

## صحت‌سنجی تبخیر و تعرق تخمینی با الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین و اطلاعات سنجنده‌های OLI و TIRS

الهام محمودزاده<sup>۱</sup> و صدیقه انوری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته و <sup>۲</sup> استادیار گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹

### چکیده

تخمین درست توزیع مکانی تبخیر تعرق واقعی (ET) روزانه، موجب ارتقاء کارایی مدیریت منابع آب به‌خصوص در مناطقی که با محدودیت این منابع مواجهند، می‌شود. در پژوهش حاضر، ET با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL) و مدل تجربی فائو-پنمن-مانتیت (FPM) برآورد و سپس با مقادیر به‌دست آمده از روش تشت تبخیر، مقایسه و صحت‌سنجی شد. از آن‌جا که عوامل مختلفی بر مقادیر ET تأثیرگذارند، در نهایت، با انجام تحلیل حساسیت، میزان حساسیت مقادیر ET الگوریتم SEBAL نسبت به تغییر پارامترهای ورودی، بررسی شد. در این راستا، الگوریتم SEBAL با استفاده از داده‌های ماهواره Landsat8 (سنجنده OLI و TIRS) در مقیاس روزانه برای دوره زمانی ۲۰۱۸/۷/۲۵ تا ۲۰۱۸/۹/۱۱ اجرا شد. نتایج SEBAL نشان داد که مقادیر شاخص‌های SEE، RMSE، R<sup>2</sup>، نسبت به اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر به‌ترتیب برابر ۱/۲۷، ۰/۷۶ و ۰/۷۷ میلی‌متر بر روز و برای روش تجربی FPM به‌ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۶ و ۰/۹۲ میلی‌متر بر روز است.

**واژه‌های کلیدی:** تشت تبخیر، سنجش از دور، فائو-پنمن-مانتیت، لندست ۸، مدل SEBAL

### مقدمه

اهمیت زیادی برخوردار است (Cammalleri و همکاران، ۲۰۱۲؛ McMahon و همکاران، ۲۰۱۳). تبخیر، فرایند تبدیل آب از فاز مایع به بخار بوده و از سطوحی مانند خاک مرطوب و سامانه‌های آبی صورت می‌گیرد. در حالی‌که تعرق، فرایند تبخیر از منافذ برگ گیاهان و پوشش سبز بوده که به ترکیب این دو فرایند، مجموعاً ET اطلاق می‌شود. برآورد ET با دقت مناسب در مواردی از قبیل برنامه‌ریزی آبیاری، محاسبات بیلان آب، تخمین رواناب و مطالعات اقلیم‌شناسی ضروری است (Ghaemi و همکاران، ۲۰۱۲).

یکی از راه‌های مهم سازگاری با کم‌آبی، خصوصاً در بخش کشاورزی، تخمین دقیق‌تر مقادیر نیاز آبی محصولات بوده که در قالب تبخیر و تعرق (ET)<sup>۱</sup> معرفی می‌شود. ET از مؤلفه‌های کلیدی معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب است. لذا، تخمین درست توزیع مکانی آن در برنامه‌ریزی و مدیریت مصرف آب در مزرعه به‌خصوص برای مناطق خشک از

\* مسئول مکاتبات: anvari.t@gmail.com

<sup>۱</sup> Evapotranspiration

همکاران (۲۰۰۲) این الگوریتم را به‌منظور شناسایی مناطق دارای کمترین میزان ET در حوضه سند پاکستان مورد استفاده قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اطلاعات مکانی و زمانی میزان ET واقعی برای ارزیابی توزیع و مصرف آب در حوضه‌های بزرگ مفید است (Bastiaanssen و همکاران، ۲۰۰۲). Ramos و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از الگوریتم SEBAL مقادیر ET سالانه منطقه Flument دشت Ebro را در شمال شرقی اسپانیا تخمین و با مقادیر لایسیمیتری مقایسه کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم SEBAL قادر به برآورد نسبتاً دقیق ET روزانه برای گندم، ذرت و چمن است.

Steele و همکاران (۲۰۱۵) در شمال شرقی ایالت داکوتای شمالی آمریکا از الگوریتم SEBAL و داده‌های کاربری اراضی و پیمایش زمینی استفاده کردند. اختلاف ۱۷ و ۴۱ میلی‌متری ET محاسبه‌شده پنبه و گندم با الگوریتم SEBAL و داده‌های اندازه‌گیری‌شده در طول فصل کشت، نشان می‌دهد که می‌توان برای مدیریت منابع آب از الگوریتم SEBAL نیز استفاده کرد. در پژوهشی دیگر، Karbasi و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تخمین ET واقعی مزارع یونجه و ذرت شهرستان خرم‌دره با استفاده از الگوریتم SEBAL پرداخته و نتایج به‌دست آمده با نتایج مدل FPM صحت‌سنجی و مقایسه شد. نتایج نشان داد مقدار میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) در برآورد ET واقعی برای گیاهان ذرت و یونجه به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۱/۲۵ میلی‌متر بر روز و ضریب تبیین ( $R^2$ ) نیز به‌ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۸۳ به‌دست آمد. بررسی عملکرد دو مدل نشان داد که الگوریتم SEBAL در مقایسه با روش FPM، مقدار ET را برای گیاه یونجه بیشتر و برای گیاه ذرت کمتر برآورد می‌کند. Rahimi و همکاران (۲۰۱۵) با هدف مقایسه نتایج الگوریتم SEBAL با مقادیر محاسبه‌شده با استفاده از معادله FPM، ET واقعی در حوزه آبخیز تجن در منطقه کشاورزی دشت ساری را به‌دست آوردند. در این پژوهش، از تصاویر ماهواره MODIS استفاده شد. بر اساس این پژوهش، ET ساعتی و روزانه به‌ترتیب  $RMSE=0/091$  و  $RMSE=1/49$  میلی‌متر محاسبه شد.

