

## برآورد تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم توازن انرژی سطحی سبال و تصاویر تلفیق شده‌ی ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ (مطالعه موردی: کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان)

ستاره صحراگرد<sup>۱\*</sup>، عبدعلی ناصری<sup>۲</sup>، محمد الباجی<sup>۳</sup>، مصطفی کابلی‌زاده<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۲۳

### چکیده

تبخیر و تعرق یکی از عوامل مهم در چرخه‌ی هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب می‌باشد. اغلب روش‌های زمینی از اندازه‌گیری نقطه‌ای برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند، سنجش از دور این قابلیت را دارد تا مقدار تبخیر و تعرق را تخمین زده و توزیع مکانی آن را مورد بررسی قرار دهد. در این پژوهش، از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲، برای برآورد مقدار دقیق تبخیر و تعرق روزانه گیاه نیشکر، در کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان، واقع در استان خوزستان، با استفاده از مدل سبال، استفاده گردید. اعتبارسنجی کارایی مدل سبال در دو حالت استفاده از تصاویر تلفیق شده و استفاده از تصاویر لندست ۸ با داده‌های لایسیتری انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که مدل سبال با تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، با  $(R^2 = 0/88)$ ، و مدل سبال با تصاویر ماهواره‌ای تلفیق شده لندست ۸ و سنتینل ۲، با  $(R^2 = 0/90)$ ، در مجموع همبستگی و تطابق مناسبی را با روش لایسیتری داشته و نتایجی مشابه این روش را تخمین زده است.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر و تعرق، سنجش از دور، سنتینل ۲، لایسیتری، نیشکر

### مقدمه

می‌کنند، تنها می‌توانند برای برآورد تبخیر و تعرق در مکان خاص و نه در مقیاس بزرگتر استفاده شوند، بر این محدودیت می‌توان با استفاده از ترکیبی از داده‌های زمینی و سنجش از دور، در یک مدل توازن انرژی سطحی، غلبه کرد (Enku, 2009). دسترسی آسان و ارزان به داده‌ها، دقت بالای آن‌ها، جامع و گسترده بودن تصاویر و برخورداری از تنوع طیفی فراوان، از جمله ویژگی‌هایی است که باعث برتری سنجش از دور، نسبت به دیگر روش‌های تامین اطلاعات شده است (قمرینا و رضوانی، ۱۳۹۳). در سالیان اخیر الگوریتم‌های متعددی برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش از دور ارائه شده است. این مدل‌ها که بر رابطه‌ی بیلان انرژی استوار هستند، روش‌های توازن انرژی سطحی، نام دارند. از جمله آن‌ها، می‌توان به (SEBAL)<sup>۱</sup>، الگوریتم توازن انرژی سطحی زمین (Bastiaanssen et al, 1998a)، (S-SEBI)<sup>۲</sup> ساده شده شاخص توازن انرژی سطحی (Roerink et al, 2000)، (SEBS)<sup>۳</sup> سیستم توازن انرژی سطحی (Su, 2002)، (METRIC)<sup>۴</sup> نقشه تبخیر و تعرق با واسنجی درونی (Allen et al, 2007) و (SSEB)<sup>۵</sup> ساده شده توازن انرژی سطحی (Senay et al, 2007) اشاره نمود. برای محاسبه تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های سنجش از دور، می‌توان از تصاویر ماهواره‌های مختلفی از جمله مودیس و لندست استفاده نمود. ماهواره‌های سنجش از دور داده‌هایی با خصوصیت مکانی و طیفی مختلفی از سطح زمین جمع‌آوری

مدیریت مؤثر و کارآمد منابع آب نیازمند شناخت دقیق از جریان‌های هیدرولوژیکی است. یکی از روش‌هایی که باعث بهبود مدیریت مصرف آب و در نهایت افزایش راندمان آب مصرفی می‌شود، برآورد دقیق تبخیر و تعرق یا تخمین میزان آب مصرفی گیاهان می‌باشد. تبخیر و تعرق، به مجموع تبخیر از سطح مرطوب خاک و تعرق از سطح گیاهان گفته می‌شود. تعامل پیچیده‌ی بسیاری از عوامل زیست محیطی و اقلیمی، برآورد دقیق تبخیر و تعرق را به امری چالش برانگیز تبدیل کرده است. در چند دهه گذشته، روش‌های متعددی برای تخمین تبخیر و تعرق ارائه شده است. روش‌های متعارف تخمین تبخیر و تعرق، که از داده‌های هواشناسی استفاده

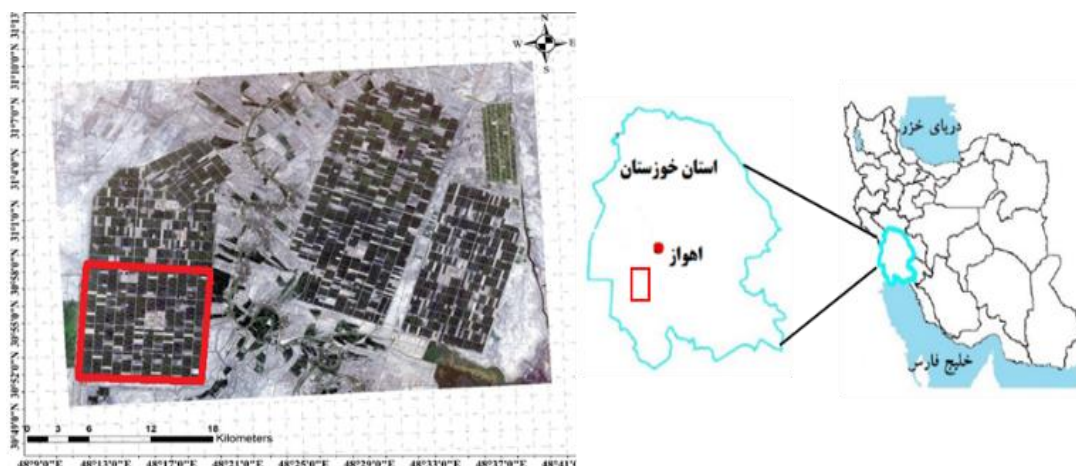
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز  
۲- استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
۳- استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
۴- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: setarehsahragard@gmail.com)

