس، ارزیابی و مقایسه انجام شد.

#### مواد و روش‌ها

این پژوهش در دشت گریبانگان در جنوب‌شرقی استان فارس با آب و هوای خشک و میانگین سالانه بارندگی ۲۳۰ میلی‌متر انجام شد. تصویرهای ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ از فصل کشاورزی ۲۰۲۲-۲۰۲۳ استفاده شد. پس از انجام اصلاحات هندسی، رادیومتری و جو، مدل‌های سیبال، متریک و سپس بر اساس معادله تعادل انرژی سطح اجرا شدند.

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: a\_j472000@yahoo.com

استناد: جعفری، ع، حسینی‌مردی، ح، پاک‌پرور، م، اسلامی، ا. ۱۴۰۵. تحلیل مقایسه‌ای سه مدل سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در عرصه‌های پخش سیلاب گریبانگان فسا. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۹(۲): ۶۳-۷۹.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2025.371213.1642

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۶۳ تا ۷۹.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



با استفاده از این مدل‌ها، تشعشع خالص، شار حرارتی خاک، شار حرارت محسوس و شار گرمای نهان برآورد شد و سپس ETa لحظه‌ای و روزانه محاسبه شد. برای اعتبارسنجی از داده‌های مزرعه، بیلان آب خاک و تاریخچه آبیاری استفاده شد. شاخص‌های NDVI برای استخراج پیکسل‌های کشاورزی و ارزیابی مصرف آب محصول استفاده شد.

#### نتایج و بحث

نتایج نشان داد بیشترین دقت در برآورد ETa مربوط به مدل متریک ( $R^2 = 0/87$ ،  $RMSE = 0/85$  میلی‌متر در روز) بود که دلیل آن استفاده از واسنجی داخلی با پیکسل‌های لنگر بود. عملکرد مدل سبب نیز قابل قبول بود ( $R^2 = 0/79$ ). مدل سیبال، به‌رغم شباهت ساختاریش به متریک، به دلیل واسنجی‌نشده محلی، دقت کمتری ( $R^2 = 0/74$ ) داشت. با این حال با استفاده از مدل سیبال، نقشه‌های فضایی بهتری از ETa تولید شد. انتخاب مدل برای برآورد ETa به کاربرد مد نظر، در دسترس بودن داده‌های میدانی و دقت عددی یا مکانی دلخواه بستگی دارد. مدل متریک همراه با واسنجی پیکسل مرجع، برای ارزیابی‌های منطقه‌ای در مقیاس مزرعه مناسب‌تر بود. از سوی دیگر، با استفاده از سیبال و سبب می‌توان بینش‌های فضایی اولیه را در شرایط داده‌های میدانی محدود، ارائه داد. عملکرد برتر متریک بیانگر اهمیت ترکیب مشاهده‌های زمینی با تصویرهای ماهواره‌ای بود.

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش بیانگر آن بود که مدل متریک ابزاری قابل اعتماد برای برآورد دقیق ETa در زمین‌های کشاورزی دشت گرگان است و می‌توان به‌وسیله آن بر مصرف آب نظارت کرد و آبیاری را برنامه‌ریزی و بهره‌وری را ارزیابی کرد. افزون بر این، طبقه‌بندی پیکسل مبتنی بر NDVI به‌طور قابل توجهی برآورد مصرف آب کشاورزی را بهبود بخشید. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل از تصویرهای ماهواره‌ای با وضوح زمانی زیاد (به‌عنوان مثال، Sentinel-2) و ترکیب مشاهده‌های میدانی بیشتر، استفاده شود.

#### واژگان کلیدی

اندازه‌گیری میدانی، بیلان آب خاک، پیکسل، داده‌های هواشناسی، سنجش از دور

#### مقدمه

مبتنی بر بیلان انرژی سطحی، امکان برآورد ETa با دقت و پوشش مکانی گسترده فراهم شده است. در این روش‌ها با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای حرارتی و طیفی، اجزای بیلان انرژی از جمله تابش خالص، شار گرمای محسوس و نهان، و شار گرمای خاک را در مقیاس پیکسلی محاسبه می‌کنند و نقشه‌های پراکنش مکانی-زمانی ETa را ارائه می‌دهند.

در این میان، سه الگوریتم مطرح و پرکاربرد وجود دارد. الگوریتم سبب که با بهره‌گیری از آن و داده‌های حرارتی و طیفی، می‌توان اجزای بیلان انرژی را مدل‌سازی کرد و ETa را در مقیاس پیکسلی استخراج کرد. این الگوریتم به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای تحلیل مصرف آب گیاهان و مدیریت منابع آب کاربرد دارد.

یکی از نیازهای اساسی در مدیریت منابع آب و حل معادلات بیلان آبی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که سهم ETa در چرخه آب‌شناختی بسیار چشم‌گیر است، آگاهی دقیق از اندازه تبخیر-تعرق واقعی در انواع پوشش‌های گیاهی است. با این حال، برآورد دقیق ETa در مقیاس‌های منطقه‌ای و فصلی با چالش‌هایی همراه است که دلیل آن پیچیدگی‌های شرایط محیطی، ناهمگونی سطح زمین، و محدودیت‌های روش‌های سنتی اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای است. این روش‌ها، مبتنی بر داده‌های ایستگاهی و ضریب‌های گیاهی، به دلیل ناتوانی در نمایش تغییرات مکانی گسترده و اثرپذیری از پستی و بلندی‌ها، دقت و تعمیم‌پذیری محدودی دارند. با بهبود فناوری‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های

همکاران (۲۰۱۳). اگرچه مدل سبب در مقایسه با مدل متریک ساده‌تر است و داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد، دقت آن در بسیاری از شرایط قابل قبول است و در برخی مناطق حتی با نتایج متریک قابل مقایسه است.

در مقایسه با دو مدل نامبرده، مدل سیبال به‌عنوان یکی از نخستین رویکردهای بیلان انرژی سطح زمین در برآورد تبخیر-تعرق واقعی شناخته شده است. این مدل به‌وسیله باستیانسن (۲۰۰۰) توسعه یافت. از سوی دیگر، به‌دلیل قابلیت اجرای ساده، کاربرد گسترده‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. در ایران نیز سیبال از نخستین مدل‌هایی بود که استفاده شد و نتایج رضایت‌بخشی از اجرای آن گزارش کردند (عمادزاده، ۲۰۰۷، غلامی و همکاران، ۲۰۰۹).

افزون بر این، نتایج پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که مدل‌های نامبرده بسته به شرایط محیطی و نوع داده‌های ورودی عملکرد متفاوتی دارند. در این راستا، در دشت فریمان سالاری و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که عملکرد مدل سیبال با ضریب تعیین ۰/۹۶ و RMSE تقریبی ۰/۵ میلی‌متر در روز بسیار مطلوب بود. رستمی‌زاد و همکاران (۲۰۲۴) نیز در آبخیز سد خسیوه نشان دادند که ضریب تعیین و شاخص توافق مدل سیبال به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۹۲ بود. نتایج پژوهش فاخر و کاویانی (۲۰۲۴) در دشت اردبیل نیز نشان داد که عملکرد مدل‌های سیبال و متریک هر دو مناسب بود، اما دقیق‌ترین مدل، مدل سیبال با ضریب تعیین ۰/۹۷ بود. نتایج پژوهش‌های بین‌المللی نیز بیانگر الگوهای مشابه است. در این راستا، در پژوهشی در منطقه ریاض عربستان، عملکرد مدل متریک برتر از دیگر مدل‌ها گزارش شده است (العزبه و همکاران، ۲۰۲۴).