روش‌های برآورد ET به دو دسته مستقیم و غیر مستقیم، طبقه‌بندی می‌شوند. استفاده از لایسیمتر و تشت تبخیر از جمله روش‌های مستقیم تخمین ET است. به‌کارگیری فنون و روابط تجربی از جمله روش‌های غیرمستقیم محسوب شده که طی دهه‌های گذشته با استفاده از پارامترهای هواشناسی و اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به رابطه‌های ترنت‌وایت<sup>۱</sup>، بلانی کریدل<sup>۲</sup>، مک-کینگ<sup>۳</sup>، تورک<sup>۴</sup>، پرستلی-تیلور<sup>۵</sup>، هارگریوز-سامانی<sup>۶</sup> و فائو-پنمن-مانتیث<sup>۷</sup> اشاره کرد (Mardakis و همکاران، ۲۰۰۵).

روش‌های مرسوم اندازه‌گیری ET عمدتاً نقطه‌ای بوده و برای سطوح گسترده از زمین و بازه‌های زمانی پیوسته، اندازه‌گیری، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است. همچنین، به‌دلیل شرایط متغیر آب و هوایی و ماهیت پویای فرایند انتقال آب-گرما، این اندازه‌گیری‌ها قابل تعمیم به حوضه‌های بزرگ نیست. در حال حاضر، استفاده از فنون سنجش از دور به‌عنوان بخش دیگری از روش‌های غیر مستقیم، راه حل مناسبی برای تعیین متغیرهای مختلف به‌منظور برآورد ET در مقیاس‌های زمانی و مکانی مورد نیاز است (Allen و همکاران، ۲۰۰۲).

الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL)<sup>۸</sup> اولین بار به‌وسیله Bastiaanssen و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه و در سال ۲۰۰۰ مجدداً به‌روز شد (Karimi, Bastiaanssen و همکاران، ۱۹۹۸؛ Bastiaanssen و همکاران ۲۰۰۰). این روش از الگوریتم‌های سنجش از دوری بوده که ET واقعی گیاه را بر اساس تعادل لحظه‌ای انرژی در سطح هر پیکسل از تصویر ماهواره محاسبه می‌کند، به‌نحوی که از کمینه داده‌های زمینی بهره‌گیرد. الگوریتم SEBAL تا کنون در مطالعات گوناگونی در نقاط مختلف دنیا به‌کار رفته و صحت‌سنجی شده است. Bastiaanssen و

<sup>1</sup> Thornth-Waite (Th)

<sup>2</sup> Blaney-Criddle (BC)

<sup>3</sup> Makkinc (MK)

<sup>4</sup> Turc

<sup>5</sup> Priestley and Taylor (PT)

<sup>6</sup> Hargreavs-Samani (HS)

<sup>7</sup> FAO-Penman-Monteith (FPM)

<sup>8</sup> Surface Energy Balance Algorithm for Land

## مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** منطقه مورد مطالعه مزرعه دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته در محدوده استان کرمان و بخشی از شهر ماهان است. شهر ماهان در محدوده مختصات جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۱۷ دقیقه طول شرقی قرار گرفته و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۸۶۴ متر است. از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی، شهر ماهان جز مناطق خشک محسوب می‌شود. شکل ۱، نمای کلی از محدوده مورد مطالعه را به همراه موقعیت جغرافیایی آن در استان کرمان نشان می‌دهد.

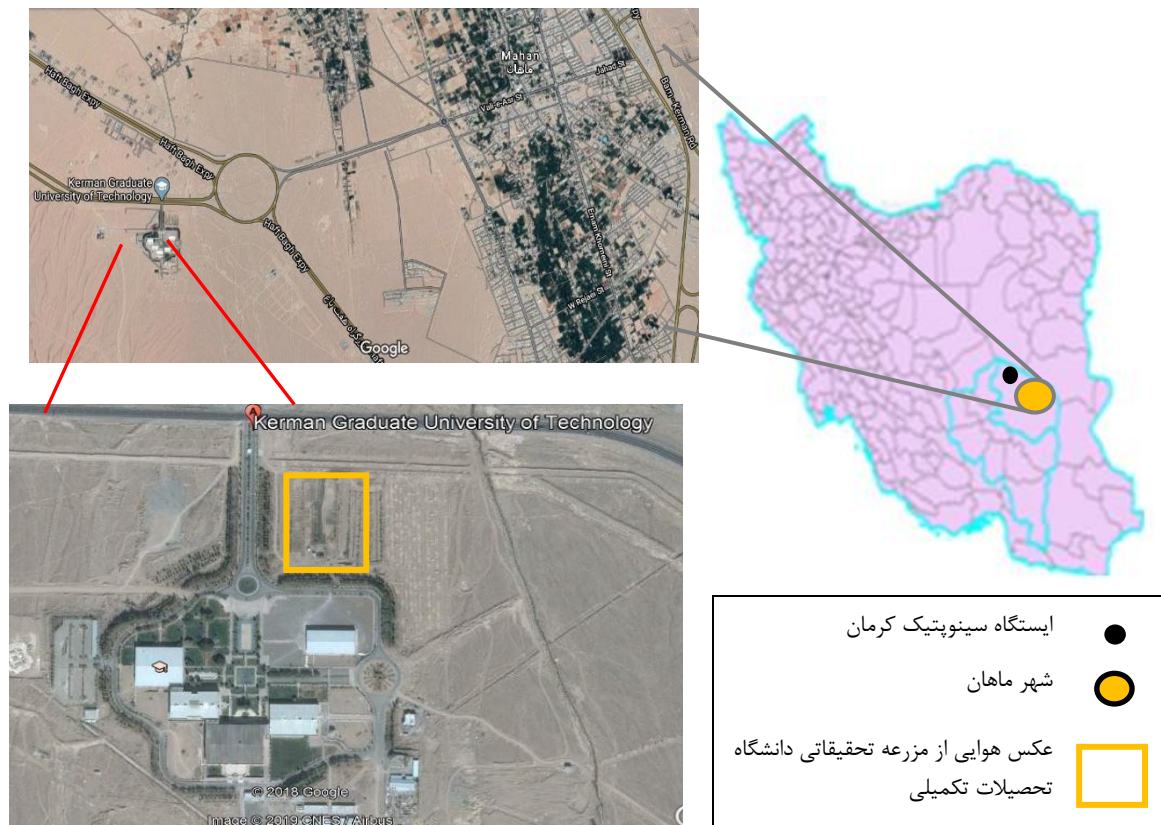
**داده‌های هواشناسی و ماهواره‌ای:** در این پژوهش، ET واقعی به کمک الگوریتم SEBAL برای یک دوره از تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۲۵ تا ۲۰۱۸/۰۹/۱۴ اجرا شد. بدین‌منظور، از تصاویر ماهواره Landsat8 (سنجنده OLI و TIRS) قابل دسترس در سال ۲۰۱۸ و داده‌های هواشناسی به‌دست آمده از ایستگاه سینوپتیک فرودگاه کرمان که شامل کمینه و بیشینه دما، سرعت باد در ارتفاع دو متری، دمای نقطه شبنم، ساعات آفتابی و دمای خشک در تاریخ‌های یادشده، استفاده شد. در طول فصل رشد محصول سورگوم، هفت تصویر بدون ابر وجود داشت که از سایت <http://Glovis.usgs.gov> برداشت شد.