برای تخمین تبخیر و تفرق واقعی در شهر بابل عراق، از مدل سبال استفاده نمودند. آن‌ها این مدل را برای دو سری داده‌ی هواشناسی اخذ شده از ایستگاه هواشناسی اجرا کردند. مقدار ضریب همبستگی برای سری اول داده‌های هواشناسی در ماه مارس، برابر  $(R^2=0/86)$  و برای سری دوم داده‌ها در ماه سپتامبر، برابر  $(R^2=0/85)$  به دست آمد (Jaber et al, 2016). وروانی و همکاران (۱۳۹۸)، از تلفیق تصاویر لندست ۸ و مودیس، و مدل سبال برای برآورد تبخیر و تفرق ذرت در منطقه ماهیدشت کرمانشاه استفاده کردند. مقادیر حاصل در قیاس با داده‌های زمینی، بیانگر این بود که تلفیق تصاویر ماهواره‌ای منجر به بهبود دقت تبخیر و تفرق برآوردی نسبت به تصاویر لندست ۸ شده است. به طور کلی نتایج نشان داد که برآورد تبخیر و تفرق با استفاده از الگوریتم سبال و تلفیق تصاویر با دقت‌های متفاوت زمانی و مکانی می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. گوشه‌گیر و همکاران (۱۳۹۷)، برای محاسبه تبخیر و تفرق واقعی گیاه نیشکر، در مزارع کشت و صنعت امیرکبیر، از تلفیق تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ و مودیس و الگوریتم سبال در مهرماه سال‌های ۹۳ تا ۹۵، استفاده کردند. مقایسه‌ی نتایج حاصل از الگوریتم سبال و روش فائو ۵۶ نشان داد که الگوریتم سبال از همبستگی خوبی  $(R^2=0/89)$  برخوردار است. مروری بر مطالعات انجام شده، حاکی از آن بود که تخمین تبخیر و تفرق با تصاویر تلفیق شده‌ی ماهواره‌ای، اغلب نتایج بهتری را ارائه کرده است. با توجه به اهمیت تخمین دقیق تبخیر و تفرق به عنوان یک پارامتر مهم در مدیریت منابع آب، از آنجائی‌که تاکنون از مدل توازن انرژی سطحی سبال با تلفیق تصاویر ماهواره‌ی سنتینل ۲ و لندست ۸ (با قدرت تفکیک مکانی بالا) استفاده نشده، هدف از این پژوهش بررسی و ارزیابی مدل سبال با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ و سنتینل ۲، برای برآورد تبخیر و تفرق واقعی نیشکر، در مزارع کشت و صنعت میرزا کوچک‌خان، واقع در استان خوزستان می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

کشت و صنعت میرزا کوچک‌خان یکی از هفت شرکت توسعه کشت نیشکر و صنایع جانبی در منطقه جنوب استان خوزستان می‌باشد. موقعیت جغرافیایی، حد شمالی  $31^{\circ}15'$ ، حد جنوبی  $30^{\circ}46'$ ، حد شرقی  $48^{\circ}30'$  (رودخانه کارون)، حد غربی  $48^{\circ}12'$  (جاده اهواز - خرمشهر)، را دارد. کل مساحت کشت و صنعت میرزا کوچک خان در حدود  $14000$  هکتار است که نزدیک به  $12000$  هکتار آن به مزارع  $25$  هکتاری شبکه‌بندی شده است. متوسط بارندگی و تبخیر سالانه به ترتیب  $161$  و  $3222$  میلی‌متر و میانگین دمای سالانه  $25$  درجه سلسیوس است. در شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، آمده است.

می‌کنند، که هرکدام بخشی از خصوصیات عوارض را نمایان می‌سازند، بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده از این داده‌ها در کنار یکدیگر، استخراج اطلاعات از تصاویر مذکور را دقیق‌تر می‌سازد. در سال‌های اخیر، روش‌های گوناگونی ابداع و عرضه شده است که می‌توان قدرت تفکیک زمانی و یا مکانی را از طریق آنها ارتقاء بخشید. از جمله این روش‌ها، روش تلفیق تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۳). هدف از تلفیق تصاویر، ترکیب داده‌های مختلف جهت استخراج اطلاعات بیشتر نسبت به استفاده از هرکدام از داده‌های منفرد می‌باشد به گونه‌ای که مزایای حاصل از ترکیب داده‌ها، بیشتر از استفاده از تک‌تک داده‌ها به صورت جداگانه باشد (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۳). بر طبق مطالعات، تلفیق یک تصویر پانکروماتیک و چند طیفی با قدرت تفکیک مکانی پایین به ابزاری قدرتمند برای بسیاری از کاربردها تبدیل شده و به همین علت روش‌های مختلف تلفیق در دو دهه اخیر ارائه شده است (Pohl & Genderen, 1998; Wang et al, 2004; Lau & King, 2000). با پیشرفت در زمینه سنجش از دور، استفاده از ماهواره‌های جدید مانند سنتینل ۲ به تدریج امکان‌های جدیدی را برای درک بهتر از جریان‌های هیدرولوژیکی در قدرت مکانی بالاتر فراهم می‌آورد (Sharma & Tare, 2018). تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای استمرار و ارتقاء داده‌های ماهواره‌ای لندست و ماموریت‌های دیگر طراحی شده است. این تصاویر، به صورت رایگان و در مقیاس جهانی در دسترس هستند و دارای طول موج مشابه و همان سیستم مختصات جغرافیایی داده‌های لندست می‌باشند، که این امر فرصت خوبی را برای تلفیق داده‌های ماهواره‌ای این دو نوع سنجنده، فراهم می‌سازد (Kyalo, 2017). تاکنون مطالعاتی برای بررسی تخمین تبخیر و تفرق واقعی با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از یک الگوریتم توان انرژی سطحی، در مناطق مختلف دنیا انجام شده که در ادامه نتایج برخی از آن‌ها ارائه گردیده است. شارما و همکاران، با مدل توازن انرژی سطحی (SSEBop) و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و لندست ۸، اقدام به برآورد تبخیر و تفرق، در منطقه مزرعه‌ی ذرت، برنج، نیشکر، در دهلی‌نو کردند. مقادیر حاصل از مدل (SSEBop) را با روش فائو ۵۶، مقایسه کردند. اعتبارسنجی مدل (SSEBop)، همبستگی خوب  $(R^2=0/71)$  این مدل را با روش استاندارد نشان داد (Sharma & Tare, 2018). کایلو، برای تخمین بهره‌وری آبیاری در منطقه نایواشا کنیا، از الگوریتم (سبس) و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و مودیس استفاده کرد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل (سبس) در مناطق آبیاری شده عملکرد مناسبی دارد (Kyalo, 2017). نیوکی، در پژوهشی، برای بررسی بهره‌وری آب، درحوضه آبریز نایواشا، از مدل (سبس) و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مودیس داده‌های هواشناسی استفاده کرد. نتایج حاکی از همبستگی خوب مدل (سبس) و روش‌های استاندارد بود (Njuki, 2016). جابر و همکاران (۲۰۱۶)،



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی کشت و صنعت میرزا کوچک خان

آخذ گردیده‌اند. در این پژوهش برای پیاده‌سازی الگوریتم سبال، داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک نیاز است. این داده‌ها از ایستگاه یک، دو و سه سینوپتیک کشت و صنعت میرزا کوچک خان تهیه گردیدند. در جدول (۱)، تاریخ دقیق تصاویر مورد استفاده در این پژوهش و آمار هواشناسی مربوط به روزهای گذر تصاویر ماهواره‌ای، ارائه می‌گردد.

تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش، شامل تصاویر ماهواره‌ی سنتینل ۲ (سنجنده MSI) و لندست ۸ (سنجنده OLI)، مربوط به سال ۲۰۱۸ میلادی (سال ۹۶ و ۹۷ شمسی) می‌باشند که از طریق وب‌گاه کپرنیکوس (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>) و سازمان زمین‌شناسی آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)، در طول فصل رشد نیشکر،

جدول ۱- آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک میرزا کوچک خان مربوط به روزهای گذر ماهواره‌ی سنتینل ۲ و لندست ۸

ردیف	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	دمای کمینه (درجه سلسیوس)	دمای بیشینه (درجه سلسیوس)	رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	ساعات آفتابی
۱	۲۰۱۸/۰۱/۳۱	۱۳۹۶/۱۱/۱۱	۲/۴	۱۸/۴	۵۱/۰	۲/۰	۹/۵
۲	۲۰۱۸/۰۲/۱۳	۱۳۹۶/۱۲/۲۲	۱۰/۶	۲۹/۲	۳۹/۵	۵/۱	۱۰/۲
۳	۲۰۱۸/۰۵/۱۶	۱۳۹۷/۰۲/۲۶	۲۰/۰	۳۶/۰	۳۴/۶	۳/۰	۱۱/۵
۴	۲۰۱۸/۰۷/۱۰	۱۳۹۷/۰۴/۱۹	۲۸/۰	۵۱/۲	۴۰/۰	۲/۵	۱۱/۳
۵	۲۰۱۸/۰۸/۲۰	۱۳۹۷/۰۵/۲۹	۲۴/۴	۴۶/۴	۴۸/۳	۲/۴	۱۱/۳
۶	۲۰۱۸/۰۹/۲۸	۱۳۹۷/۰۷/۰۶	۲۰/۵	۴۱/۳	۴۱/۳	۳/۶	۹/۶