در ایران، پژوهش‌های انجام شده برای کاربرد مدل سبب کمتر است؛ اما نتایج موجود بیانگر کارایی قابل قبول این مدل در شرایط گوناگون اقلیمی کشور است (پریوش و داوری، ۲۰۱۵؛ ماهور و همکاران، ۲۰۱۵). از سوی دیگر، بررسی‌های جدیدتر نیز الگوریتم‌های مبتنی بر بیلان انرژی مانند سیبال، سبب و تی‌سبب را به‌عنوان ابزارهای کارآمد برآورد ETa معرفی

الگوریتم متریک روشی با دقت زیاد و واسنجی داخلی که می‌توان با بهره‌گیری از آن، تبخیر-تعرق واقعی را با انطباق قابل توجهی با اندازه‌گیری‌های زمینی در مقیاس‌های گسترده، برآورد کرد. در این الگوریتم با استفاده از حداقل داده‌های زمینی می‌توان ETa را به‌طور قابل اعتمادی برآورد کرد.

الگوریتم سیبال که با بهره‌گیری از آن و با محاسبه مؤلفه‌های بیلان انرژی از داده‌های سنجش از دور می‌توان ETa را برآورد کرد. در مناطق ناهمگون با بهره‌گیری از سیبال همزمان با در نظر گرفتن عامل‌های اقلیمی، نوع پوشش گیاهی و خصوصیات خاک می‌توان ETa را با دقت مناسبی برآورد کرد. در ایران، استفاده از این مدل‌ها نیز بهبود چشمگیری داشته است و در پژوهش‌های پرشماری کارایی آن‌ها در مدیریت منابع آب مناطق خشک و نیمه‌خشک، ارزیابی شده است.

در دهه‌های گذشته کاربرد فناوری سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی گسترش چشمگیری یافته و در پژوهش‌های داخلی و خارجی پرشماری بر کارایی آن در مقیاس‌های منطقه‌ای و ملی تأکید شده است. بر اساس نتایج این پژوهش‌ها، سه الگوریتم سیبال (SEBAL)، سبب (SEBS) و متریک (METRIC) از رایج‌ترین و معتبرترین مدل‌ها به‌شمار می‌آیند.

مدل متریک به‌وسیله گروه پژوهشی دانشگاه آیداهو که پیش‌تر در تدوین روش مرجع FAO-56 مشارکت داشته‌اند، توسعه یافت و به‌دلیل نیاز کمتر به داده‌های میدانی، دقت زیاد، و امکان واسنجی با داده‌های ایستگاهی، در بسیاری از پژوهش‌های جهانی استفاده شده است (آلن، ۲۰۱۳؛ تاسیومی، ۲۰۱۹؛ یانگ، ۲۰۲۲). عملکرد این مدل در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب است و می‌توان با بهره‌گیری از آن تبخیر-تعرق واقعی را دقیق‌تر برآورد کرد.

نخستین بار مدل سبب به‌وسیله سو (۲۰۰۲) معرفی شد. با این مدل می‌توان بر پایه بیلان انرژی سطحی و داده‌های طیفی و هواشناسی تبخیر-تعرق را برآورد کرد. در پژوهش‌های جهانی پرشماری کارایی این مدل در شرایط مختلف اقلیمی بررسی شده است (سو و همکاران، ۲۰۰۵، مک‌کابه و همکاران، ۲۰۰۶ و لو و

دشت گربایگان استان فارس مقایسه و ارزیابی شد. نتایج این پژوهش با تمرکز بر دقت، کاربردپذیری، و قابلیت انطباق مدل‌ها با شرایط محلی، در بهبود مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری کشاورزی کاربرد خواهد داشت.

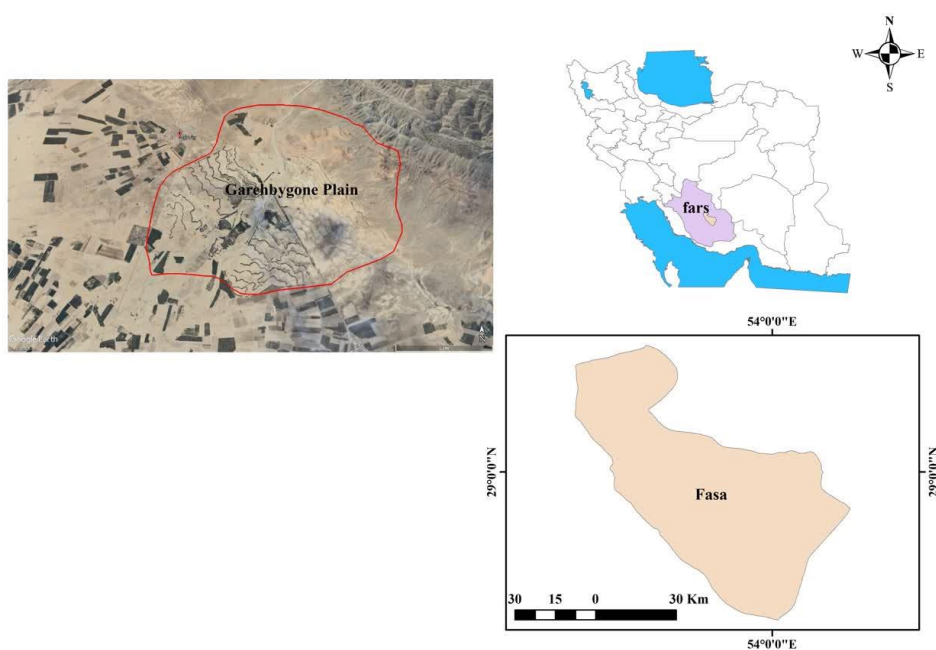
### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه پژوهش‌شده و داده‌های مشترک

این پژوهش در دشت گربایگان در جنوب‌شرقی استان فارس انجام شد. اقلیم منطقه خشک و میانگین سالانه بارش ۲۲۰-۲۳۰ میلی‌متر است. این منطقه شامل زمین‌های کشاورزی و مرتعی است که پخش سیلاب و آبخوانداری بیش از ۴۰ سال است در این زمین‌ها انجام‌شده است (شکل ۱).

کرده‌اند (رئیزی و همکاران ۲۰۲۵). افزون بر این، نتایج پژوهش‌های ماندال و همکاران (۲۰۲۳) و یانگ (۲۰۲۲) نشان داد که تبخیر-تعرق به‌شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک و نوع پوشش گیاهی است و انتخاب مدل مناسب نیازمند شناخت دقیق شرایط محیطی است.

نتایج پژوهش‌ها بیانگر آن است که اگرچه عملکرد هر سه الگوریتم‌های سیبال، سبس و متریک در برآورد تبخیر-تعرق مطلوب است، اما عملکرد آن‌ها وابسته به شرایط محیطی، سنج‌های اقلیمی، نوع پوشش گیاهی و کیفیت داده‌های ورودی است. همچنین، با توجه به اثرات اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، و نقش پخش سیلاب در تغییر رطوبت خاک و الگوهای تبخیر-تعرق، ضرورت دارد که این مدل‌ها در مقیاس محلی به‌طور دقیق ارزیابی شوند. در این پژوهش کارایی سه مدل سبس، متریک و سیبال در برآورد تبخیر-تعرق واقعی



شکل ۱- موقعیت دشت گربایگان در جنوب‌شرقی فسا در استان فارس (a، b و c موقعیت مزرعه‌های آزمایش‌شده).

Figure 1- The location of Dasht Gerbaigan in the southeast of Fasa in Fars province (a, b and c location of the tested farms).

#### داده‌های استفاده‌شده

- تصویرهای ماهواره‌ای لندست-۸ و ۹: این تصویرها شامل ۹ باند بازتابی و ۲ باند حرارتی با تفکیک مکانی

در هر سه مدل (متریک، سبس و سیبال)، داده‌های زیر به‌طور مشترک استفاده شدند:

۳۰ متر برای باندهای بازتابی و ۱۰۰ متر برای حرارتی بودند.

- داده‌های هواشناسی: این داده‌ها (شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشید و ساعات آفتابی) برای تاریخ‌های متناظر با تصویرهای ماهواره‌ای از ایستگاه‌های منطقه<sup>۱</sup> دریافت شد.