شکل ۲، تغییرات دمایی ایستگاه فرودگاه کرمان را نشان می‌دهد. مقادیر داده‌های اندازه‌گیری‌شده از تشت (ETP) واقع در ایستگاه سینوپتیک کرمان با اعمال ضرایب تشت ( $K_p$ ) در شکل ۳ نشان داده شده است.

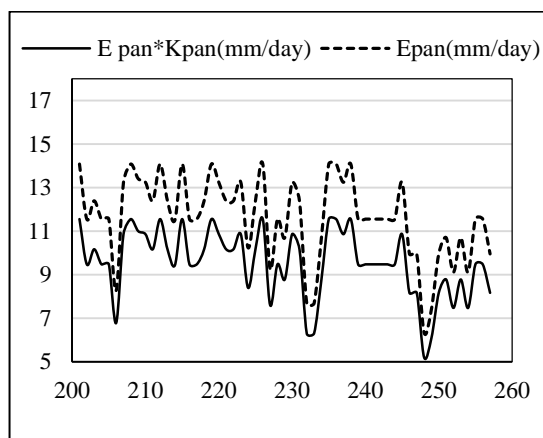
برای اجرای الگوریتم SEBAL، جمعا هفت تصویر برای تاریخ‌های ۲۵ ژوئیه (۳ مرداد)، ۱ اوت (۱۰ مرداد)، ۱۰ اوت (۱۹ مرداد)، ۱۷ اوت (۲۶ مرداد)، ۲۶ اوت (۴ شهریور)، ۴ سپتامبر (۱۳ شهریور) و ۲۰ سپتامبر (۲۰ شهریور) استفاده شد. قابلیت تفکیک زمانی تصاویر ماهواره لندست ۸، ۱۶ روز بوده که با توجه به موقعیت مزرعه پژوهشی در محل قرارگیری همپوشانی تصاویر، این زمان به نصف، کاهش یافته و هر هشت روز، یک تصویر برای منطقه مطالعاتی موجود بود.

در زمینه انجام تحلیل حساسیت الگوریتم SEBAL پژوهش‌های مختلفی انجام شده که در این راستا Ramezani Khojeen و همکاران (۲۰۱۶) میزان تحلیل حساسیت ET محاسبه‌شده با الگوریتم بیان انرژی روزانه و تصاویر ماهواره Landsat8 را در ۳۲ نقطه با تراکم پوشش گیاهی و ET مختلف محاسبه و نتایج به‌دست آمده را با الگوریتم SEBAL مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در مدل پیشنهادی داده‌های دمای سطحی، دمای هوا، تابش طول موج کوتاه ورودی و ساعات آفتابی دارای حساسیت بالا و رطوبت نسبی و آلبیدو دارای حساسیت متوسط تا زیاد و پارامتر باد و شاخص سطح برگ دارای حساسیت کم تا متوسط هستند. Long و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS به تحلیل حساسیت پارامتر شار حرارتی محسوس (H) در الگوریتم SEBAL پرداختند. نتایج نشان داد تعداد و نحوه انتخاب پیکسل سرد و گرم از طریق تاثیر گذاشتن روی پارامترهای همبستگی a و b تاثیر بسزایی در تخمین پارامتر H دارد. در پژوهشی که Malekinejhad و Poormohammadi (۲۰۰۸) انجام دادند، پارامترهای اقلیمی موثر بر ET در ایران مرکزی به‌وسیله نرم‌افزار مینی‌تب و روش تجزیه عاملی بررسی شد و مشخص شد که در این میان، نقش دما، سرعت باد و میزان ابرناکی از بقیه عوامل مشهودتر بوده است.

با توجه به آن‌چه آمد، استفاده از رویکردهای سنجش از دوری همانند الگوریتم SEBAL برای برآورد مقادیر ET، در قیاس با روش‌های دیگر، کارایی خوبی داشته است. اهمیت برآورد مقادیر دقیق ET به‌خصوص برای اراضی کشاورزی واقع در مناطق گرم و خشکی همچون دشت ماهان-چوپار ضرورت داشته و می‌تواند باعث ارتقاء بهره‌وری آبیاری شود. لذا، هدف مقاله حاضر، محاسبه ET محصول سورگوم کشت شده در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان با الگوریتم SEBAL و به‌کارگیری تصاویر ماهواره Landsat8 است که نتایج این برآوردها، در نهایت با مقادیر به‌دست آمده از روش تشت تبخیر و مدل تجربی FPM، مقایسه می‌شود.