زمانی ۱۶ روز است، ماهواره سنتینل ۲ از توان تفکیک زمانی بالایی برخوردار است. تصاویر سنتینل ۲ با داشتن این مزیت‌ها، می‌توانند برای نظارت بر تغییرات پوشش گیاهی در فصل رشد بسیار کاربردی باشند. ماهواره‌ی سنتینل ۲ از لحاظ توان تفکیک طیفی (قابلیت و توانایی سنجنده در شناسایی طیف‌های مختلف امواج الکترومغناطیس) دارای ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی تا مادون قرمز طول موج کوتاه تشکیل شده که چهار باند از توان تفکیک مکانی (قابلیت و توانایی هر سنجنده در شناسایی جزئیات پدیده‌های مکانی موجود در سطح زمین) ۱۰ متر، سه باند از توان تفکیک ۲۰ متر و سه باند نیز از توان تفکیک ۶۰ متر در آن برخوردار است. بر همین اساس با توجه به مشخصه‌های طیفی و مکانی این ماهواره و شباهتی که بین داده‌های

### تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲

ماهواره‌ی لندست ۸ با ارائه‌ی تصاویر با وضوح متوسط از ۱۵ تا ۱۰۰ متر از سطح زمین و مناطق قطبی، در محدوده نور مرئی، فروسرخ نزدیک، موج کوتاه فروسرخ و طیف فروسرخ حرارتی، به‌کار گرفته می‌شود. سنتینل ۲، دارای توان تفکیک رادیومتریک (توانایی سنجنده در شناسایی انرژی‌های الکترومغناطیس) ۱۲ بیتی می‌باشد، یعنی قادر است انرژی دریافتی را در محدوده بین صفر تا ۴۰۹۵ ثبت کند. توان تفکیک زمانی (توانایی دو تصویربرداری متوالی از یک منطقه مشخص در کمترین فاصله زمانی) سنتینل ۲ در شرایط جوی مناسب، تا زمانی که فقط سنتینل 2A در مدار است، ۱۰ روز در استوا می‌باشد. در مقایسه با ماهواره‌ی لندست ۸ که دارای توان تفکیک

بیش از پیش و به‌طور دقیق‌تر، از لحاظ مختصاتی بر هم منطبق شوند، لازم است تا عملیات تصحیح هندسی و هم مختصات سازی را انجام دهیم. در مرحله‌ی آخر از فرآیند تلفیق، از الگوریتم گرام اشمیت برای تلفیق داده‌های چند طیفی لندست ۸ و باند پانکروماتیک شبیه سازی شده‌ی سنتینل ۲ استفاده گردید.

### داده‌های لایسیمیتری

در این مطالعه برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی به روش لایسیمیتری، از لایسیمتر زهکش دار شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر، به عرض جغرافیایی  $31^{\circ}04'N$  و طول جغرافیایی  $49^{\circ}19'E$ ، استفاده گردید. این لایسیمتر حدود  $120$  مترمربع مساحت داشته و خود از ده عدد لایسیمتر کوچک‌تر با ابعاد  $6 \times 2$  متر ( $12$  مترمربع) با کف شیب‌دار و عمق حدود  $2$  متر و شیب حدود  $0.05/0$  تشکیل شده است. پلات‌های هم‌جوار لایسیمترها تماماً تحت کشت آبی گیاه نیشکر می‌باشند. حجم آب ورودی بارندگی با استفاده از دستگاه‌های باران‌سنج و باران‌نگار با شبکه‌های  $65$  لیتری اندازه‌گیری می‌شود. در زیر زهکش‌های خروجی هر جعبه یک بشکه برای جمع‌آوری زهاب‌ها قرار داده شده است. برای تخلیه آب خروجی درون حوضچه محل تخلیه زهاب‌ها، از یک پمپ شناور یک اینچی استفاده شده است و آب زهکش به درون منهول کنار لایسیمتر پمپاژ و توسط لترال‌های مزرعه مجاور به خط کلکتور اصلی مزارع منتقل می‌شود (گوشه‌گیر،  $1396$ ). در شکل (۲)، تصویر لایسیمتر آمده است.

این ماهواره با ماهواره‌هایی چون لندست وجود دارد، می‌توان از آن‌ها به‌صورت مکمل و در ارتباط با یکدیگر استفاده نمود تا از این طریق بتوان میزان دقت و صحت تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات اخذ شده از آن‌ها را نیز افزایش داد (ESA site, 2016). در این مطالعه از تلفیق تصاویر دو ماهواره‌ی لندست ۸ و سنتینل ۲ استفاده گردید. در تلفیق باندهای چند طیفی ماهواره لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی  $30$  متر، و تصویر سنتینل ۲ با قدرت تفکیک مکانی  $10$  متر، به عنوان باند پانکروماتیک، به‌کار گرفته شد. پس از تصحیحات مورد نیاز انجام گرفته بر تصاویر لندست ۸، اقدام به تلفیق باندهای  $1$  تا  $7$  با قدرت تفکیک  $30$  متر و باند پانکروماتیک (باند ۸)، با قدرت تفکیک  $15$  متر، از طریق الگوریتم گرام اشمیت (Laben and Brower, 2000) گردید. پس از اجرای دستور گرام اشمیت اندازه‌ی پیکسل‌ها از  $30$  متر به  $15$  متر رسیده است. با توجه به اینکه در این پژوهش داده‌های چند طیفی لندست ۸ با هفت باند داریم در مقابل نیازمند به یک باند پانکروماتیک می‌باشیم اما در بین داده‌های ماهواره‌ی سنتینل ۲ این باند وجود ندارد و لازم است با استفاده از داده‌های چند طیفی موجود، باند پانکروماتیک مورد نظر را ایجاد بنمائیم. در این مرحله پس از پیش پردازش مورد نیاز بر تصاویر سنتینل ۲، با استفاده از باندهای آبی، سبز و قرمز، ماهواره سنتینل ۲، با قدرت تفکیک ده متر و میانگین‌گیری از این سه باند، باندی پانکروماتیک (قدرت تفکیک مکانی ده متر)، با ترکیبی از امواج محدوده‌ی مرئی شبیه‌سازی گردید. پس از انجام مراحل پیش‌گفته، برای اینکه هندسه‌ی دو تصویر آماده شده، داده‌های چند طیفی لندست ۸ و باند پانکروماتیک سنتینل ۲،



شکل ۲- لایسیمتر زهکش‌دار واقع در شرکت کشت و صنعت امیرکبیر (گوشه‌گیر،  $1396$ )

شده برحسب میلی‌متر،  $D_{rz}$  عمق توسعه‌ی ریشه‌ی گیاه (متر)،  $\theta_f$  درصد رطوبت حجمی خاک در انتهای نمونه‌برداری و  $\theta_i$  درصد رطوبت حجمی خاک در ابتدای نمونه‌برداری می‌باشد. در شکل (۲)، تصویر لایسیمتر آمده است.