- پردازش تصویرها: در این مرحله تصحیح هندسی، رادیومتریک و جوی انجام شد و داده‌های بازتابی و دمای سطح استخراج شد.

#### مدل متریک

این مدل بر اساس بیلان انرژی سطح زمین و روش واسنجی داخلی برای محاسبه تبخیر-تعرق به کار برده شد. شیوه کار به شرح زیر بود:

- محاسبه تابش خالص ( $R_n$ ): این مؤلفه از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی با استفاده از معادلات استاندارد محاسبه شد.

- برآورد شار گرمای خاک ( $G$ ): این مؤلفه با استفاده از رابطه‌های تجربی وابسته به نوع خاک و پوشش سطح محاسبه شد.

- برآورد شار گرمای محسوس ( $H$ ): این مؤلفه بر اساس اختلاف دمای سطح و دمای هوای نزدیک زمین و سنجش‌های اصلاح‌شده (به‌طور محلی) محاسبه شد.

- محاسبه شار گرمای نهان ( $\lambda E = LE$ ): این مؤلفه با استفاده از رابطه<sup>۱</sup> محاسبه شد.

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

$\lambda E$ : شار نهان گرمایی،  $R_n$ : شار خالص تابشی،  $G$ : شار گرمایی به درون زمین،  $H$ : شار محسوس گرمایی به هوا ( $W/m^2$ ) است.

- محاسبه ضریب تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_{RF}$ ): این مؤلفه با استفاده از مدل فائو پنمن - مانتیس<sup>۲</sup> و داده‌های ایستگاهی برای تبدیل تبخیر-تعرق لحظه‌ای به روزانه محاسبه شد.

- اعتبارسنجی مدل: با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ ) و بیلان آب خاک منطقه انجام شد.

#### مدل سبب

مدل سبب یک مدل فیزیکی است که با بهره‌گیری از آن و با استفاده از معادلات بیلان انرژی و سنجش‌های سطحی می‌توان تبخیر-تعرق را برآورد شد. شیوه کار به شرح زیر بود:

- محاسبه تابش خالص، دمای سطح و آلبیدو: این مؤلفه‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای محاسبه شدند.

- استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI و LAI: از این مؤلفه‌ها برای تعیین وضعیت گیاهان و سنجش‌های گسیلندگی و مقاومت سطح استفاده شد.

- برآورد شار گرمای محسوس ( $H$ ) و شار گرمای نهان ( $LE$ ): این مؤلفه‌ها با استفاده از مدل فیزیکی معادله انتقال حرارت و اختلاف دما میان سطح و هوا برآورد شدند.

- محاسبه تبخیر-تعرق: این مؤلفه در قالب لحظه‌ای و تبدیل به اندازه روزانه با استفاده از داده‌های هواشناسی و الگوریتم سبب محاسبه شد.

- اعتبارسنجی مدل: با مقایسه نتایج با داده‌های تبخیر-تعرق مرجع و اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شد.

#### مدل سیبال

مدل سیبال بر اساس ارزیابی بیلان انرژی و نسبت بوون برای محاسبه تبخیر-تعرق طراحی شد. شیوه کار به شرح زیر بود:

- شناسایی نقاط گرم و سرد: در تصویر ماهواره‌ای برای تعیین دمای حداقل و حداکثر سطح انجام شد.

- محاسبه ضریب‌های اختلاف دمای سطح: این مؤلفه برای برآورد شار گرمای محسوس ( $H$ ) و گرمای نهان ( $LE$ ) محاسبه شد.

- استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح: این مؤلفه‌ها برای برآورد سنجش‌های مقاومت تبخیری و انتقال حرارت به کار برده شدند.

۱- ایستگاه همدید فسا و ایستگاه تبخیر سنجی ایستگاه آبخیزداری کوثر

2- FAO Penman-Monteith

درصد رطوبت خاک پس از آبیاری به‌ویژه در لایه سطحی ۰-۳۰ سانتی‌متر، از ۲/۵۷٪ به ۷/۷۱٪ افزایش یافت که بیانگر تغییر قابل‌توجه ذخیره رطوبت خاک ( $\Delta S$ ) در لایه ریشه است.

میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک ۵/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد که برای محاسبه ظرفیت نگهداشت آب و سنج‌های ورودی مدل‌ها استفاده شد (جدول ۲).

ژرفای نفوذ آب با افزایش نوبت‌های آبیاری افزایش یافت و پس از آبیاری هشتم به ۲۱۳ سانتی‌متر رسید (جدول ۲). این داده‌ها برای تعیین لایه مؤثر ریشه و ارزیابی سهم آب نفوذی در  $ET_a$  واقعی مدل‌ها به کار برده شدند.

نتایج تحلیل بافت خاک نشان داد خاک منطقه عمدتاً شنی لوم تا لوم‌شنی بود و قابلیت نگهداری مؤثر آب در این خاک تا ژرفای حدود ۱۵۰ سانتی‌متر بود که این اندازه از ژرفا به‌عنوان مرجع برای تفکیک آب برگشتی از آب در دسترس تبخیر-تعرق در محاسبات بیلان آب خاک در نظر گرفته شد. با استفاده از ترکیب اطلاعات درصد رطوبت، ژرفای نفوذ آب و بافت خاک، ورودی‌های مهم برای واسنجی مدل‌های  $ET_a$  به‌دست آمد و رابطه میان داده‌های میدانی با خروجی مدل‌ها بررسی و به حالت بهینه درآورده شد.

- محاسبه تبخیر-تعرق لحظه‌ای و روزانه: این مؤلفه بر اساس بیلان انرژی سطح و داده‌های هواشناسی متناظر محاسبه شد.

- اعتبارسنجی مدل: با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق مرجع، بیلان آب خاک و داده‌های میدانی آبیاری انجام شد.

#### اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها

نتایج به‌دست آمده از هر سه مدل با داده‌های تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ ) و اندازه‌گیری‌های میدانی آبیاری و آب برگشتی مقایسه شدند. افزون بر این، برای ارزیابی صحت مدل‌ها از بیلان آب خاک منطقه استفاده شد. مقایسه آماری داده‌ها با استفاده از معیارهای ضریب تعیین ( $R^2$ )، خطای میانگین مطلق ( $MAE$ ) و خطای ریشه میانگین مربعات ( $RMSE$ ) انجام شد.

#### برآورد مصرف آب کشاورزی

با استفاده از نقشه‌های  $NDVI$  و تفکیک پیکسل‌های زراعی از دیگر پوشش‌ها، اندازه تبخیر-تعرق واقعی در زمین‌های کشاورزی با هر سه مدل محاسبه شد و مصرف سالانه آب برآورد شد.

#### نتایج و بحث

##### بررسی شرایط فیزیکی و رطوبتی خاک منطقه

نتایج درصد رطوبت خاک مزرعه آزمایشی C (متعلق به کیامرث نکوئیان) قبل و بعد از آبیاری هشتم در جدول ۱ نشان‌دهنده شده است. بر پایه این داده‌ها،

جدول ۱- درصد رطوبت خاک و تغییر ذخیره رطوبت ( $\Delta S$ ) در مزرعه آزمایشی C.

Table 1 – Soil Moisture Percentage and Change in Soil Water Storage ( $\Delta S$ ) in Experimental Farm C.

$\Delta$ Moisture (%)	Moisture After 8th Irrigation (%)	Moisture Before 8th Irrigation (%)	Depth (cm)
37.2	71.7	34.5	0-30
8.3	30.7	22.4	30-60
6.7	12.10	25.5	60-90
21.1	54.5	33.4	90-120
4.9	97.4	2.5	120-150
-	67.4	-	150-180
-	57.2	-	180-210
-	49.1	-	210-240

جدول ۲- ژرفای نفوذ آب پس از هر نوبت آبیاری (cm).

