

## تخمین تبخیر- تعرق واقعی گیاه با استفاده از الگوریتم سبال (مطالعه موردی: منطقه خرم‌دره در استان زنجان)

مسعود کرباسی<sup>\*</sup>، مریم مقدم<sup>۲</sup>، جعفر نیکبخت<sup>۳</sup> و عباس کاویانی<sup>۴</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان

۲. کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه زنجان

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان

۴. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمينی<sup>(ره)</sup> قزوین

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۴/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۸/۳۰)

### چکیده

برآورد دقیق تبخیر- تعرق گیاه و نیز آب مورد نیاز گیاهان اهمیت زیادی در بهبود مدیریت مصرف آب و در نهایت افزایش راندمان آب مصرفی دارد. در همین زمینه، به روش‌هایی نیاز است که قادر به محاسبه نیاز آبی گیاهان در مقیاس وسیع و نیز دقت کافی داشته باشند. مطالعه حاضر به بررسی تخمین تبخیر- تعرق واقعی منطقه‌ای برای مزارع یونجه و ذرت شهرستان خرم‌دره با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و داده‌های هواشناسی می‌پردازد. الگوریتم بیلان انرژی سطح برای زمین (سبال) به کمک تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 برای تعیین نیاز آبی گیاهان ذرت و یونجه در دوره رشد این دو گیاه استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج مدل PM-FAO 56 صحت‌سنجی و مقایسه شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد نتایج دو مدل مطابقت نسبتاً خوبی با هم دارند. مقدار میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) در برآورد تبخیر- تعرق واقعی برای گیاهان ذرت و یونجه به ترتیب ۰/۹۲ و ۱/۲۵ میلی‌متر بر روز به‌دست آمد. مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) نیز به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۸۳ به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد مدل الگوریتم بیلان انرژی سطح برای زمین (سبال) در مقایسه با مدل PM-FAO 56 مقدار تبخیر- تعرق را برای گیاه یونجه بیشتر و برای گیاه ذرت کمتر برآورد می‌کند.

**کلیدواژگان:** پنمن-مانیت، تبخیر- تعرق، سنجنش از دور، نیاز آبی گیاهان، SEBAL.

## مقدمه

برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع به‌طور گسترده‌ای در محاسبه نیاز آبی گیاهان، تعیین ظرفیت شبکه‌های آبیاری و زهکشی و طراحی سیستم‌های آبیاری استفاده می‌شود. سنجش از دور گزینه‌ای مناسب برای کمک به تخمین مدل پوشش منطقه‌ای یا جهانی شارهای رطوبتی و گرمایی سطح زمین است. سنجش از دور می‌تواند مقدار ET را تخمین بزند و حتی توزیع مکانی آن را بررسی کند، زیرا تنها روشی است که می‌تواند پارامترهایی نظیر دمای سطحی، ضریب آلبیدو و شاخص پوشش گیاهی را به‌صورت منطبق یا سازگار با محیط فراهم کند و همچنین از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد [۱].