مقدار تبخیر و تعرق با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار، از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌گردد.

$$ET = I + P - D - D_{rz} \times (\theta_f - \theta_i) \quad (1)$$

که در آن  $ET$  تبخیر و تعرق،  $I$  مقدار آب آبیاری برحسب میلی‌متر،  $P$  مقدار بارندگی برحسب میلی‌متر،  $D$  مقدار آب زهکش

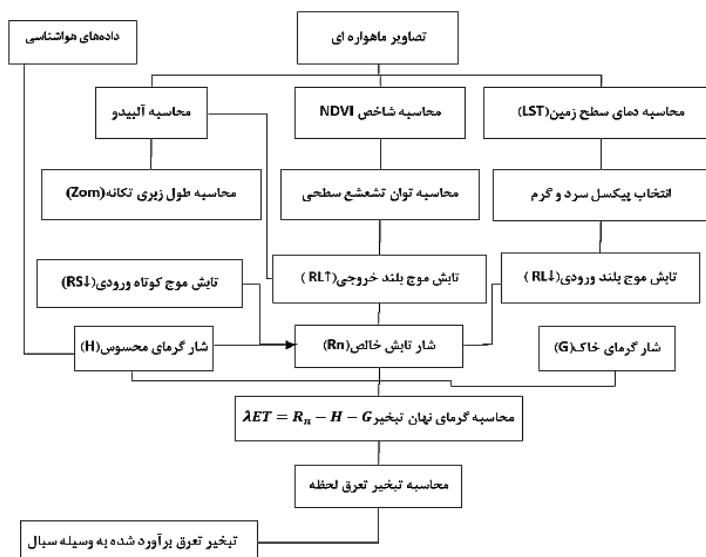
### الگوریتم سبال

الگوریتم سبال یک مدل تک منبعی است که در سال ۱۹۹۸ توسط باستیان سن توسعه داده شد. این مدل تبخیر و تعرق گیاه را، براساس توازن لحظه‌ای انرژی در سطح هر پیکسل از یک تصویر ماهواره‌ای محاسبه می‌نماید که به عنوان یک روش قابل اطمینان برای تخمین تبخیر و تعرق در سطح مزرعه و منطقه به کار برده می‌شود. اساس مدل سبال بیان انرژی می‌باشد، تابش خالصی که از جو به زمین می‌رسد شامل سه قسمت می‌باشد. بخشی باعث گرم شدن هوای بالای سطح زمین، بخشی صرف گرم شدن خاک و بقیه

باعث تبخیر و تعرق می‌شود. بیان انرژی را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۲) بیان کرد.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2)$$

که در آن  $\lambda ET$  شار گرمای نهان تبخیر،  $R_n$  میزان تابش خالص خورشیدی،  $G$  شار گرمای خاک و  $H$  شار گرمای هوا می‌باشد. که تمامی عوامل برحسب وات بر مترمربع می‌باشد. در شکل (۳)، فلوجارت برآورد تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم سبال آمده است. در ادامه عوامل الگوریتم سبال معرفی می‌شوند.



شکل ۳- فلوجارت برآورد تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم سبال (صادق زاده پوده و همکاران، ۱۳۹۴)

که بین مقدار  $\frac{G}{R_n}$  و عاملی چون NDVI و دمای سطحی و آلبدو رابطه وجود دارد. در این پژوهش از رابطه‌ی تجربی (۴)، که توسط باستیان سن توسعه یافته، برای برآورد مقدار شار گرمای خاک استفاده شده است که در ادامه ارائه می‌گردد (Bastiaanssen, 2000).

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

شاخص گیاهی NDVI، نمادی از میزان و وضعیت پوشش گیاهی می‌باشد. از این شاخص در برآورد بازتابش پوشش سطح زمین، شاخص سطح برگ، سطح زیر کشت و شدت رشد توده زنده گیاهی استفاده می‌گردد (Bastiaanssen & Chandrapala, 2003).

#### شار گرمای محسوس (H)

مقدار شار گرمای محسوس از سرعت باد و دمای سطحی زمین با بکارگیری یک کالیبراسیون درونی منحصر به فرد متشکل از اختلاف دمای سطح زمین و دمای هوای مجاور (dT) حاصل می‌شود. این فرمول توسط باستیان سن و همکاران، توسعه داده شده که از

#### شار تابش خالص (Rn)

مقدار تابش خالص از توازن چهار شار تابشی در سطح زمین به دست می‌آید که عبارت است از تابش طول موج کوتاه ورودی  $R_{S\downarrow}$ ، که بخشی از این انرژی تابشی توسط سطوح مختلف منعکس می‌شود  $R_{S\uparrow}$ ، تابش طول موج بلند ورودی از جو  $R_{L\downarrow}$  و تابش طول موج بلند گسیل شده از سطح  $R_{L\uparrow}$ . تابش خالص لحظه‌ای در واحد سطح  $R_n$ ، از رابطه‌ی (۳)، به دست می‌آید.

$$R_n = (1 - \alpha) R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (3)$$

که در آن  $R_{S\downarrow}$  تابش طول موج کوتاه ورودی،  $R_{L\downarrow}$  تابش طول موج بلند ورودی و  $R_{L\uparrow}$  تابش طول موج بلند خروجی، هر سه عامل برحسب وات بر مترمربع،  $\alpha$  آلبدوی سطحی (بدون بعد) و  $\epsilon_0$  گسیلمندی سطحی (بدون بعد) می‌باشد.

#### شار گرمای خاک (G)

اندازه‌گیری شار گرمای خاک به طور مستقیم با استفاده از تکنیک سنجش از دور امکان پذیر نیست، اما مطالعات بسیاری نشان داده‌اند

میلی متر از رابطه (۸) به دست می آید.

$$ET_{ins} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (8)$$

که در آن  $\lambda ET$  شار گرمای نهان (وات بر مترمربع) و  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر (ژول بر کیلوگرم) است.

### اعتبارسنجی مدل سیال

برای اعتبارسنجی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل سیال نیاز به مقادیر قابل اطمینان برای مقایسه می باشد. پس از محاسبه تبخیر و تعرق واقعی نیشکر با روش مبتنی بر سنجش از دور سیال، در دو حالت استفاده از تصاویر لندست ۸ و استفاده از تصاویر تلفیق شده لندست ۸ و سنتینل ۲، برای ارزیابی نتایج حاصل از مدل، از روش لایسیمتری، استفاده گردید. برای مقایسه نتایج حاصل نسبت به روش استاندارد لایسیمتری از معیارهای ارزیابی استفاده شد. در این پژوهش از داده های تبخیر و تعرق، لایسیمتر حجمی زهکش دار که در کشت و صنعت امیرکبیر در ۴۰ کیلومتری جنوب اهواز واقع شده است، استفاده شده است. برای ارزیابی از چهار معیار  $R^2$  (ضریب تعیین) (Dai et al, 2009)، RMSE (جذر میانگین مربعات خطا) (Sentelhas et al, 2010)، MBE (میانگین خطای اریب) (Sentelhas et al, 2010) و MAE (میانگین خطای مطلق) (Trajkovic and Kolakovic, 2009) استفاده گردید. معادله این معیارها در رابطه های (۹) تا (۱۲) آمده است.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=0}^n (ET_{Ei} - \overline{ET_E}) \cdot (ET_{Ri} - \overline{ET_R})]^2}{\sum_{i=0}^n (ET_{Ei} - \overline{ET_E})^2 \cdot \sum_{i=0}^n (ET_{Ri} - \overline{ET_R})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (ET_{Ei} - ET_{Ri})^2}{n}} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (ET_{Ei} - ET_{Ri}) \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |ET_{Ei} - ET_{Ri}| \quad (12)$$

در روابط فوق،  $ET_R$ ، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل به روش لایسیمتری و  $ET_E$  مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده از مدل سیال می باشد.