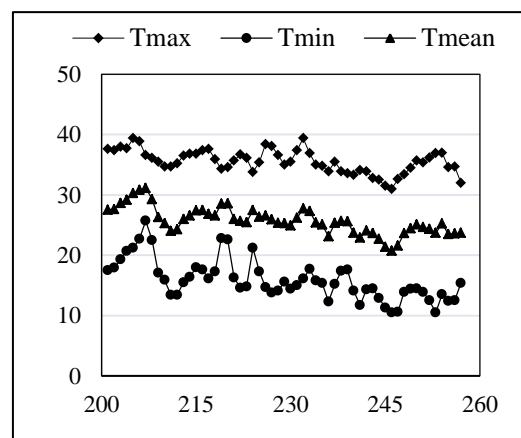


شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه سینوپتیک کرمان



شکل ۳- تغییرات پارامتر دما در محل ایستگاه فرودگاه کرمان

برای استخراج و بازیابی انعکاس طیفی پدیده‌هاست که طول موج‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه را تا محدوده ۵/۲ میکرومتر پشتیبانی می‌کند. در ادامه نیز، تصحیح وضوح تصویر به کمک الگوریتم Gram-Schmidt Pan Sharpening انجام شد. تصاویر ماهواره لندست ۸ داری اندازه سلول  $30 \times 30$  متر برای نوارهای مرئی و اندازه سلول  $100 \times 100$  متر برای نوارهای حرارتی هستند که در نرم‌افزار ENVI با



شکل ۲- مقادیر تبخیر از تشت و تبخیر از سطح آزاد آب در روزهای مورد ارزیابی

به دلیل وجود اثرات اتمسفری و در نتیجه غیر واقعی بودن انعکاس سطحی، با استفاده از الگوریتم فلش<sup>۱</sup> تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر سنجنده OLI انجام شد. پیش‌پردازش فلش، روش تصحیح جزئی اتمسفری

<sup>1</sup> FLAASH is a first-principles atmospheric correction tool that corrects wavelengths in the visible through near-infrared and shortwave infrared regions, up to 3  $\mu\text{m}$ .

که در آن،  $T_s$  دمای سطحی (درجه سانتی‌گراد)،  $\alpha$  آلبیدوی سطحی، NDVI شاخص پوشش گیاهی و  $R_n$  تابش خالص خورشیدی است.

عامل بعدی شار گرمای محسوس ( $H$ ) بوده که در واقع هدررفت حرارت به هوا از طریق انتقال دما است. برای تعیین این پارامتر، دو پیکسل آستانه سرد و گرم مورد نیاز است. در الگوریتم SEBAL ابتدا شار گرمای محسوس مطابق رابطه زیر، برای پیکسل‌های سرد و گرم محاسبه و سپس برای سایر پیکسل‌ها تخمین زده می‌شود (Allen و همکاران، ۲۰۰۲).

$$H = \frac{\rho C_p dt}{r_{ah}} \quad (4)$$

که در آن،  $\rho$  چگالی هوا ( $\text{kgm}^{-3}$ )،  $C_p$  گرمای ویژه هوا ( $1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )،  $dt$  اختلاف دما ( $T_1 - T_2$ ) بر حسب کلونین بین دو ارتفاع  $Z_1 - Z_2$ ،  $r_{ah}$  مقاومت آئروپنایمیک برای انتقال گرما ( $\text{sm}^{-1}$ ) است. در الگوریتم SEBAL برای برآورد  $dt$  از یک فرایند تکراری استفاده می‌شود، که در آن از یک رابطه رگرسیونی بر اساس رابطه (۵) استفاده می‌شود.  $dt$  در دو پیکسل شاخص، برآورد شده و سپس این رابطه به تمامی پیکسل‌های تصویر اعمال می‌شود (Bastiaanssen و همکاران، ۲۰۰۲).

$$dt = aTs + b \quad (5)$$

که در آن،  $T_s$  دمای سطح زمین،  $dt$  اختلاف دما،  $a$  و  $b$  ضرایب همبستگی است. در محاسبه مقاومت آئروپنایمیک نیاز به برآورد طول زبری مونتوم ( $Z_{om}$ ) است که در حال کلی به‌عنوان کسری از شاخص سطح برگ (LAI) در نظر گرفته می‌شود. پس از محاسبه مقادیر لحظه‌ای تابش خالص شدت جریان گرمای خاک و شدت جریان گرمای محسوس در الگوریتم SEBAL، مقدار شار گرمای نهان تبخیر لحظه‌ای و در نهایت مقدار ET لحظه‌ای محاسبه می‌شود. از آنجا که مقدار روزانه ET کاربردی‌تر از مقادیر لحظه‌ای است. مقدار ET لحظه‌ای با استفاده از کسر ET مرجع ( $ET_{rF}$ ) به مقدار روزانه تبدیل می‌شود. SEBAL مقدار ET روزانه را با فرض این که  $ET_{rF}$  لحظه‌ای مشابه با میانگین  $ET_{rF}$  در طول ۲۴ ساعت است، محاسبه می‌کند. مقدار ET روزانه ( $\text{mmday}^{-1}$ ) به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$ET_{rF} = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (6)$$

استفاده از الگوریتم Gram-Schmidt Pan Sharpening پیکسل‌ها را به اندازه  $15 \times 15$  متر تبدیل شده که این تصحیح کمک زیادی در وضوح تصاویر دارد.

**الگوریتم SEBAL:** از آنجایی که تصاویر ماهواره‌ای اطلاعاتی را تنها برای زمان گذر ماهواره از منطقه مورد نظر فراهم می‌کند، در نتیجه SEBAL میزان شار لحظه‌ای ET را برای آن زمان تصویر، محاسبه می‌کند. الگوریتم SEBAL شار گرمای نهانی که به مصرف ET می‌رسد را بر اساس مقدار باقی‌مانده انرژی از رابطه (۱) تعیین می‌کند (Bastiaanssen و همکاران، ۲۰۰۲).

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

که در آن،  $\lambda ET$  شار گرمای نهان،  $R_n$  تشعشع خالص در سطح،  $G$  شار گرمای خاک و  $H$  شار گرمای محسوس به هوا بر حسب  $\text{Wm}^{-2}$  است. در ادامه، به چگونگی محاسبه مؤلفه‌های معادله فوق پرداخته شده است. مقادیر تابش خالص خورشیدی ( $R_n$ ) از مهمترین عوامل معادله بوده، بیان‌کننده میزان انرژی تابشی واقعی موجود در سطح زمین است که بر اساس بقای انرژی تعیین می‌شود. بر این اساس، اختلاف بین میزان ورودی و خروجی از سطح زمین بیان‌کننده تابش خالص است.

$$R_n = (1 - \alpha) \times R_s \downarrow + RL \downarrow - RL \uparrow - (1 - \epsilon_0) \times RL \downarrow \quad (2)$$