Table 2 – Water Infiltration Depth after Each Irrigation (cm).

Irrigation Number	Farm A	Farm B	Farm C
1	79	32	84
2	163	42	139
3	168	76	156
4	173	98	161
5	183	142	179
6	194	164	185
7	208	186	193
8	214	213	213
9	231	231	221
10	-	-	234
11	-	-	238

جدول ۳- بافت خاک و درصد میانگین رطوبت در مزرعه C.

Table 3 – Soil Texture and Moisture Percentage in Experimental Farm C.

Soil Texture	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Sampling Depth (cm)
Sandy Loam	15.4	23.6	61	0-30
Sandy Loam	8.2	18.2	73	30-60
Sandy Loam	11	18.2	70	60-90
Sandy Loam	10	25.4	64	90-120
Loam/Sandy Loam	10	38	52	120-150
Sandy Loam	19	23.6	57	150-180
Sandy Loam	19	14.6	66	180-210
Loamy Sand	6	10.8	82	210-240

یازدهمین آبیاری بلندی آن به ۷/۶ سانتی‌متر رسید. با تبدیل این بلندی به حجم آب برگشتی و مجموع آن در کل زمین‌ها، اندازه‌های دقیقی برای مدیریت منابع آبی فراهم خواهد آمد.

نتایج مدل متریک برآورد تبخیر-تعرق و آب برگشتی با استفاده از درصد رطوبت خاک و جرم مخصوص ظاهری، اندازه آب برگشتی پس از هر نوبت آبیاری محاسبه شد (جدول ۵). روند بلندی آب برگشتی در نیم‌رخ خاک با افزایش نوبت آبیاری افزایش یافت، به‌گونه‌ای که پس از

جدول ۴- محاسبه اندازه آب برگشتی در مزرعه آزمایشی C.

Table 4- Calculation of the amount of returned water in the Experimental Farm C.

Irrigation time	Return water height (cm)	Density (B.D) (g/cm <sup>3</sup> )	Corrected Return water height (cm)	Return water volume (m <sup>3</sup> /ha)	Farm area (ha)	Total volume of returned water (m <sup>3</sup> )
first watering	0.00	1.56	0.00	0.0	15.2	0.0
Second irrigation	0.00	1.56	0.00	0.0	15.2	0.0
Third irrigation	0.00	1.56	0.00	0.0	15.2	0.0
Fourth irrigation	0.59	1.56	0.95	95.0	15.2	1444.0
Fifth irrigation	1.97	1.56	3.15	315.0	15.2	4788.0
Sixth irrigation	2.42	1.56	3.87	387.0	15.2	5882.4
Seventh irrigation	3.17	1.56	5.08	508.0	15.2	7721.6
The eighth irrigation	4.76	1.56	7.62	762.0	15.2	11582.4
Ninth irrigation	4.62	1.56	8.99	899.0	15.2	13664.8
10 <sup>th</sup> irrigation	7.04	1.56	11.26	1126.0	15.2	17115.2
11 <sup>th</sup> irrigation	7.60	1.56	12.17	1217.0	15.2	18498.4

در این پژوهش به دلیل ناچیز بودن تغییر ذخیره رطوبت و بسته بودن کرت‌های آبیاری، معادله بیلان آب خاک به شکل رابطه ۳ ساده‌تر و استفاده شد.

$$ET_a = Peff + I - RF \quad (3)$$

نتایج مقایسه نشان داد مدل متریک تبخیر-تعرق واقعی را به طور میانگین ۷/۴٪ بیشتر برآورد کرده است که این اندازه خطا در دامنه دقت قابل قبول بود و عملکرد مدل در شرایط منطقه‌ای مطلوب ارزیابی شد (جدول ۶). یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مک‌کیب و وود (۲۰۰۶)، وان در کوواست و همکاران (۲۰۰۹) و لیو و همکاران (۲۰۱۴) هم‌راستا است.

برای ارزیابی دقت مدل متریک در برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETa)، اندازه‌های محاسبه‌شده با استفاده از رابطه ۲ (معادله بیلان آب خاک) مقایسه شدند.

$$ET_a = Peff + I - Ro - RF - \Delta \quad (2)$$

$\Delta S$ : تغییرات ذخیره رطوبت خاک، Peff: اندازه بارندگی، I: اندازه آبیاری، Ro: اندازه رواناب خروجی از مزرعه، RF: اندازه آب برگشتی کشاورزی و ETa: اندازه تبخیر-تعرق واقعی است.

جدول ۵- مقایسه تبخیر-تعرق واقعی و مدل متریک در زمین‌های گربایگان فسا.

Table 5- Comparison of actual evapotranspiration and METRIC Model in Garbaigan lands of Fasa.

Volume of irrigation water (m <sup>3</sup> )	effective precipitation (mm), Peff	Return water volume(m <sup>3</sup> ) RF	Changes in soil moisture storage $\Delta S$	volume of runoff from the farm Ro (m <sup>3</sup> )	Actual evapotranspiration ETa (m <sup>3</sup> )	Evaporation-transpiration resulting from the METRIC Model (m <sup>3</sup> )
188941	9307	80477	0	0	117771	127196

نتایج مدل سبب و انسجی، اعتبارسنجی و برآورد مصرف آب در این پژوهش، از مدل سبب برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETa) دشت گربایگان با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای لندست-۸ و داده‌های هواشناسی بهره‌گرفته شد. برای صحت‌سنجی عملکرد این مدل، خروجی‌های آن با نتایج محاسبه‌شده از معادله فائو پنمن-مانتیس برای نقاط آبی (نظیر استخرها) مقایسه شد. ضریب گیاهی Kc برای این نقاط ۱/۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج و انسجی اولیه مدل نشان داد انطباق مدل با ETo ضعیف بود ( $R^2 \approx 0.54$ ). با اصلاح معادله و استفاده از سنجه سرعت باد، به‌ویژه بادهای بعدازظهر فصل گرم، تطابق مدل به طور قابل‌توجهی افزایش یافت ( $R^2 \approx 0.91$ ), که نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل در شرایط اقلیمی خاص منطقه بود.

نتایج مدل سیبال استخراج نقشه‌ها و تحلیل ETa در این پژوهش، تصویرهای ماهواره‌ای لندست ۸ سطح ۲ دوره مهر ۱۳۹۷ تا اسفند ۱۴۰۰ به‌عنوان داده‌های ورودی در اجرای مدل سیبال استفاده شدند. سپس،