### نتایج و بحث

مقدار آلبیدو برای تصاویر لندست ۸، بین ۰/۲۴ تا ۰/۳۱، و برای تصاویر تلفیق شده ۰/۱۹ تا ۰/۲۸، می باشد. مقادیر حاصل از تصاویر تلفیق شده با مقادیر حاصل از تصاویر لندست ۸ مشابه می باشد با این تفاوت که مقادیر آلبیدوی تصاویر تلفیق شده در مقایسه با مقادیر متناظر تصاویر لندست ۸، مقدار عددی کمتری را دارا می باشد. این تفاوت در مقدار آلبیدو، مربوط به اختلاف در پیکسل سایزهای دو تصویر می باشد. با افزایش تراکم پوشش گیاهی در طی فصل رشد، از

رابطه ی (۵) محاسبه می گردد (Bastiaanssen et al, 1998a).

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad (5)$$

که در آن  $\rho_{air}$  چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $C_p$  گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم بر کلوین)،  $dT$  اختلاف دما  $T_1$  و  $T_2$  بین دو ارتفاع  $Z_1$  و  $Z_2$  (کلوین)،  $r_{ah}$  مقاومت آئرو دینامیک برای انتقال گرما (ثانیه بر متر) می باشد.  $dT$  از روابط (۶) و (۷)، محاسبه می شوند.

$$dT = a \times T_s + b \quad (6)$$

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u \times k} \quad (7)$$

که در روابط فوق،  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت هستند و از رابطه ی خطی بین  $dT$  و  $T_s$  به دست می آید،  $T_s$  دمای سطحی زمین (کلوین)،  $Z_1$  و  $Z_2$  ارتفاع های فرضی پوشش گیاهی که به ترتیب ۰/۱ و ۲ متر فرض می شود،  $u$  سرعت اصطکاکی که بیان کننده ی نوسانات تلاطمی سرعت هوا (متر بر ثانیه) و  $k$  ثابت ون کارمن که برابر ۰/۴۱ می باشد (Allen et al, 2002). در شار گرمای محسوس، برای تعریف مقادیر  $a$  و  $b$ ، ابتدا دو پیکسل آستانه انتخاب می شود، یکی از پیکسل ها که پیکسل سرد نامیده می شود مربوط به منطقه ای است که به طور کامل پوشیده از پوشش گیاهان آبیاری شده است و دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک دمای هواست و تبخیر و تعرقی معادل تبخیر و تعرق مرجع دارد. پیکسل دوم که پیکسل گرم نامیده می شود زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک می باشد. در این پژوهش از دمای سطحی و شاخص پوشش گیاهی برای تعیین پیکسل های سرد و گرم استفاده شده است. در پیکسل گرم شاخص پوشش گیاهی حداقل و دمای سطحی زمین حداکثر، و در پیکسل سرد شاخص پوشش گیاهی حداکثر و دمای سطحی زمین حداقل می باشد. برای برآورد  $dT$  از یک فرآیند تکراری استفاده می شود که در آن یک رابطه رگرسیونی براساس رابطه (۵) برای دمای سطح زمین  $T_s$  و  $dT$  در دو پیکسل شاخص (سرد و گرم) برآورد شده و سپس این رابطه به تمامی پیکسل های تصویر اعمال می شود (Bastiaanssen et al, 2002).

### شار گرمای نهان تبخیر و تعرق لحظه ای ( $\lambda ET$ )

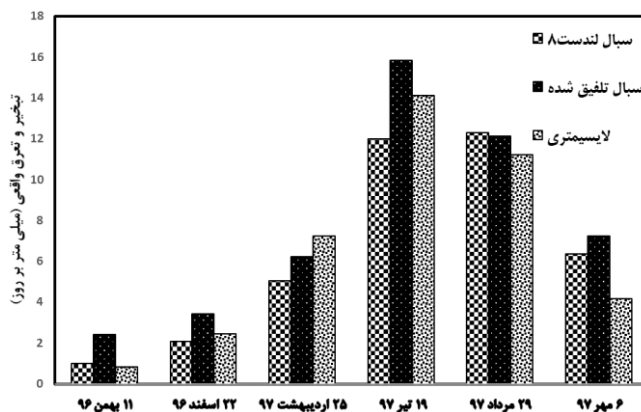
شار گرمای نهان ( $\lambda ET$ )، میزان هدررفت گرما از سطح برای فرآیند تبخیر و تعرق می باشد که با استفاده از رابطه بیان انرژی به دست می آید. مقادیر شار تابش خالص خورشیدی ( $R_n$ )، شار گرمای خاک ( $G$ ) و شار گرمای محسوس ( $H$ ) که تاکنون به دست آمده مقادیر لحظه ای و برای زمان گذر ماهواره می باشند. برای محاسبه ی مقدار تبخیر و تعرق لحظه ای، مقدار شار گرمای نهان ( $\lambda ET$ )، بر مقدار عددی گرمای نهان تبخیر ( $\lambda$ ) باید تقسیم شود. مقدار تبخیر و تعرق واقعی در لحظه گذر ماهواره تبخیر و تعرق لحظه ای برحسب

عبارتی با تنش کمتری مواجه باشند و همچنین تراکم بیشتری داشته باشند مقدار (NDVI) بیشتر می‌شود. مقدار شاخص (NDVI) در اراضی بایر کمتر از ۰/۲ بوده و در اراضی مخلوطی از بایر و پوشش گیاهی بین ۰/۲ تا ۰/۵ و در اراضی با پوشش گیاهی کامل و متراکم بیشتر از ۰/۵ می‌باشد (Julien et al, 2006). مقادیر شاخص پوشش گیاهی برای تصاویر لندست ۸، ۰/۱۷ تا ۰/۴۱ و برای تصاویر تلفیق شده ۰/۳۴ تا ۰/۵۶ می‌باشد. این شاخص در طول فصل رشد، با تراکم پوشش گیاهی، روند افزایشی دارد. هم‌چنین به دلیل وضوح بالای تصاویر تلفیق شده و تفاوت سایز پیکسل آن‌ها نسبت به تصاویر لندست ۸، مقادیر این شاخص در تصاویر تلفیق شده بیشتر می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر لحظه‌ای تابش خالص خورشیدی، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان از بیلان انرژی محاسبه شد و در نهایت تبخیر و تعرق واقعی در لحظه‌ی تصویربرداری برای هر پیکسل با تقسیم شار گرمای نهان بر گرمای نهان تبخیر، محاسبه گردید و در ادامه این مقادیر به مقدار تبخیر و تعرق روزانه تبدیل شد. در جدول (۲)، متوسط تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم سبال برای تصاویر لندست ۸ و تلفیق شده و از روش لایسیمیتری آمده است. شکل (۴)، نمودار میله‌ای تبخیر و تعرق واقعی با روش‌های سبال (۵)، پراکنش تبخیر و تعرق واقعی منتج از الگوریتم سبال برای تصاویر لندست ۸ و تلفیق شده، در تاریخ ۲۶ اردیبهشت ۹۷، آمده است.