که در آن،  $\alpha$  آلبیدوی سطحی،  $R_s$  تابش موج کوتاه ( $0.3$  تا  $3$  میکرومتر)،  $RL$  تابش موج بلند ورودی ( $3$  تا  $100$  میکرومتر)،  $RL$  تابش موج بلند خروجی (همگی بر حسب وات بر مترمربع) و  $\epsilon_0$  گسیل‌مندی سطحی پهن نوار است. شار گرمای خاک ( $G$ ) عامل مهم دیگری در معادله بیان انرژی بوده، عبارت است از میزان ذخیره گرمای داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی. از الگوریتم SEBAL ابتدا  $G/R_n$  با استفاده از رابطه تجربی زیر که به‌وسیله Bastiaanssen و همکاران (۲۰۰۲) توسعه‌یافته، محاسبه می‌شود.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (3)$$

$$ETP = ETo \times Kc \quad (10)$$

که در آن، Kc ضریب گیاهی و ETP تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مد نظر است (Alizadeh, 2003). روش تشت تبخیر: استفاده از روش تشت تبخیر، برای برآورد ET پتانسیل از دیگر روش‌هایی است که در پژوهش حاضر برای ارزیابی و صحت‌سنجی مقادیر ET واقعی به‌دست آمده از الگوریتم SEBAL به‌کار گرفته شد. از آنجایی که روش تشت تبخیر تنها تبخیر از سطح آزاد آب را محاسبه می‌کند، به‌دلیل تفاوت سطح آزاد آب و سطوح گیاهی، باید مقدار تبخیر از سطح تشت را در یک ضریب اصلاحی، موسوم به ضریب تشت ( $K_{pan}$ ) ضرب کرد تا ET پتانسیل به‌دست آید (Sharifan و Ghahram, 2006). در این راستا با کمک رابطه ۱۱ و آمار تشت تبخیر ایستگاه سینوپتیک کرمان و ضریب  $K_{pan}$  مقادیر ET پتانسیل برای گیاه مرجع چمن، محاسبه شد.

$$ETP = E_{pan} \times K_{pan} \quad (11)$$

در این پژوهش، برای برآورد ضریب  $K_{pan}$  از روش پیشنهادی Orang (۱۹۹۸) مطابق رابطه (۱۲)، استفاده شد.

$$K_{pan} = 0.51206 - 0.000032 \times U_2 + 0.00289 \times RH + 0.031886 \times RH - 0.000107 \times RH \times \ln(F) \quad (12)$$

که در آن،  $U_2$  میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $\text{kmday}^{-1}$ )،  $RH$  میانگین روزانه رطوبت نسبی (درصد) و  $F$  فاصله سبزیگی که باد به سمت تشت می‌وزد (m) است. در ادامه، با استفاده از آمار سینوپتیک فرودگاه کرمان و رابطه بالا، ضریب تشت در پژوهش حاضر برابر  $0.82$  در نظر گرفته شد. بعد از اجرای مدل SEBAL، برای مقایسه نتایج آن با مقادیر محاسبه‌شده از روش‌های تشت تبخیر و FPM، از شاخص‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )<sup>۱</sup>، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۲</sup>، خطای استاندارد تخمین (SEE)<sup>۳</sup> و میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE)<sup>۴</sup> استفاده شد. در نهایت، برای بررسی حساسیت خروجی‌های SEBAL در اثر تغییر

که در آن،  $ET_{inst}$  تبخیر و تعرق لحظه‌ای ( $\text{mmhr}^{-1}$ ) و  $ET_r$  تبخیر-تعرق واقعی در زمان تصویر است که پارامتر  $ET_{inst}$  با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda \rho_w} \quad (7)$$

که در آن،  $\lambda$  گرمای نهان بخار آب یا میزان گرمای جذب‌شده هنگامی که یک کیلوگرم آب بخار می‌شود ( $\text{J/kg}$ ) و  $\rho_w$  چگالی آب (معادل  $1000 \text{ kgm}^{-3}$ ) عدد  $3600$  برای تبدیل زمان ثانیه به ساعت است.

$$ET_{24} = ETrF \times ETr - 24 \quad (8)$$

که در آن،  $ET_{r-24}$  مقدار تجمعی  $ET_r$  واقعی در طول ۲۴ ساعت روز تصاویر است.

**روش فائو-پنمن-مانتیث (FPM):** در صورت عدم دسترسی به داده‌های لایسیمتری، استفاده از داده‌های تشت تبخیر و نیز معادلات تجربی، برای ارزیابی عملکرد الگوریتم SEBAL پیشنهاد شده است. با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده در نقاط مختلف جهان، از بین معادلات تجربی پیشنهادشده برای محاسبه ET گیاه مرجع (ETO)، روش فائو-پنمن-مانتیث (FPM) برای شرایط آب و هوایی خشک و نیز اقلیم مرطوب، بهترین عملکرد را داشته است. لذا، در این پژوهش برای برآورد ET مرجع و نیز صحت‌سنجی خروجی‌های الگوریتم SEBAL از این روش استفاده شد. معادله FPM به‌صورت رابطه (۹) ارائه می‌شود (Allen و همکاران، ۲۰۰۲):

$$ETO = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{Cn \times u_2 (es - ea)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + Cdu_2)} \quad (9)$$

که در آن،  $ET$ ،  $ETO$  گیاه مرجع ( $\text{mmhr}^{-2}$ ) یا ( $\text{mmday}^{-2}$ )،  $Rn$  تشعشع خالص در سطح پوشش گیاهی ( $\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ) یا ( $\text{MJm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ )،  $G$  شار گرمایی خاک ( $\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ) یا ( $\text{MJm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ )،  $T$  میانگین روزانه یا ساعتی دمای هوا در ارتفاع  $1/5$  تا  $2/5$  متری ( $^{\circ}\text{C}$ )،  $u_2$  میانگین روزانه یا ساعتی سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $\text{ms}^{-1}$ )،  $ea$  و  $es$  میانگین فشار بخار اشباع و واقعی در ارتفاع  $1/5$  تا  $2/5$  متری،  $\Delta$  شیب منحنی دما-فشار بخار ( $\text{kpa}\cdot\text{c}^{-2}$ )،  $\gamma$  ثابت سایکرومتریکی ( $\text{kpa}\cdot\text{c}^{-1}$ ) و  $Cn$  و  $Cd$  ضرایب ثابتی هستند که با توجه به نوع گیاه مرجع و دوره محاسباتی تعیین می‌شود. در نهایت، مقدار ET پتانسیل از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