## پیشینه تحقیق

باستینسن و همکارانش الگوریتم توازن انرژی برای سطح زمین (SEBAL) <sup>۱</sup> را توسعه دادند که یکی از نمونه الگوریتم‌هایی است که به‌طور گسترده به‌کار گرفته شده است [۲ و ۳]. این مدل در تعدادی از پروژه‌ها و مطالعات به‌کار رفته و با آزمایش‌های میدانی زیادی در اسپانیا، ایتالیا، ترکیه، پاکستان، سری‌لانکا، نیجریه و چین صحت‌سنجی شده و ثابت شده است که نتایج خوب و قابل‌اجرایی دارد [۴ و ۵]. تا کنون مطالعات متعددی برای بررسی کارایی مدل سبال در برآورد تبخیر- تعرق واقعی در مناطق مختلف دنیا انجام شده که به نتایج مختلف و گاه متناقضی منجر شده است. اصغرزاده و ثنایی‌نژاد طی پژوهشی در حوضه آبریز تنگ‌کنش کرمانشاه، به تخمین تبخیر- تعرق واقعی گیاه پرداختند و در استفاده از معادله توازن انرژی تصاویر LANDSAT را به‌کار بردند. در این پژوهش همچنین تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از فرمول هارگریوز محاسبه و ضریب گیاهی (kc) برای هر پیکسل تعیین شد. نتایج این پژوهش نشان داد بین دو مدل معادله توازن انرژی (تصاویر ماهواره‌ای) و معادله هارگریوز (استفاده از ضریب‌های گیاهی مناسب) در برآورد تبخیر- تعرق همبستگی زیادی ( $R^2=0.99$ ) وجود دارد [۱]. پورمحمدی و همکارانش میزان تبخیر- تعرق واقعی گیاهان را تحت تنش‌های محیطی در دشت آزادگان واقع در استان خوزستان با استفاده از سبال برآورد کردند. نتایج تبخیر-

تعرق به‌دست‌آمده در این پژوهش برای هریک از سایت‌های موجود در منطقه (گیاه گندم، گیاهان مرتعی و نیزارها) به‌صورت جداگانه ارائه شد. تبخیر- تعرق به‌دست‌آمده از سبال با تبخیر- تعرق مرجع محاسبه‌شده از معادله پنمن-مانتیث همبستگی حدود ( $R^2=0.85$ ) و مقدار خطای میانگین تفاضل مطلق  $0.52$  میلی‌متر بر روز را نشان داد [۶]. محسنی ساروی و همکارانش تحقیقی را با هدف کاربرد سبال در تخمین تبخیر- تعرق واقعی منطقه کوهستانی حوضه آبریز طالقان انجام دادند که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS طی ۲۲ روز در سال ۲۰۰۶ در مدل سبال تعیین شد. مقادیر به‌دست‌آمده با مقادیر اندازه‌گیری‌شده تبخیر- تعرق توسط لایسیمتر ایستگاه آموزشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران در حوضه طالقان بررسی شد که نتایج نشان داد مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری‌شده همبستگی زیادی ( $0.888$ ) دارند. نکته مهم در تحقیق ایشان این است که با توجه به اینکه مدل سبال برای مناطق مسطح طراحی شده است، از آن در منطقه‌ای مانند حوضه آبریز طالقان که شیب و جهت زیادی دارد و توپوگرافی به‌وجود می‌آورد، استفاده شده است. بنابراین، مقادیر برآوردی در مناطق کوهستانی با موارد فرض‌شده در مدل سبال خطای زیادی دارد. برتری کاربرد مدل سبال در این مطالعه نسبت به سایر مطالعات تصحیحات شیب، جهت و ارتفاع در مدل سبال است [۷]. اکبری و همکارانش برای تعیین نیاز آبی مصرفی گیاهان و جلوگیری از هدررفت آن در دوره‌های پربارش، کم‌بارش و متوسط پژوهشی انجام دادند و ضمن ارزیابی مدل سبال، تبخیر- تعرق پتانسیل و واقعی شبکه آبیاری آبشار اصفهان را با استفاده از تصاویر NOAA AVHRR محاسبه کردند. مقایسه نتایج تبخیر- تعرق به‌دست‌آمده از مدل سنجش از دور با دو مدل برآورد تبخیر- تعرق (هارگریوز و پنمن-مانتیث) نشان داد نتایج به‌دست‌آمده از مدل سنجش از دور با ریشه میانگین مربعات خطاها  $0.67$  میلی‌متر در روز، میانگین خطای مطلق  $0.4$  و انحراف معیار  $0.26$  میلی‌متر در روز مطابقت خوبی با برآوردهای به‌دست‌آمده از روش‌های محاسباتی دارد [۸]. کریمی و همکارانش در تحقیقی در دشت ماهی‌دشت کرمانشاه، با استفاده از تصاویر Landsat 5 مقدار تبخیر- تعرق واقعی گیاه ذرت را محاسبه و با داده‌های لایسیمتری مقایسه کردند. در تحقیق ایشان بیشترین درصد خطا بین

1. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

با توجه به اهمیت دشت خرمدره و ابهر در کشاورزی استان زنجان و وجود مزارع و باغ‌های متعدد در دشت یادشده و همچنین وجود ایستگاه هواشناسی همدیدی در شهر خرمدره، منطقه یادشده برای مطالعه و بررسی مدل سبال انتخاب شد. هدف تحقیق حاضر برآورد تبخیر- تعرق واقعی دو گیاه ذرت و یونجه با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر Landsat 8 در منطقه خرمدره واقع در استان زنجان و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج معادله پنمن-مانتیت فائو ۵۶ و اعمال ضرایب گیاهی است.

### مواد و روش‌ها

#### ویژگی‌های منطقه مطالعه شده

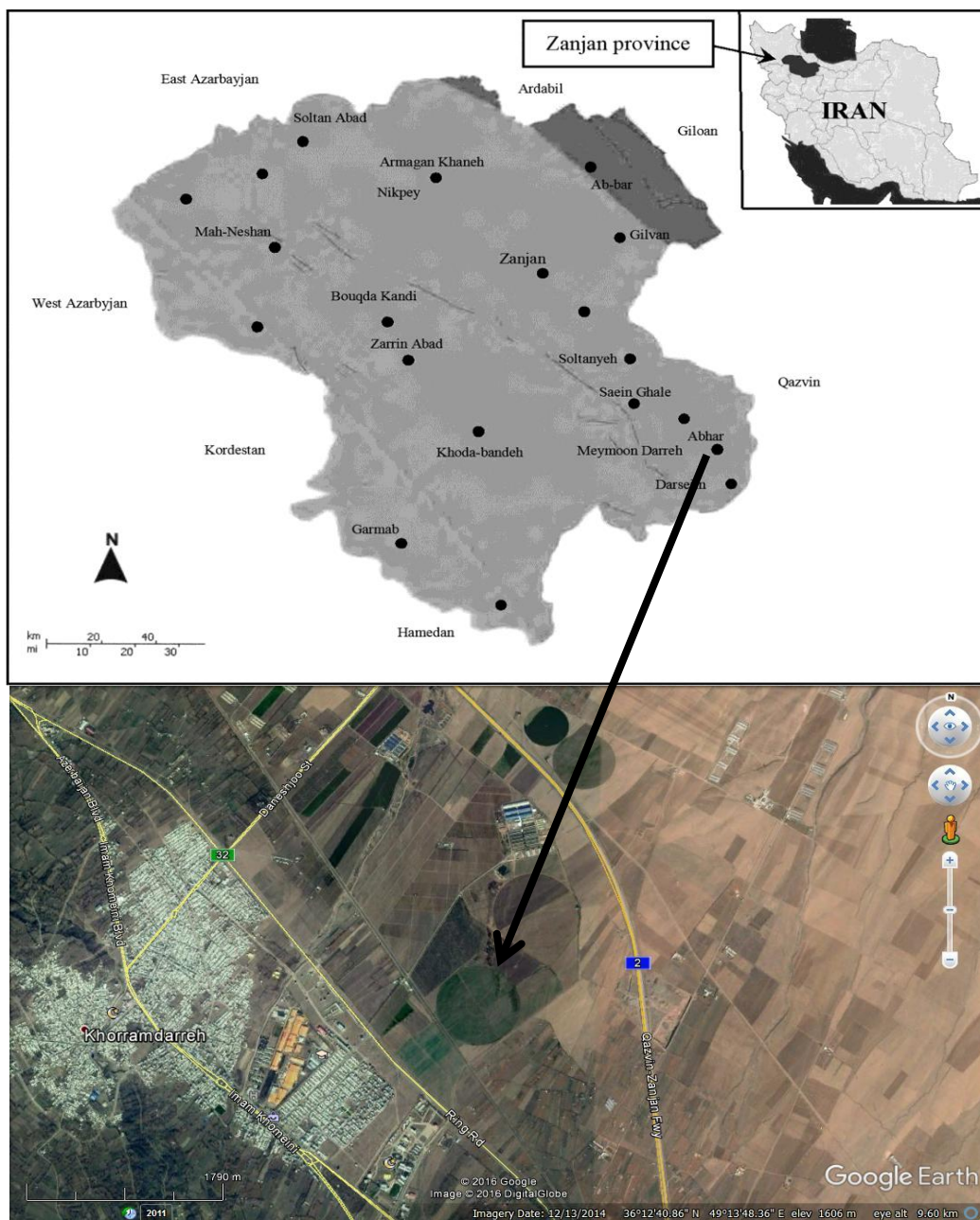
شهرستان خرمدره در طول‌های جغرافیایی ۲۵ دقیقه و ۴۹ درجه شرقی تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۵ دقیقه و ۳۶ درجه شمالی تا ۱۰ دقیقه و ۳۶ درجه شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۷۵ متر، متوسط بارندگی سالانه ۲۹۵ میلی‌متر، متوسط دمای سالیانه ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد است. این شهر روی دشت زنجان- ابهر در میان دو رشته‌کوه موازی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک شهرستان خرمدره به منظور برآورد تبخیر- تعرق ساعتی و روزانه استفاده شده است. به منظور بررسی عملکرد مدل‌های مطالعه شده دو مزرعه سنترپیووت مستقر در شهرستان خرمدره در نظر گرفته شدند که در آنها ذرت و یونجه کشت می‌شوند و تاریخ کشت و برداشت محصول در آنها مشخص است (شکل ۱). دلیل در نظر گرفتن این ایستگاه برای مطالعه، وجود باغ‌ها و مزارع متعدد در این شهرستان است.

#### داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای استفاده شده

برای انجام این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ استفاده شد. مشخصات و تاریخ تصاویر استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است (۸ تصویر در شرایط آسمان صاف). از نرم‌افزارهای ENVI-4.2 و MATLAB-R2009a برای انجام پردازش‌های تصویری و اجرای الگوریتم سبال استفاده شده است. شایان یادآوری است که الگوریتم سبال برای هر تصویر بعد از انجام اصلاحات مورد نیاز اجرا شد.

تبخیر- تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال و مقادیر اندازه‌گیری شده در لایسیمتر کمتر از ۱۰ درصد به دست آمد [۹]. مرشدی و همکارانش دقت دو مدل سبال و هارگریوز سامانی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع را در مقایسه با داده‌های لایسیمتر ارزیابی کردند. نتایج ایشان نشان داد هر دو مدل برای تخمین تبخیر- تعرق واقعی در منطقه مطالعه شده مناسب‌اند [۱۰]. نصرتی و همکارانش کارایی مدل اصلاح شده سبال را در محاسبه تبخیر- تعرق در مناطق کوهستانی حوضه آبریز طالقان بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده همبستگی زیادی (۰/۸۸) دارند [۱۱]. رستمی و رائینی تبخیر- تعرق واقعی و ضریب گیاهی سیب را در دشت اهر با استفاده از تصاویر سنجنده مودیسو مدل سبال برآورد کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد اختلاف معناداری بین تبخیر- تعرق برآورد شده از مدل FAO-56 و سبال وجود ندارد و نتایج این دو مدل همبستگی زیادی (۰/۹۲) دارند [۱۲]. نظری و کاویانی با استفاده از دو مدل متریک و سبال تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن را در دشت قزوین تخمین زدند. طبق پژوهش ایشان، مدل متریک با  $R=0/96$ ،  $RMSE=0/28$  نسبت به مدل سبال در سطح معنادار ۹۰ درصد، به عنوان مدل برتر برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه دشت قزوین توصیه می‌شود [۱۳].