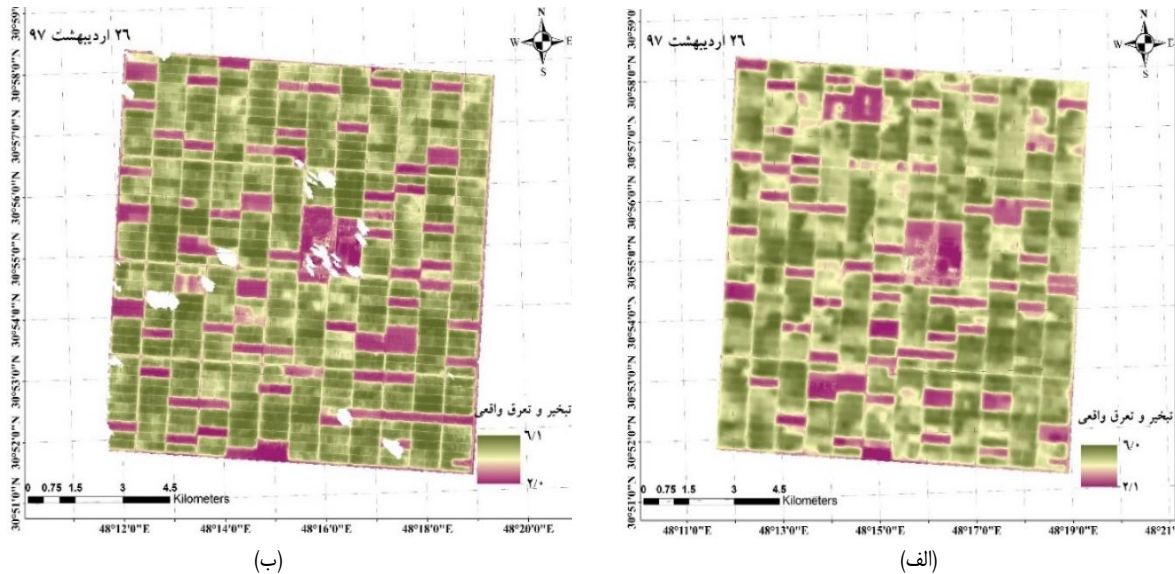
بهمن تا مهر، و رشد گیاه نیشکر، مقادیر آلبیدو کمتر شده است که این امر به سبب آن است که در اراضی زراعی وجود پوشش گیاهی متراکم، موجب جذب بیشتر طیف الکترومغناطیس در محدوده طیف مرئی شده، سبب کاهش مقادیر آلبیدو می‌گردد. برای محاسبه‌ی دمای سطحی زمین، از دو باند حرارتی OLI و TIRS ماهواره‌ی لندست ۸، استفاده گردید. با توجه به نتایج حاصل، متوسط دمای سطحی زمین از بهمن تا مهر، بین ۲۹۲ تا ۳۱۳ درجه کلوین متغیر است. در طول فصل رشد نیشکر با افزایش تراکم پوشش گیاهی، دمای سطحی زمین کاهش می‌یابد. در مناطق با پوشش گیاهی پراکنده، درجه حرارت بالا و در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، درجه حرارت پایین است. اراضی زراعی با مقدار پوشش گیاهی بالا دارای مقادیر نسبتاً کمتر آلبیدو و دما می‌باشند و شار تابش خالص در این مناطق مقدار قابل توجهی دارد. این امر نشان می‌دهد که بخش اعظم انرژی در دسترس در این مناطق صرف فرآیند تبخیر و تعرق گردیده و در نتیجه کاهش دما در این نواحی مشاهده می‌شود. یکی از رایج‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی که با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای برآورد می‌شود، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) است که ارتباط نزدیکی با درصد پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ (LAI) دارد (John et al, 1998). از نظر تئوری حدود شاخص (NDVI) بین -۱ تا +۱ است و اراضی دارای پوشش گیاهی بین ۰/۱ و ۱ است. هر قدر گیاهان در یک پیکسل سبزتر و یا به

جدول ۲- متوسط تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم سبال برای تصاویر لندست ۸ و تلفیق شده (میلی متر بر روز)

ردیف	روز ژولیبوسی	تاریخ شمسی	تصاویر لندست ۸	تلفیق تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲	لایسیمیتری
۱	۳۱	۱۳۹۶/۱۱/۱۱	۱/۰۰	۲/۴۰	۰/۸۲
۲	۷۲	۱۳۹۶/۱۲/۲۲	۲/۰۹	۳/۴۴	۲/۴۲
۳	۱۳۶	۱۳۹۷/۰۲/۲۶	۵/۰۴	۶/۲۴	۷/۲۴
۴	۱۹۱	۱۳۹۷/۰۴/۱۹	۱۲/۰۰	۱۵/۸۵	۱۴/۱۳
۵	۲۳۲	۱۳۹۷/۰۵/۲۹	۱۲/۲۸	۱۲/۱۱	۱۱/۲۳
۶	۲۷۱	۱۳۹۷/۰۷/۰۶	۶/۳۶	۷/۲۵	۴/۱۷



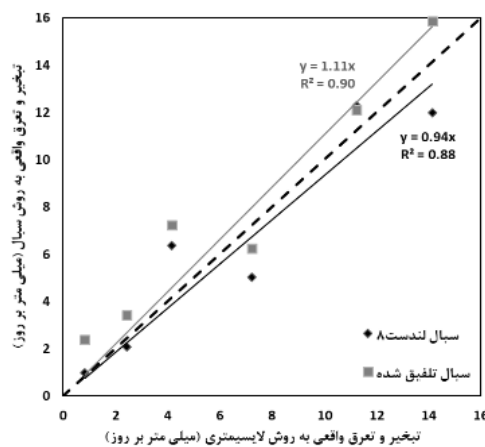
شکل ۴- نمودار میله‌ای تبخیر و تعرق واقعی با روش‌های سبال لندست ۸ و تلفیق شده و لایسیمیتری (میلی متر بر روز)



شکل ۵- پراکنش تبخیر و تعرق واقعی برای تصاویر لندست ۸ (الف) و تصاویر تلفیق شده (ب) در تاریخ ۲۶ اردیبهشت (میلی متر بر روز)

اوایل اردیبهشت ماه عملاً رشد مؤثر گیاه نیشکر در شرایط آب و هوایی خوزستان آغاز می‌گردد. بیشترین رشد هفتگی نیشکر در ماه‌های تیر و مرداد رخ می‌دهد. برداشت نیشکر از نیمه دوم مهرماه با درو و حمل واریته‌های زودرس شروع شده و در شرایط معمول تا اواخر فروردین سال بعد ادامه می‌یابد (پورآذر و همکاران، ۱۳۹۰). در طول فصل رشد نیشکر با افزایش تراکم پوشش گیاهی، مقدار تبخیر و تعرق افزایش یافته تا به بالاترین مقدار خود در ماه‌های تیر و مرداد می‌رسد. در تصاویر تلفیق شده مقدار برآورد شده تبخیر و تعرق عموماً بیشتر می‌باشد که این امر به دلیل افزایش وضوح تصاویر است. در شکل (۶)، رابطه‌ی رگرسیون برقرار شده و ضریب همبستگی بین مدل سبال و روش لایسمتری و در جدول (۳)، شاخص‌های آماری حاصل از مقایسه‌ی مدل سنجش از دور نسبت به لایسمتر، ارائه می‌گردد.