<sup>1</sup> Coefficient of determination

<sup>2</sup> Root Mean Square Error

<sup>3</sup> Standard Error Estimation

<sup>4</sup> Mean Absolute Relative Error

## نتایج و بحث

الگوریتم SEBAL از بخش‌های مختلفی تشکیل شده و طی فرایند محاسبات آن، پارامترهای مختلفی از جمله شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و دمای سطحی (Ts) محاسبه می‌شود. جدول ۲، تغییرات پارامترهای Ts، NDVI، متوسط دما، سرعت باد و ET به دست آمده از الگوریتم SEBAL را برای هفت تصویر موجود نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تاریخ چهارم شهریور با میانگین دمای سطحی ۳۲۲/۵ درجه کلوین، کمترین و در تاریخ ۱۰ مرداد با میانگین دمای سطحی ۳۴۰/۶ بیشترین دمای سطحی در منطقه مطالعاتی وجود داشته است که این روند با دمای هوای منطقه مطابقت دارد.

پارامترهای ورودی آن، ET محاسبه شده نسبت به پارامترهای کلیدی الگوریتم در روزهای ۲۰۶، ۲۳۸ و ۲۵۴ ژولیوسی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا، ابتدا الگوریتم SEBAL با استفاده از داده‌های ورودی اجرا و خروجی‌های به دست آمده، به عنوان مقادیر مبنا (شاهد) مد نظر قرار گرفت. در ادامه، با تغییر هر یک از پارامترهای کلیدی ورودی به SEBAL و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، مدل برای شرایط جدید (آزمایشی) اجرا و با ترسیم مقادیر شاهد و آزمایشی، قضاوت در مورد حساس بودن آن پارامتر صورت گرفت. پارامترهای نامبرده شامل دمای سطحی، دمای هوا، تابش طول موج کوتاه ورودی، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، آلبیدوی سطحی، سرعت باد و شاخص سطح برگ است.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای Ts و NDVI به دست آمده از الگوریتم SEBAL با داده‌های هواشناسی

تاریخ تصویر	متوسط سرعت باد ( $\text{ms}^{-1}$ )	متوسط دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	میانگین Ts ( $^{\circ}\text{C}$ )	شاخص پوشش گیاهی	SEBAL ( $\text{mmday}^{-1}$ )
۱۳۹۷/۰۵/۰۳	۳/۴	۲۸/۸	۵۸/۲۵	۰/۱	۸/۵
۱۳۹۷/۰۵/۱۰	۳/۲	۲۶/۰	۶۶/۸۵	۰/۱	۹/۵
۱۳۹۷/۰۵/۱۹	۳/۴	۲۵/۶	۵۷/۴۵	۰/۱	۹/۳
۱۳۹۷/۰۵/۲۶	۴/۴	۲۵/۳	۶۰/۷۵	۰/۱	۱۱/۱
۱۳۹۷/۰۶/۰۴	۴/۴	۲۹/۶	۴۹/۴۵	۰/۱	۱۱/۳
۱۳۹۷/۰۶/۱۳	۳/۵	۲۱/۶	۵۱/۵۵	۰/۱	۸/۹
۱۳۹۷/۰۶/۲۰	۲/۷	۲۵/۲	۵۰/۴۵	۰/۱	۸/۰

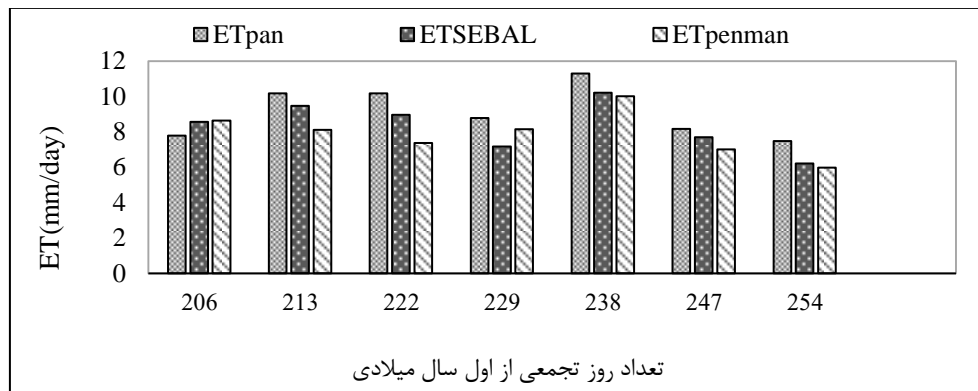
مورد مطالعه، زمین‌های چمن زیادی وجود دارد، به همین دلیل، در این قسمت پیکسل سرد از زمین‌های چمن انتخاب شد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار ET مربوط به روز ۲۳۸ میلادی است که با توجه به جدول ۲ بیشترین دما و سرعت باد در این روز حادث شده که این نشان‌دهنده همخوانی ET به دست آمده از الگوریتم SEBAL با پارامترهای هواشناسی است.

در شکل ۵، عملکرد الگوریتم SEBAL (پیکسل سرد انتخاب شده در مزرعه سورگوم) با داده‌های به دست آمده از رابطه FPM مقایسه شده است. در شکل ۶ نیز مقادیر ET به دست آمده از الگوریتم SEBAL برای گیاه مرجع با داده‌های تشت تبخیر آمده است. نتایج الگوریتم SEBAL نشان داد که مقادیر شاخص‌های SEE، RMSE و  $R^2$  نسبت به