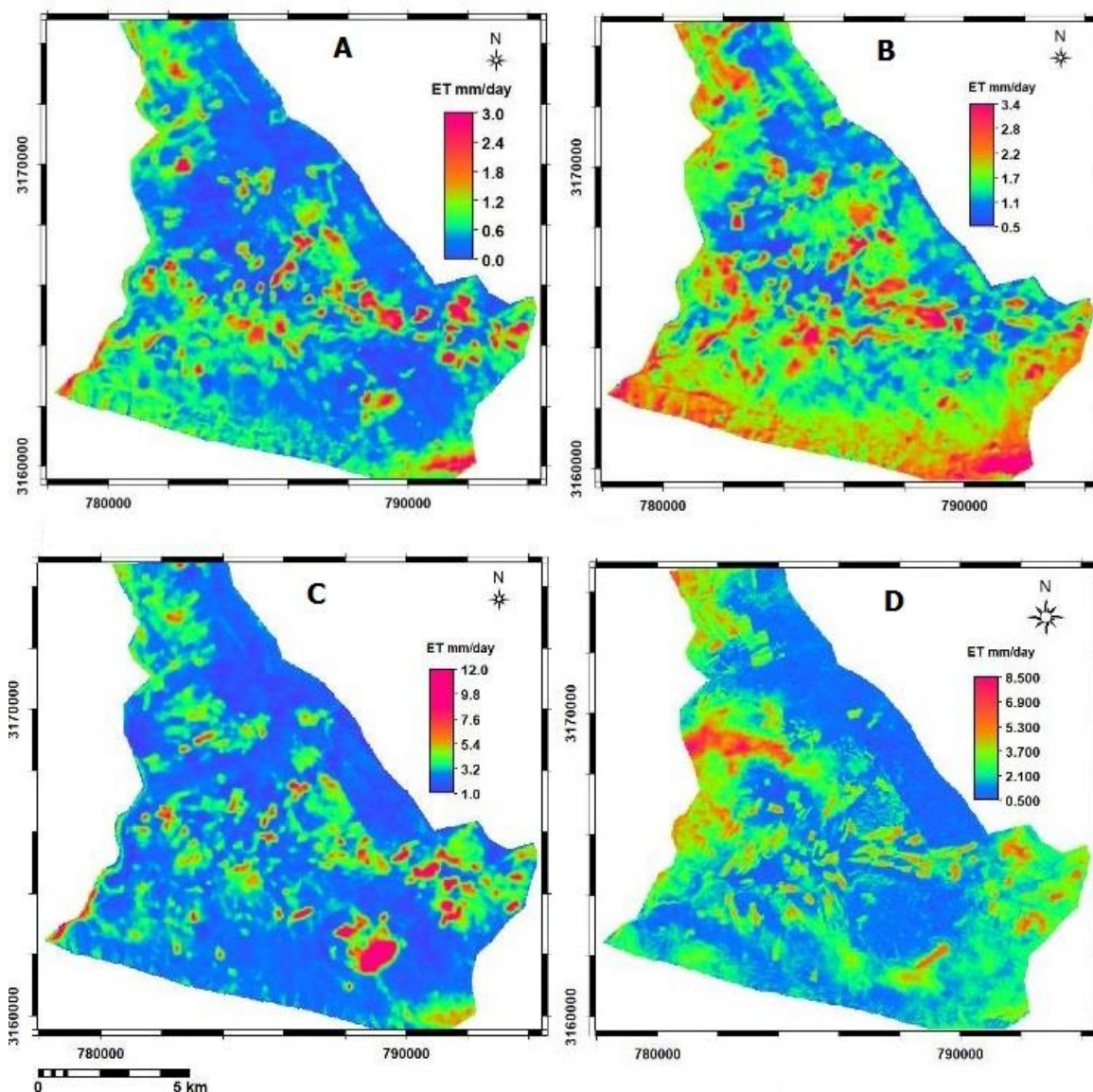
نتایج مدل سبب و انسجی، اعتبارسنجی و برآورد مصرف آب در این پژوهش، از مدل سبب برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETa) دشت گربایگان با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای لندست-۸ و داده‌های هواشناسی بهره‌گرفته شد. برای صحت‌سنجی عملکرد این مدل، خروجی‌های آن با نتایج محاسبه‌شده از معادله فائو پنمن-مانتیس برای نقاط آبی (نظیر استخرها) مقایسه شد. ضریب گیاهی Kc برای این نقاط ۱/۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج و انسجی اولیه مدل نشان داد انطباق مدل با ETo ضعیف بود ( $R^2 \approx 0.54$ ). با اصلاح معادله و استفاده از سنجه سرعت باد، به‌ویژه بادهای بعدازظهر فصل گرم، تطابق مدل به طور قابل‌توجهی افزایش یافت ( $R^2 \approx 0.91$ ), که نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل در شرایط اقلیمی خاص منطقه بود.

برای اعتبارسنجی مدل در طول فصل رشد، نقشه‌های میانی شامل NDVI، آلیدو، گسیلندگی، LST،

زمینی ETa، مدل فائو پنمن - مانتیس به‌عنوان معیار مرجع انتخاب شد.

اندازه‌های تبخیر-تعرق واقعی (ETa) و تبخیر-تعرق مرجع (ETo) استخراج شد و با توجه به نبود داده‌های



شکل ۲- نقشه تبخیر-تعرق منطقه گربایگان فسا با استفاده از مدل سیبال

[A(۱۳۹۸/۰۹/۱۰)، B(۱۴۰۰/۱۰/۰۱)، C(۱۳۹۹/۰۳/۲۱) و D(۱۴۰۰/۱۲/۲۱)]

Figure 2- Evapotranspiration map of the Garbaygan-Fasa region using the SEBAL model [(A: 09/10/2019), (B: 10/01/2021), (C: 03/21/2020), (D: 12/21/2021)].

در دوره پاییز ۱۳۹۸ تا پایان ۱۴۰۰ نشان داد افزودن سنجه سرعت باد موجب افزایش دقت برآورد ETa در منطقه شد. برای تولید نقشه‌های نهایی ETa، نقشه‌های میانی در محیط نرم‌افزار انوی تهیه شدند. اندازه‌های ETa در فصل سرد میان ۰/۸ تا ۲/۳ میلی‌متر و در فصل گرم

اندازه‌های ETa مدل سیبال برای پیکسل‌های مرتبط با محدوده‌های آبی در بازه زمانی بررسی شد و با اندازه‌های ETa محاسبه‌شده به‌وسیله مدل مرجع مقایسه شد. ضریب گیاهی (Kc) برای این نواحی برابر ۱/۰۵ در نظر گرفته شد (آلن و همکاران ۱۹۹۸). نتایج واسنجی مدل

میدانی و ماهواره‌ای می‌تواند به بهبود دقت و مدیریت بهتر منابع آب کمک کند.

#### اندازه مصرف آب کشاورزی در منطقه مطالعه شده

بر اساس محاسبات مدل‌ها و داده‌های میدانی، اندازه مصرف آب کشاورزی در محدوده پخش سیلاب دشت غربایگان برای سال‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در سال‌های آبی ۹۷-۹۸ و ۹۹-۹۸ مصرف آب خالص نزدیک به ۶ میلیون متر مکعب بود، در حالی که در سال آبی ۱۴۰۰-۹۹ این اندازه تقریباً به نصف کاهش یافت و در نیمه دوم سال ۱۴۰۰ مجدداً روند آن افزایشی بود. این تغییرات با داده‌های بارش مؤثر ایستگاه تحقیقات آبخوانداری کوثر همسو بود و بیشترین مصرف آب در سالی ثبت شده که بیشترین اندازه بارش (۴۳۵ میلی‌متر) در آن رخ داده است (شکل ۳).

میان ۱/۸ تا ۵/۶ میلی‌متر در روز متغیر بود (شکل ۲). این تغییرات مؤید الگوی فصلی منطقی و تطابق با شرایط اقلیمی منطقه بود. تحلیل نتایج بیانگر اهمیت استفاده از داده‌های جامع و بهینه‌سازی سنج‌های مدل برای برآورد دقیق‌تر ETa بود.