همان‌طور که از نتایج حاصل ملاحظه می‌گردد تبخیر و تعرق نیشکر، در طول فصل رشد، با افزایش تراکم گیاهی، روند افزایشی داشته است و در ماه مهر، با آغاز برداشت گیاه، مقدار تبخیر و تعرق کاهش یافته است. کمترین مقدار تبخیر و تعرق گیاه نیشکر در روز ۱۱ بهمن، و بیشترین مقدار در روز ۱۹ تیر و ۲۹ مرداد می‌باشد. گرمای هوا و رطوبت کافی در خاک منجر به جوانه‌زنی مناسب قلمه‌های نیشکر در اواخر مردادماه در شرایط خوزستان می‌گردد. پس از کشت و تا اوایل آبان‌ماه هنگامی که درجه حرارت رو به کاهش می‌رود فقط بخش کمی از رشد نیشکر در مزارع کشت جدید انجام می‌پذیرد. از این زمان تا اسفندماه تقریباً ماده خشک جدیدی تولید نشده و رشد متوقف می‌باشد، در نتیجه در این مدت دارای کمترین میزان تبخیر و تعرق می‌باشد که در روز ۱۱ بهمن کمترین مقدار تبخیر و تعرق، حاصل شده است. درجه حرارت هوا در نیمه دوم اسفندماه افزایش یافته و فعالیت نیشکر مجدداً شروع شده تا اینکه در



شکل ۶- رگرسیون برقرار شده و ضریب همبستگی بین مدل سبال و روش لایسمتری



جدول ۳- شاخص‌های آماری از مقایسه مدل سنجش از دور سبال نسبت به روش لایسمتری

مدل سنجش از دور	R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	MAE (mm/day)	خطای مطلق (mm/day)	درصد خطای نسبی (%)
سبال یا تصاویر لندست ۸	۰/۸۸	۱/۶۰	-۰/۲۱	۱/۳۵	-۰/۲۱	۳
سبال یا تصاویر تلفیق شده	۰/۹۰	۱/۶۲	۱/۲۱	۱/۴۰	-۱/۰۱	-۱۶

بینی میزان عملکرد محصول ضروری است. اهمیت تخمین دقیق این عامل سبب انجام این پژوهش گردید. در این پژوهش با تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲، و با استفاده از مدل توازن انرژی سطحی سبال، مقدار دقیق تبخیر و تعرق روزانه گیاه نیشکر، در شش تاریخ، در سال آبی (۹۶-۹۷)، برآورد گردید. نتایج حاصل نشان داد که در مجموع روند تغییرات تبخیر و تعرق، حاصل از مدل سبال، در دو حالت لندست ۸ و تلفیق شده، با مشاهدات مزرعه‌ای تطابق دارد. اعتبارسنجی مدل، با داده‌های لایسمتری، حاکی از آن بود که مدل سبال با تصاویر لندست ۸ و تصاویر تلفیق شده، در هر دو حالت، همبستگی و تطابق با روش استاندارد لایسمتری داشته و نتایجی مشابه این روش را تخمین زده است. این مقایسه‌ها حاکی از توانایی مدل سبال در برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس محلی و منطقه‌ای است. از عوامل مؤثر در دقت نتایج حاصل از مدل در حالت تلفیق شده، روش تلفیق تصاویر می‌باشد، پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ با روش‌های دیگر تلفیق تصاویر ماهواره‌ای و یا ریزمقیاس سازی و بزرگ مقیاس سازی، برای بهبود عملکرد مدل، استفاده گردد.

### منابع

- پورآذر، ر.، صیاد منصور، ع.، احمدپور، ر.، طاهرخانی، ک. و زند، الف. ۱۳۹۰. روند تحقیقات انجام شده روی علف‌های هرز و علف‌کش‌ها طی ۲۰ سال گذشته در کشت نیشکر در استان خوزستان، مشکلات و راهکارها. چهارمین همایش علوم علف‌های هرز ایران. ۱۹-۱۷ بهمن ماه ۱۳۹۰.
- دلگرم، س.، رحیم‌پور، م.، بختیاری، ب. و سیاری، ن. ۱۳۹۴. مقایسه‌ی تبخیر و تعرق واقعی حاصل از داده‌های لایسمتری و الگوریتم سبال در دشت کرمان، با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی مودیس. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۲: ۳۷۳-۳۸۳.
- صادق زاده پوده، ر.، زارع، م.، مختاری، م. ح. و قالیباف، م. الف. ۱۳۹۴. بررسی قابلیت مدل توازن انرژی سطح (سبال) و متغیرهای بیوفیزیک حاصل از داده‌های ماهواره‌ای در تخمین رطوبت خاک در مناطق خشک. مدیریت بیابان. ۳: ۱۰۷-۹۰.
- فاطمی، س.ب.، رضایی، ی. ۱۳۹۳. "مبانی سنجش از دور". نشر آزاده. چاپ چهارم. ویرایش دوم.

به‌طور کلی با ارزیابی مدل مذکور با شاخص‌های فوق، در دو حالت استفاده از تصاویر لندست ۸ و استفاده از تصاویر تلفیق شده، ملاحظه می‌گردد که نتایج حاصل در دو حالت مشابه بوده و تفاوت‌ها بسیار اندک می‌باشد و این مدل در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دو حالت موفق ارزیابی می‌گردد. این موضوع با نتایج گوشه‌گیر و همکاران (۱۳۹۷)، دلگرم و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. دلیل اینکه در بیشتر شاخص‌ها تلفیق نتایج نامناسب‌تری داشته است، می‌تواند به دلیل روش تلفیق استفاده شده در این پژوهش باشد. در انتخاب روش تلفیق بهتر است روش‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به جدول، کمترین میزان خطای برآورد را روش سبال با استفاده از تصاویر لندست ۸ دارد. در مقایسه مقادیر حاصل از تصاویر تلفیق شده و تصاویر لندست ۸، تصاویر تلفیق شده در مجموع نتایج نسبتاً مناسبی را تخمین زدند و همبستگی مناسبی (بیش از ۰/۷۰) با روش استاندارد دارند که این امر با نتایج شارما و همکاران (۲۰۱۸)، کاپلو (۲۰۱۷)، واگل و همکاران (۲۰۱۷)، نیوکی (۲۰۱۶) و سینگ و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد. روش‌های تلفیق تصاویر ماهواره‌ای همواره سبب بهبود کیفیت تصویر و افزایش مقدار جزئیات در تصویر ادغام شده خواهند شد. تلفیق تصاویر دارای کاربردهای زیادی از جمله بهبود طبقه بندی، تشخیص عوارض، ارزیابی تغییرات و جایگذاری اطلاعات از دست رفته در یک تصویر با استفاده از تصویر سنجنده دیگر است. روش‌های مختلفی جهت تلفیق تصاویر ارائه شده است لذا جهت تلفیق تصاویر باید از روشی استفاده کرد که دارای دقت قابل قبولی باشد و بتواند علاوه بر بهبود دقت مکانی، محتوای طیفی تصویر چند طیفی را به خوبی حفظ کند (کابلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). تلفیق تصاویر ماهواره‌ی به منظور استفاده هم‌زمان از اطلاعات طیفی و مکانی تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌گردد، اما روش‌های ادغام تصاویر معمولاً با اعوجاجات طیفی و مکانی در تصویر خروجی همراه بوده که میزان این انحرافات با توجه به روش و نیز داده‌های مورد استفاده متغیر است (کابلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین در انتخاب روش مناسب برای تلفیق باید دقت لازم را اعمال نمود.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

برآورد تبخیر و تعرق در مواردی از قبیل برنامه‌ریزی آبیاری، توازن هیدرولوژیکی، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری و پیش