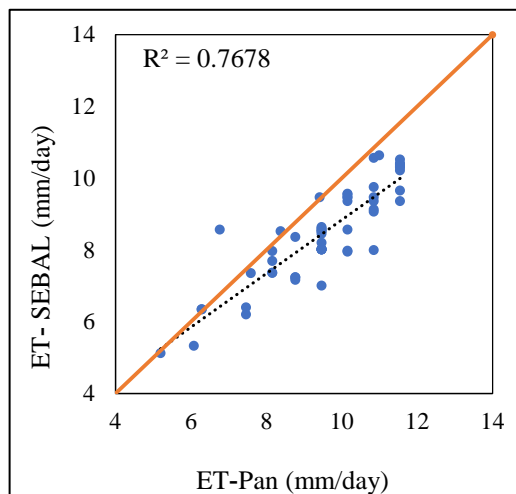
همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، میانگین NDVI در تاریخ چهارم شهریور با مقداری برابر ۰/۱۰۶ نسبت به دوره‌های دیگر بیشتر بوده که دلیل آن واقع شدن محصول سورگوم در دوره میانی رشد خود و بیشینه بودن سبزیگی گیاه است. این در حالی است که در روز بیستم شهریور، مدل SEBAL کمترین مقدار ET را به خود اختصاص داده که دلیل آن واقع شدن گیاه دوره انتهایی رشد محصول و در نتیجه کمینه بودن NDVI است. در شکل ۴، تغییرات روزانه ET به دست آمده از سه روش مختلف با استفاده از داده‌های هواشناسی، طی دو ماه از سال ۲۰۱۸ میلادی ارائه شده است. برای مقایسه مقادیر تشت تبخیر و مدل SEBAL لازم است تا پیکسل سرد از منطقه‌ای که بیشترین سبزیگی و کمترین دما را داشته است، انتخاب شود. از آنجایی که در منطقه

اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر به ترتیب برابر ۰/۷۶، ۰/۷۷ و ۰/۷۶ میلی‌متر بر روز و مقادیر شاخص‌های یادشده برای روش تجربی FPM به ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۱۱ و ۰/۱۳ است. همچنین، مقادیر شاخص MARE نیز به ترتیب برابر ۰/۹۲ میلی‌متر بر روز بوده که مقدار  $R^2$  معنادار است.

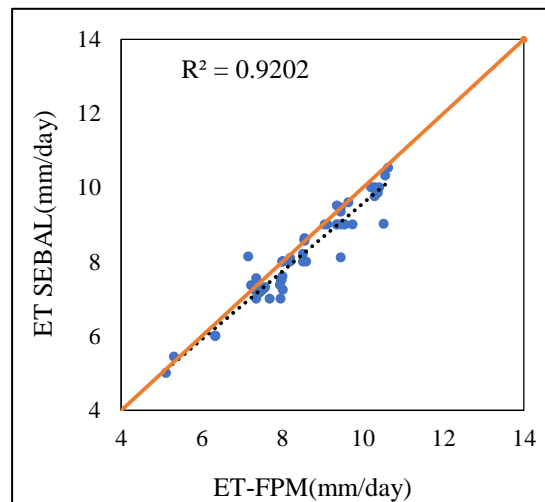
شکل ۴- تغییرات زمانی ET با روش‌های FPM، SEBAL و تشت تبخیر



شکل ۴- تغییرات زمانی ET با روش‌های FPM، SEBAL و تشت تبخیر



شکل ۶- مقایسه مقادیر تبخیر از تشت با خروجی SEBAL



شکل ۵- مقایسه مقادیر تخمینی روش FPM با خروجی SEBAL

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، پارامترهای  $T_s$  و  $R_s$  دارای بیشترین شیب نسبت به ET مینا بوده به‌همین دلیل، این دو پارامتر بیشترین حساسیت را بر روی ET به‌دست آمده از الگوریتم SEBAL دارند. تأثیر پارامترهای  $\alpha$  و  $U_x$  در تخمین ET در مرتبه دوم قرار دارد و پارامترهای

NDVI، LAI، کمترین حساسیت را در تخمین ET دارد که با توجه به شرایط آب و هوایی در هر روز ژولایوسی متفاوت است که این نشان می‌دهد در صورتی که اندازه‌گیری دقیق LAI و NDVI ممکن نباشد، می‌توان از روابط تجربی برای محاسبه این متغیرها استفاده کرد.

جدول ۳- مقادیر شیب منحنی حساسیت به ازای تغییر هر پارامتر

$T_s$	$R_s$	$U_x$	NDVI	LAI	$\alpha$	روز ژولایوسی
۰/۱۶	۰/۱۶۸	۰/۰۰۸۸	-۰/۰۰۶	۰/۰۰۱۷	-۰/۰۳۵	۲۰۶
۰/۱۴	۰/۱۴۴	۰/۰۱۲۲	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۷۷	-۰/۰۱۳	۲۳۸
۰/۲۴	۰/۱۶۰۴	۰/۰۱۲	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۱۹	-۰/۰۲۷	۲۵۴



همین راستا هزینه و زمان بیشتری برای جمع‌آوری این داده‌ها باید صرف شود و پارامترهای شاخص سطح برگ و شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی، دارای حساسیت کم هستند.

- در مقیاس‌های بزرگ، تصمیم‌گیری همچون حوزه‌های آبخیز که در آن‌ها بخش کشاورزی، عمده مصرف‌کننده آب است، با در دست بودن نقشه‌های ET و توزیع مکانی مقادیر آن، می‌توان در مورد اصلاح روش‌های آبیاری و نحوه مدیریت منابع آب آن مناطق، تصمیمات مناسب اتخاذ کرد.

- با اندازه‌گیری دقیق میزان آب مورد استفاده برای آبیاری محصول کشت‌شده در مزرعه و استفاده از مقادیر ET خروجی از SEBAL، می‌توان میزان تلفات آبیاری را با دقت خوبی برآورد و راندمان آبیاری را تعیین کرد.

در نهایت، با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای مطالعات بعدی توصیه می‌شوند.

- با توجه به تفکیک زمانی ماهواره Landsat8 (۱۶ روز)، می‌توان از تصاویر ماهواره MODIS و استفاده از الگوریتم‌های ادغام، برای تدقیق نتایج SEBAL و کم‌کردن فاصله زمانی تصاویر به‌خصوص برای حوضه‌های بزرگ‌مقیاس استفاده کرد.

- برای ارزیابی عملکرد مدل SEBAL با سایر فنون سنجش از دوری، می‌توان از الگوریتم‌های تک-منبعی دیگر همانند الگوریتم بیلان انرژی سطحی ساده‌شده عملیاتی (SSEBop) استفاده کرد.