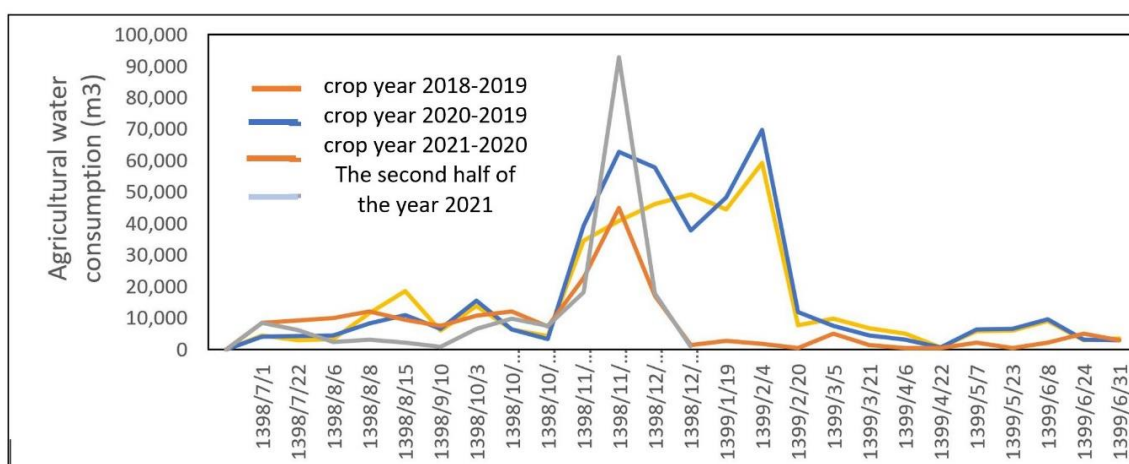
#### مقایسه کلی

مدل متریک بر مبنای داده‌های میدانی و بیلان آب است و با بهره‌گیری از آن می‌توان اندازه آب برگشتی و تبخیر-تعرق را به‌طور دقیق برآورد کرد. مدل‌های سبس و سیبال بر اساس داده‌های ماهواره‌ای هستند و با بهره‌گیری از آنها می‌توان تفکیک مکانی و زمانی تبخیر-تعرق را به‌ویژه پس از اصلاح سنج‌های اقلیمی (مانند سرعت باد) در حد مطلوبی انجام داد. نتایج هر سه مدل در دامنه اندازه‌های منطقی و قابل قبول بود و با داده‌های اقلیمی و کشاورزی منطقه همخوانی داشت. استفاده همزمان از داده‌های

جدول ۶- محاسبات اندازه مصرف آب زمین‌های کشاورزی بر اثر تبخیر-تعرق.

Table 6- Calculations of water consumption of agricultural lands due to evaporation-transpiration.

Period of consumption	net water consumption (MCM)	Rainfall (mm)
crop year (2018-2019)	5591769	256
crop year (2019-2020)	6051082	435
crop year (2020-2021)	2816936	66
The second half of the year 2021	2429320	69



شکل ۳- تغییرات مصرف آب کشاورزی در محدوده پخش سیلاب غربایگان.

Figure 3- Changes in agricultural water consumption in the area Garbaigan floods.

این، مقایسه یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مشابه در دشت اردبیل و ریاض عربستان (فاخر و کاویانی ۲۰۱۴، الازبا ۲۰۲۴) بیانگر آن است که دقت الگوریتم‌های مبتنی بر توازن انرژی با تصحیح دقیق سنجه‌ها، در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر، بیشتر است.

با تحلیل داده‌های میدانی خاک، مشخص شد افزایش قابل توجه رطوبت خاک و ژرفای نفوذ آب، به‌ویژه در لایه‌های سطحی، نقش مهمی در دقت برآورد ETa دارد. به‌بیان دیگر، با بهره‌گیری از مدل متریک به‌خوبی می‌توان تغییرات  $\Delta S$  و آب برگشتی را در محاسبات بیلان آب لحاظ کرد، در حالی که مدل‌های سبس و سیبال به‌دلیل محدودیت‌های داده‌ای و نیاز به سنجه‌های برآوردی، دقت کمتری در بازتاب این تغییرات داشتند. بافت خاک شنی لوم تا لوم شنی منطقه نیز نشان داد که ظرفیت ذخیره رطوبت محدود بود و نفوذپذیری زیاد خاک باعث افزایش حساسیت ETa به نوسانات بارش و آبیاری شد. این ویژگی بیانگر آن است که چرا اصلاح سنجه سرعت باد و حساسیت به دوره رشد گیاه در مدل‌های سبس و سیبال موجب بهبود برآورد ETa می‌شود. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت مدل متریک برای پژوهش‌های بلندمدت و برنامه‌ریزی راهبردی، به‌دلیل دقت بیشتر و کارایی در تحلیل مکانی، مناسب‌تر است.

مدل سبس به‌دلیل سادگی، سرعت پردازش و کارایی در شرایط داده‌ای محدود، گزینه‌ای اقتصادی برای پایش‌های گسترده و سریع است.

مدل سیبال با تمرکز بر سنجه‌های اقلیمی و اندام‌شناختی، برای تحلیل‌های فصلی و مدیریت آبیاری دقیق به‌کار برده می‌شود.

می‌توان گفت با ترکیب این مدل‌ها هم دقت حفظ شد و هم کارایی اجرایی افزایش یافت. در نتیجه چارچوب جامع‌تری برای مدیریت بهینه منابع آب در دشت گربایگان ارائه شد. با استفاده از این تحلیل محدودیت‌ها و چرایی تفاوت عملکرد مدل‌ها به‌روشنی بیان شد و از تکرار نتایج جلوگیری شد.

تحلیل نتایج این پژوهش نشان داد که دقت مدل‌های مختلف در برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETa) عمدتاً ناشی از تفاوت‌های بنیادی در روش‌های پیاده‌سازی توازن انرژی، استفاده از داده‌های ورودی و حساسیت به سنجه‌های اقلیمی و گیاهی است. در مدل متریک به‌دلیل بهره‌گیری از توازن کامل انرژی، تصحیحات دقیق رادیومتریکی و جوی، و استفاده از داده‌های میدانی می‌توان دقیق‌ترین برآوردهای ETa را ارائه داد. افزون بر این، در بازه‌های زمانی تصویرهای لندست دقت این مدل بیشتر بود. زیرا، با بهره‌گیری از مدل متریک جزئیات تغییرات مکانی پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک بازتاب داده شد. محدودیت اصلی مدل متریک، تکرار ۱۶ روزه تصویرهای لندست بود که تحلیل‌های روزانه یا پیوسته را محدود می‌کرد. با این حال، با ترکیب داده‌های مدل متریک با داده‌های هواشناسی یا سنجنده‌های با تفکیک زمانی بیشتر این محدودیت کاهش یافت.

اگرچه دقت مدل سبس در مقایسه با متریک کمتر بود، اما به‌دلیل سادگی داده‌های ورودی، امکان استفاده در شرایط داده‌ای محدود و حساسیت کمتر به تصحیحات جوی پیچیده، عملکرد مدل سبس در شرایط نیمه‌خشک منطقه

مناسب بود. اصلاح سنجه‌هایی مانند سرعت باد در این مدل باعث بهبود برآورد ETa شد. زیرا، نقش این سنجه در انتقال گرمای محسوس و برآورد تبخیر از سطح خاک مهم است. مشابه این اثر در مدل سیبال نیز مشاهده شد. با لحاظ کردن سرعت باد و تفاوت‌های گونه‌ای و رشدی پوشش گیاهی، نوسانات فصلی ETa با واقعیت میدانی هم‌خوانی مطلوبی داشت. این یافته بیانگر آن است که در مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی، سنجه‌های محلی اقلیمی و اندام‌شناختی، حتی در مدل‌های ماهواره‌ای، نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت نتایج خروجی دارند. نتایج این پژوهش با یافته‌های پاک‌پرور و همکاران (۲۰۱۴)، زارع خورمری و همکاران (۲۰۲۱) و سینگ و سنای (۲۰۱۵) به‌ویژه در رابطه با عملکرد متریک در بازتاب تغییرات مکانی و زمانی ETa، هم‌راستا است. افزون بر

جدول ۷- مقایسه عملکرد مدل‌های سیبال، متریک و سبس در برآورد ETa  
(برگرفته از برخی منابع علمی ۲۰۲۰-۲۰۲۵).