- agricultural and environmental water use. *Journal Agriculture Water Management*. 58.2: 171-192.
- Dai, X. Shi, H. Li, Y. Ouyang, Z. and Huo, Z. 2009. Artificial neural network models for estimating regional reference evapotranspiration based on climate factors. *Hydrological Processes* 23: 442-450.
- Enku, T. 2009. Estimation of evapotranspiration from satellite remote sensing and meteorological data over the Fogera flood plain-Ethiopia. ITC: Netherlands.
- ESA. 2016. Sentinel-2: Operations. [Online]. Available: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Operations/Sentinel-2\\_operations/\(print\)](http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Sentinel-2_operations/(print)).
- Jaber, H.S., Mansor, S., Pradhan, B. and Ahmad, N. 2016. Evaluation of SEBAL model for Evapotranspiration mapping in Iraq using remote sensing and GIS. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 11, pp.3950-3955.
- John, G., D. Yuan, R.S. Lunetta. And C.D. Elvidge. 1998. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 62: 143-150.
- Julien, Y., Sobrino, J.A. and W. Verhoef. 2006. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999. *Remote Sens. Environ.* 103.1: 43-55.
- Kyalo, D.K. 2017. Sentinel-2 and MODIS land surface temperature-based evapotranspiration for irrigation efficiency calculations.
- Lau, W. and King, B. A. Li, Z. 2000. The influences of image classification by fusion of spatially oriented images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 33. Part B7: 752-759.
- Li, Y., Huang, C., Hou, J., GU, J., Zhu, G. and Li, X. 2017. Mapping daily evapotranspiration based on spatiotemporal fusion of ASTER and MODIS images over irrigated agricultural areas in the Heihe River Basin, Northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244, pp.82-97.
- Laben, C.A. and Brower, B.V. 2000. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening, U.S. Patent 6011875 A.
- Njuki, S.M. 2016. Assessment of Irrigation Performance by Remote Sensing in the Naivasha Basin, Kenya. ITC MSc Thesis. University of Twente.
- Pohl, C. and Genderen, J. L. 1998. Multi sensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*. 19.5: 823-854.
- Roerink, G., Su, Z. and Menenti, M. 2000. S-SEBI: A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. *Journal Physics and*
- قمرنیا، ه. و رضوانی، س، و. ۱۳۹۳. محاسبه و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) در غرب ایران (دشت میان دربند). *مجله آب و خاک*. ۱، ۲۸: ۷۲-۸۱.
- کابلی‌زاده، م، رنگزن، ک. و محمدی، ش. ۱۳۹۷. کاربرد تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ در پایش محیط. *مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. ۳، ۹: ۵۳-۷۱.
- گوشه‌گیر، الف، س، گلایی، م. و ناصری، ع، ع. ۱۳۹۷. مقایسه تبخیر تعرق واقعی حاصل از داده‌های سنجش از دور با بهره‌گیری از روش گرام اشمیت و الگوریتم سبال با داده‌های لایسیمیتری (مطالعه موردی: شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر). *مجله تحقیقات منابع آب ایران*. ۱، ۱۴: ۱۲۵-۱۳۹.
- گوشه‌گیر، الف. ۱۳۹۶. مقایسه تبخیر تعرق واقعی گیاه نیشکر حاصل از سنجش از دور با داده‌های لایسیمیتری در استان خوزستان (مطالعه موردی: شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید چمران اهواز. دانشکده مهندسی علوم آب.
- وروانی، ه، فرهادی، ب، شریفی، م، ع. ۱۳۹۸. تلفیق تصاویر ماهواره Landsat 8 و سنجنده‌ی MODIS جهت برآورد نیاز آبی ذرت علوفه‌ای در دوره رشد (منطقه مورد مطالعه: ماهیدشت کرمانشاه). *تحقیقات منابع آب ایران*. ۱، ۱۵: ۲۵۷-۲۶۶.
- Allen, R. G., Morse, A., Tasumi, M., Trezza, R., Bastiaanssen, W., Wright, J. L. and Kramber, W. 2002. Evapotranspiration from a satellite-based surface energy balance for the Snake Plain Aquifer in Idaho. In Proc. USCID Conference. USCID.
- Allen, R.G., Tasumi, M and Trezza, R. 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133: 380-394.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M., 1998a. A remotesensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J.Hydrol.* 212-213, 198-212.
- Bastiaanssen, W. G. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of hydrology*, 229(1-2): 87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M. and Ali, S. 2002. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 94: 321-340.
- Bastiaanssen, W.G.M. and Chandrapala, L. 2003. Water balance variability across Sri Lanka for assessing

- evapotranspiration in the Midwestern United States. *Water*. 8:1:9.
- Su, Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent Heat Fluxes. *Journal Hydrology and Earth System Sciences*. 6: 85-100.
- Wang Z. Bovik A.C. Sheikh H.R. and Simoncelli E.P. 2004. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transaction on Image Processing*. 13.4: 600-612.
- Wagle, P., Bhattarai, N., Gowda, P. H. and Kakani, V. G. 2017. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 128: 192-203
- Trajkovic, S. and Kolakovic, S. 2009. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management* 23:3057-3067.
- Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. 25: 147-157.
- Senay, G.B., Budde, M., Verdin, J.P. and Melesse, A.M. 2007. A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields. *Sensors*.7: 979-100.
- Sentelhas, P. Gillespie, T and Santos, EA. 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in southern Ontario Canada. *Agricultural Water Management* 97: 635-644.
- Sharma, D. N. and Tare, V. 2018. Evapotranspiration estimation using SSEBop method with Sentinel-2 and Landsat-8 data set. *International Archives of the Photogrammetry, Journal Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 42: 5.
- Singh, R.K. and Senay, G.B. 2015. Comparison of four different energy balance models for estimating

## Estimation of Actual Evapotranspiration using SEBAL Surface Energy Balance Algorithm and Fusion of Landsat8 and Sentinel2 Satellite Images (Case Study: Mirza Kouchak khan Agroindustrial Company)

S. Sahragard<sup>1\*</sup>, A. Naseri<sup>2</sup>, M. Albaji<sup>3</sup>, M. Kabolizadeh<sup>4</sup>

Received: Oct.09, 2019

Accepted: Nov.14, 2019

### Abstract

Evapotranspiration is one of the most important factors in the hydrology cycle and is one of the determinants of energy equations at ground level and water balance. Most of the ground-based methods use point measurements to estimate evapotranspiration. Remote sensing has the ability to estimate the amount of evapotranspiration and examine its spatial distribution. In this study, Landsat8 and Sentinel2 satellite images combined to estimate the actual daily evapotranspiration of sugarcane in the Mirza Kouchak khan Agro industrial Company, Khuzestan province, using the SEBAL model at six dates. Validation of SEBAL model performance was performed in two modes: using integrated images and using Landsat 8 images with lysimeter data. The results indicated that the SEBAL model with Landsat 8 satellite images with ( $R^2=0.88$ ), and the SEBAL model with Landsat 8 and Sentinel 2 satellite images with ( $R^2=0.90$ ). Overall, it was well correlated with the lysimeter method and estimated similar and appropriate results.

**Keywords:** Evapotranspiration, Lysimeter, Remote sensing, Sentinel2, Sugarcane

### Notation

1. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)
2. Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI)
3. Surface Energy Balance System (SEBS)
4. Mapping Evapotranspiration at high spatial Resolution with Internalized Calibration (METRIC)
5. Simplified Surface Energy Balance (SSEB)

---

1- M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

2- Professor of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

3- Assistant Prof of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

4- Assis Prof of College of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz

(\*- Corresponding Author Email: setarehsahragard@gmail.com)