- برای ارزیابی دقیق مقادیر ET به‌دست آمده از مدل‌های تجربی و نیز الگوریتم‌های سنجش از دوری، می‌توان اقدام به احداث لایسیمترهای وزنی یا حجمی در منطقه مد نظر کرد.

در مطالعه تحلیل حساسیت، Ramezani Khojeen و همکاران (۲۰۱۶) بیشترین حساسیت مدل بیلان انرژی روزانه را نسبت به پارامترهای دمای سطحی، دمای هوا، تابش طول موج کوتاه ورودی و ساعات آفتابی بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که پارامترهای رطوبت نسبی و آلبدوی سطحی دارای حساسیت متوسط تا زیاد و پارامتر باد و شاخص سطح برگ دارای حساسیت کم تا متوسط است. با توجه به تفاوت‌های مدل SEBAL استفاده‌شده در این پژوهش با مدل پیشنهادی ایشان، پارامترهای دمای هوا، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته است. نتایج فوق نشان می‌دهد که تمامی پارامترهای تحلیل‌شده در این پژوهش، همخوانی قابل توجهی با نتایج مطالعه رضانی خوجین و همکاران داشته است.

### نتیجه‌گیری

استخراج میزان تبخیر و تعرق (ET) از تصاویر ماهواره-ای راهکاری مناسب برای ارتقاء مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی است. موارد زیر نتیجه‌گیری کلی پژوهش حاضر را نشان می‌دهند.

- در این پژوهش، به‌علت استفاده مناسب از تصاویر Landsat8 (سنجنده OLI و TIRS) و انتخاب دقیق پیکسل‌های سرد و گرم برای تعیین مقدار ET سایر پیکسل‌ها، نتایج مدل SEBAL در فصل رشد محصول سورگوم، منطقی و در قیاس با روش‌های تشت تبخیر و روش تجربی FPM از همبستگی خوبی برخوردار است.

- پارامترهای دمای سطحی، تابش طول موج کوتاه ورودی و آلبدوی دارای حساسیت بالا و متوسط به‌خصوص در مناطق با ET‌های پایین هستند، در

### منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 2003. Principles of applied hydrology. Imam Reza University Press, 735 pages (in Persian).
2. Allen, R.G., M. Tasumi, R. Trezza, R. Waters and W. Bastiaanssen. 2002. SEBAL, Surface Energy Balance Algorithms For Land. Advance Training and User's Manual, Idaho Implementation, Version 1, 98 pages.
3. Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology, 229(1-2): 87-100.

4. Bastiaanssen, W., M. Menenti, R. Feddes and A. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213: 198-212.
5. Bastiaanssen, W., M.D. Ahmad and Y. Chemin. 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resources Research*, 38(12): 1273-1281.
6. Cammalleri, C., G. Ciraolo, G. La Loggia and A. Maltese. 2012. Daily evapotranspiration assessment by means of residual surface energy balance modeling: a critical analysis under a wide range of water availability. *Journal of Hydrology*, 452-453: 119-129.
7. Ghaemi, M., M. Raeini Serjaz and M. Mousavi Baygi. 2012. Comparing wheat evapotranspiration estimated by Bowen Ratio Energy Balance (BREB) method with result of lysimeter. *Journal of Water and Soil*, 1293(5): 1152-1160 (in Persian).
8. Karbasi, M., M. Moghadam, J. Nikbakht and A. Kaviani. 2016. Estimation of crop actual evapotranspiration using SEBAL algorithm, case study: Khoramdareh region at Zanjan Province. *Ecohydrology*, 3(3): 427-437.
9. Karimi, A.R. 2011. Evaluation of remote sensing algorithms (SEBAL and SEBS) for calculation of evapotranspiration using satellite images. MSc Thesis, Razi University, Kermanshah, 105 pages (in Persian).
10. Lane, S.N., K.S. Richards and J.H. Chandler. 1994. Distributed sensitivity analysis in modelling environmental systems. *Proceedings of the Royal Society*, 447: 49-63.
11. Long, D., V.P. Singh and Z.L. Li. 2011. How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D21): 22-43.
12. Malekinejad, H. and S. Poormohammadi. 2008. Study the role of climatic parameters in evaporation phenomenon at heterogeneous zones of arid and semi-arid regions of Iran. *Water Resource Conference*, Tabriz, 185 pages (in Persian).
13. Mardikis, M.G., D.P. Kalivas and V.J. Kollias. 2005. Comparison of interpolation methods for the prediction of reference evapotranspiration, an application in Greece. *Water Resources Management*, 19: 251-278.
14. McMahon, T.A., M.C. Peel, L. Lowe, R. Srikanthan and T.R. McVicar. 2013. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4): 1331-1363.
15. Rahimi, S., M.A. Gholami Sefidkouhi, M. Raeini-Sarjaz and M. Valipour. 2015. Estimation of actual evapotranspiration by using MODIS images, a case study: Tajan Catchment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(5): 695-709.
16. Ramezani Khojeen, A., M.M. Kheirkhah Zarkesh, P. Daneshkar Arasteh, A. Moridi and R. Alimohammadi. 2016. Sensitivity analysis of calculated evapotranspiration using daily energy balance model and comparing it with SEBAL model. *Water Resources Research*, 185(1): 18-28 (in Persian).
17. Ramos, J.G., C.R. Cratchley, J.A. Kay, M.A. Casterad, A. Martinez-cob and R. Dominguez. 2009. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E. Spain. *Agricultural Water Management*, 96(4): 638-652.
18. Rana, G. and N. Katerji. 1998. A measurement based sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. *Theoretical and Applied Climatology*, 60(1): 141-149.
19. Steele, D., B. Thoreson, D. Hopkins, B. Clark, S. Tuscherer and R. Gautam. 2015. Spatial mapping of evapotranspiration over Devils Lake Basin with SEBAL: application to flood mitigation via irrigation of agricultural crops. *Irrigation Science*, 33(1): 15-29.
20. Sharifan, H. and B. Ghahram. 2006. Evaluation and comparison of estimated reference evapotranspiration from evaporation pan with ETO standard method in Gorgan. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 13(5): 18-28 (in Persian).