Table 7- Performance comparison of SEBAL, METRIC and SEBS models in estimating ETa (taken from some scientific sources 2020-2025).

reference	Performance in arid and semi-arid climates	Limitations	benefits	Accuracy (RMSE / R <sup>2</sup> )	Model
Allen (2013), Singh and Senay (2015) Fakhher et al (2024)	Very good, especially in precision farming	- The need for reference field data - Complexity in implementation - Images with low repetition (Landsat)	- High accuracy - Complete atmospheric and radiometric corrections - Sensitive to spatial characteristics	RMSE: ±0.80 mm/day R <sup>2</sup> : 0.92-0.96	METRIC
Bastiaanssen (2000), Zare Khurmiret al (2021)	acceptable; Suitable for growth cycle analysis	- Accuracy less than METRIC - dependent on parameters such as wind speed	- Less need for ground data - Suitable for seasonal analysis - Easier implementation than METRIC	RMSE: 0.92-1.5 mm/day R <sup>2</sup> : 0.80-0.89	SEBAL
Su (2002) Pakparvar et al (2014) Fakhher et al (2024) Zoratipouret al (2019)	Optimum performance in semi-arid climate and low data	- Less sensitivity to local parameters - Accuracy dependent on meteorological data	- Fast and simple implementation - Less need for complex corrections - Good performance on limited data	RMSE: 0.62-1.53 mm/day R <sup>2</sup> : 0.90-0.96	SEBS

مناسب، گزینه برتر است. در مدل سیبال با تمرکز بر سنج‌های اقلیمی مانند سرعت باد و ویژگی‌های اندام‌شناختی پوشش گیاهی، می‌توان نوسانات فصلی و تفاوت‌های رشدی گیاهان را با دقت قابل قبول بازسازی کرد. اگرچه دقت آن کمی کمتر از مدل متریک بود، اما سهولت کاربرد و حساسیت آن به تغییرات دوره‌های رشد گیاهان، سبب شد تا مدل سیبال به‌عنوان ابزاری مناسب برای پژوهش‌های فصلی و مدیریت آبیاری معرفی شود. به‌دلیل سرعت پردازش زیاد در مدل سبس، سادگی اجرا و نیاز کمتر به داده‌های دقیق محلی، به‌رغم دقت کمتر در مقایسه با دو مدل دیگر، به‌عنوان یک گزینه اقتصادی و عملی برای پایش‌های گسترده و دوره‌ای در شرایط داده‌ای

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد هر یک از مدل‌های سنجش از دور سیبال، متریک و سبس بر اساس ویژگی‌ها و سنج‌های خاص خود، در برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETa) در اقلیم نیمه‌خشک دشت گرگان متفاوت بود. در مدل متریک با بهره‌گیری از توازن کامل انرژی و تصحیحات دقیق جوی و رادیومتریک، ETa با بیشترین دقت برآورد شد. در این مدل تغییرات مکانی ناچیز پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک به‌خوبی بازتاب داده شد. در این راستا، بر اساس دقت زیاد مدل متریک می‌توان گفت این مدل برای پژوهش‌های بلندمدت، برنامه‌ریزی دقیق مدیریت منابع آب و کشاورزی با نیازهای داده‌ای

دقیق سهم تغذیه سفره‌های زیرزمینی و بهبود مدیریت منابع آبی، پژوهش‌های جامع بیلان حجمی آب شبکه‌های آبیاری و پخش سیلاب پیشنهاد می‌شود.

#### سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از تمام همکاران و کارشناسان بخش سنجش از دور و علوم آب که در مراحل جمع‌آوری داده‌ها، پردازش تصاویرهای ماهواره‌ای و تحلیل نتایج، همراهی و همکاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌کنند. همچنین، از حمایت‌های مالی و تسهیلات فراهم‌شده به‌وسیله پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس سپاسگزاریم.

#### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

#### دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

#### مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: طراحی مفهومی، روش‌شناسی، نگارش پیش‌نویس اولیه

نویسنده دوم: پردازش تصاویرهای ماهواره‌ای، تحلیل نتایج

نویسنده سوم: ویرایش مقاله، نظارت

نویسنده چهارم: گردآوری داده‌ها، تحلیل نتایج

محدود به‌ویژه در اقلیم نیمه‌خشک معرفی شد. نتایج بررسی‌های میدانی (رطوبت خاک، نفوذپذیری زیاد و تغییرات مرحله‌ای آب آبیاری)، با نتایج مدل‌ها همخوانی مناسبی داشت که این یافته مؤید اهمیت توجه به ویژگی‌های خاک در مدیریت بهینه منابع آب است. افزون بر این، تفاوت قابل توجه در ضریب تبخیر-تعرق (Kc) بر اساس نوع پوشش گیاهی و مرحله رشد، بیانگر اهمیت استفاده از مدل‌های حساس به این سنجش‌ها است.

با توجه به محدودیت‌های زمانی تصویرهای ماهواره‌ای، پیشنهاد می‌شود برای بهبود دقت و تداوم زمانی پایش، از سنجش‌هایی با تکرار زمانی بیشتر یا روش‌های ریزمقیاس‌سازی استفاده شود. همچنین، با توجه به مزایا و محدودیت‌های هر مدل، انتخاب یا ترکیب مدل‌ها باید متناسب با هدف پژوهش، داده‌های در دسترس و سطح دقت مورد نیاز باشد. می‌توان گفت با ترکیب این مدل‌ها هم دقت حفظ شد و هم کارایی اجرایی افزایش یافت. در نتیجه چارچوب جامع‌تری برای مدیریت بهینه منابع آب در دشت گریگان ارائه شد. یافته‌های این پژوهش هم‌راستا با مطالعات پیشین (سینگ و سنی ۲۰۱۵؛ پاک‌پرور و همکاران ۲۰۱۴؛ زارع خرم‌پری و همکاران ۲۰۲۱) تأکید می‌کند که مدل‌های مبتنی بر توازن انرژی و تصحیح دقیق سنجش‌ها، بهترین ابزار برای پایش ETa در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک هستند.

بر پایه نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود برای اعتبارسنجی دقیق مدل‌ها، زیرساخت‌های اندازه‌گیری زمینی مانند لایسیمتر و برج‌های Eddy Covariance توسعه یابند. همچنین پیشنهاد می‌شود برای افزایش دقت برآوردها از داده‌های هواشناسی با وضوح زمانی زیاد (ساعتی یا کمتر) استفاده شود. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود برای بهبود تفکیک زمانی نقشه‌های تبخیر-تعرق از تصاویرهای ماهواره‌ای با تکرار زمانی بیشتر یا استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌سازی بهره‌گیری شود. در منطقه مطالعه‌شده راه‌اندازی ایستگاه‌های هواشناسی خودکار با قابلیت ارسال داده‌های آنلاین پیشنهاد می‌شود. برای تعیین

## فهرست منابع

- Alazba AA, Shakir AS, Al-Ghobari HM. 2024. Evaluation of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration in an arid region. *Earth Systems and Environment*. 8(4): 563–576. <https://doi.org/10.1007/s41748-023-00379-z>
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Allen RG. 2013. REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations. University of Idaho.
- Bastiaanssen WGM. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*. 229(1–2):87–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- Emadzadeh M. 2007. Application of remote sensing in estimating water use efficiency at watershed scale (Case study: Qarasu Sub-Watershed). Master's Thesis, Sharif University of Technology. (In Persian).
- Fakher MS, Kavyani A. 2024. Estimation of actual evapotranspiration using Py\_SEBAL and METRIC algorithms in Moghan Plain, Ardabil Province. *Journal of Water and Soil Conservation*. 13(1): 105–120.
- Gholami Sefidkoochi MA, Mirlotfi M. 2009. Calculation of actual evapotranspiration of wheat using remote sensing (Case study: Gorganrud watershed). In 10<sup>th</sup> National Seminar on Irrigation and Evaporation Reduction. Shahid Bahonar University of Kerman. (In Persian).
- Liu Y, Wang C, Liu X, He HS. 2014. Response of actual evapotranspiration to climate and land cover changes in Northeastern China. *Advances in Meteorology*. pp. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/960890>
- Lu Y, Liu R, Xu W. 2013. Estimating actual evapotranspiration in an arid region using Landsat data and SEBAL model. *Journal of Arid Land*. 5(1):28–40. <https://doi.org/10.1007/s40333-012-0140-2>
- Mandal N, Chanda K. 2023. Performance of machine learning algorithms for multi-step ahead prediction of reference evapotranspiration across various agro-climatic zones and cropping seasons. *Journal of Hydrology*. 13(3): 73–92. <https://doi.org/10.52547/gisj.13.3.73>
- Mahour H, Asadi N, Soltani S, Rezaei H. 2015. Investigating the effect of climate and vegetation cover on actual evapotranspiration using METRIC algorithm. *Journal of Water and Soil Science (Agricultural Science and Technology)*. 19(75): 101–114. (In Persian).
- McCabe MF, Wood EF. 2006. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 105(4):271–285. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.006>
- Pakparvar M, Delavar M, Khosravi H. 2014. Comparison of evapotranspiration estimation using SEBAL and METRIC algorithms (Case study: Qazvin Plain, Iran). *Journal of Water and Soil Conservation*. 21(5): 63–78. (In Persian).
- Parivash P, Davari K. 2015. Evaluation of the Surface Energy Balance System (SEBS) algorithm in estimating actual evapotranspiration using satellite images (Case study: Neyshabur watershed). Master's thesis, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
- Raeesi M, Haghighizadeh A, Nozari H, Vazinivand H. 2025. Estimating actual evapotranspiration of irrigated crops and orchards in Nahavand city using the SEBAL algorithm. *Modeling and Management of Water and Soil*. 5(1): 213–230. <https://doi.org/10.22098/mmws.2024.15091.1462>
- Rostamizad G, Pakparvar M, Abdi-Nezhad P, Abdollahi Z, Khalafi J. 2024. Estimating the amount of evapotranspiration in the area affected by flood spreading using the METRIC algorithm. *Watershed Engineering and Management*, 16(1), 154–169. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2023.361980.2016>
- Salari, H., Kashki, A., Karami, M., Zandi, R. (2023). Evaluation of climate change impacts on water requirement of cotton crop in Razavi Khorasan Province. *Journal of Climatology Research*. 14(53): 163–172. (In Persian).
- Singh RK, Senay GB. 2015. Comparison of satellite-based evapotranspiration models over South Florida. *Remote Sensing*. 7(5): 5667–5695. <https://doi.org/10.3390/rs70505667>
- Su Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6(1): 85–99. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Su Z, Schmugge T, Kustas W, Massman W. 2005. Evaluation of two models for estimating the surface energy balance over the Tibetan Plateau. *Remote Sensing of Environment*. 94(3): 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.006>

Tasumi M. 2019. Evapotranspiration and consumptive irrigation requirements. In *Irrigation and Drainage*. ASCE. pp. 239–266. <https://doi.org/10.1061/9780784415445.ch11>

<https://www.unccd.int/resources/global-land-outlook>

Van Der Kwast J, Maathuis BHP, De Jong SM. 2009. Comparison of empirical models and SEBAL using ASTER imagery to estimate evapotranspiration in Libya. *International Journal of Remote Sensing*. 30(10): 2615–2626. <https://doi.org/10.1080/01431160802555891>

Yang Y. 2022. Evaluation of SEBAL model for estimating actual evapotranspiration using remote sensing data in arid regions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*,

25: 100692.

<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100692>

Zare Khurmiri A, Ghanbarpour MR, Moftakhari HR. 2021 Evaluating SEBAL and METRIC models for estimating evapotranspiration in arid regions of Iran. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*. 13(1): 99–112. (In Persian).

Zoratipour E, Soltani ASM, Zoratipour A. 2019. Spatial and temporal evaluation of different methods for prediction of reference evapotranspiration: Case study, Khuzestan Province. *Iranian Journal of Eco Hydrology*. 6(2): 465–478.

<https://doi.org/10.22059/ije.2019.272676.1017>



## Comparative Analysis of Three Remote Sensing Models for Estimating Actual Evapotranspiration in the areas flood water spreading of Garbaygan Fasa

Ali Jafari<sup>1\*</sup>, Hamid Hosseinimarandi<sup>2</sup>, Mojtaba Pakparvar<sup>3</sup>, Amir Eslami<sup>4</sup>

1- Assistant Professor, Forsts Rangelands and Watershed Management Department, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr, Iran

2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

3- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

4- Associate Professor, Agricultural Engineering Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Sustainable water management in arid and semi-arid regions requires accurate estimation of water balance components, especially actual evapotranspiration (ETa). In irrigated agriculture, actual evapotranspiration is particularly crucial for understanding water consumption by vegetation. In recent years, due to the limitations of field-based ETa measurements, satellite remote sensing models such as METRIC, SEBAL, and SEBS have gained increasing importance. This study aims to evaluate and compare the performance of these three models in estimating ETa over the Garbayegan Plain, Fars Province, Iran.

#### Materials and Methods

The study was conducted in the Garbayegan Plain, located in southeastern Fars Province with an arid climate and an average annual rainfall of about 230 mm. Landsat 8 and 9 satellite imagery from the 2022–2023 agricultural season were used. After applying geometric, radiometric, and atmospheric corrections, the SEBAL, METRIC, and SEBS models were implemented based on the surface energy balance equation. Using these models, net radiation, soil heat flux, sensible heat flux, and latent heat flux were estimated, and instantaneous and daily ETa were subsequently to calculate. Field data, soil water balance, and irrigation records were used for validation. NDVI indices were applied to extract agricultural pixels and to evaluate crop water consumption.

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Author's E-mail:** a\_j472000@yahoo.com

**Citation:** Jafari, A., Hosseini Marandi, H., Pakparvar, M. Eslami, A. 2026. Comparative Analysis of Three Remote Sensing Models for Estimating Actual Evapotranspiration in the areas flood water spreading of Garbaygan Fasa. *Watershed Management Research*. 39(2): 63-79.

**DOI:** 10.22092/WMRJ.2025.371213.1642

**Received:** 31 October 2025, **Received in revised form:** 23 November 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 22 June 2026

*Watershed Management Research*, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 63-79.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



### Results and Discussion

The results showed that the highest accuracy in ETa estimation was achieved by the METRIC model ( $R^2 = 0.87$ , RMSE = 0.85 mm/day), primarily due to its use of internal calibration via anchor pixels. The performance of the SEBS model was also acceptable ( $R^2 = 0.79$ ). Although SEBAL is structurally similar to METRIC, its lack of local calibration resulted in lower accuracy ( $R^2 = 0.74$ ). Nevertheless, SEBAL produced more detailed spatial maps of ETa. The selection of an appropriate model for ETa estimation depends on the intended application, the availability of field data, and the required numerical or spatial accuracy. The METRIC model, when combined with reference pixel calibration, was found to be more suitable for regional assessments at the farm scale. On the other hand, SEBAL and SEBS can provide useful preliminary spatial insights under limited field data conditions. The superior performance of METRIC highlights the importance of integrating ground observations with satellite imagery.

### Conclusion and Suggestions

The findings of this study indicate that the METRIC model is a reliable tool for accurately estimating ETa in agricultural lands of the Garbayegan Plain. It can be used to monitor water consumption, support irrigation scheduling and evaluate water use efficiency. Furthermore, NDVI-based pixel classification significantly improved estimation of agricultural water consumption. It is recommended that future studies employ satellite imagery with high-temporal-resolution satellites (e.g., Sentinel-2) for model calibration and validation, along with a greater integration of field observations.

**Keywords:** Field measurements, meteorological data, pixels, remote sensing, soil water balance

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgement

The authors sincerely acknowledge all colleagues and experts in the remote sensing and water sciences fields who have assisted in data collection, satellite imagery processing, and result analysis. The authors also express their gratitude for the financial support and facilities provided by the Soil and Watershed Conservation Research Institute and the Agricultural and Natural Resources Research and Training Center of Fars.

### Conflicts of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### Data Availability Statement

The data and results used in this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

### Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, methodology, writing – original draft

Author 2: Satellite image processing and results analysis

Author 3: Manuscript editing, supervision

Author 4: Data collection, analysis of results