تا کنون مدل‌های متعددی برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع توسط داده‌های هواشناسی ارائه شده است. در بین این مدل‌ها، معادله پنمن-مانتیت فائو ۵۶، به عنوان مدلی استاندارد برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع معرفی شده است [۱۴]. نتایج پژوهش جنسن و همکارانش با بررسی ۲۰ مدل برآورد تبخیر- تعرق و مقایسه آنها با داده‌های لایسیمتری ۱۱ مکان مختلف با شرایط آب و هوایی متفاوت، معادله پنمن-مانتیت به عنوان بهترین مدل برای برآورد تبخیر- تعرق شناسایی شد، در حالی که مدل پنمن به عنوان چهارمین مدل خوب ارزیابی شد [۱۵]؛ بنابراین با توجه به نبود داده‌های لایسیمتری در منطقه مطالعه شده از معادله پنمن-مانتیت برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع استفاده شد.



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعه شده

جدول ۱. مشخصات تصاویر Landsat 8 استفاده شده در این پژوهش

تاریخ تصویربرداری (تاریخ شمسی)	زمان تصویربرداری (گرینویچ)	سطر/ستون	سطح تحت پوشش
۱۳۹۲/۰۳/۲۰	۷:۲۲ ۲۰۱۳-۰۶-۱۰	۰۳۵-۱۶۶	استان های گیلان و زنجان
۱۳۹۲/۰۴/۰۵	۷:۲۲ ۲۰۱۳-۰۶-۲۶	۰۳۵-۱۶۶	استان های گیلان و زنجان
۱۳۹۲/۰۴/۲۱	۷:۲۲ ۲۰۱۳-۰۷-۱۲	۰۳۵-۱۶۶	استان های گیلان و زنجان
۱۳۹۲/۰۵/۰۶	۷:۲۲ ۲۰۱۳-۰۷-۲۸	۰۳۵-۱۶۶	استان های گیلان و زنجان
۱۳۹۲/۰۶/۲۳	۷:۲۲ ۲۰۱۳-۰۹-۱۴	۰۳۵-۱۶۶	استان های گیلان و زنجان
۱۳۹۲/۰۷/۰۸	۷:۲۲ ۲۰۱۳-۰۹-۳۰	۰۳۵-۱۶۶	استان های گیلان و زنجان

### الگوریتم سبال

در الگوریتم سبال، تبخیر- تعرق در تصاویر ماهواره‌ای با به‌کارگیری بیلان انرژی در سطح تعیین می‌شود؛ بنابراین انرژی صرف‌شده برای فرایند تبخیر- تعرق به‌عنوان باقی‌مانده معادله شار انرژی جریان سطحی مطابق معادله ۱ محاسبه می‌شود [۲]:

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

که در آن  $\lambda ET$  شار گرمای نهان برحسب وات بر مترمربع،  $R_n$  (وات بر مترمربع) تابش خالص خورشیدی،  $G$  (وات بر مترمربع) شار گرمای خاک و  $H$  (وات بر مترمربع) شار گرمای محسوس هستند.

شار تابش خالص با استفاده از موازنه شارهای تابش خروجی و ورودی مطابق معادله ۲ محاسبه می‌شوند:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_s)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

که در آن  $\alpha$  آلبدوی سطحی،  $R_{s\downarrow}$  تابش موج کوتاه ( $W/m^2$ ) تا ۳ میکرومتر) ورودی ( $W/m^2$ )،  $R_{L\downarrow}$  تابش موج بلند تا ۱۰۰ میکرومتر) ورودی ( $W/m^2$ )،  $R_{L\uparrow}$  تابش موج بلند خروجی ( $W/m^2$ ) و  $\epsilon_s$  گسیل‌مندی سطحی عریض باند هستند. بنابراین، تابش خالص عبارت است از اختلاف بین جریان تابش ورودی و خروجی و معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به‌شمار می‌رود.

کسر ( $G/R_n$ ) برای نیمه‌روز با استفاده از معادله تجربی زیر که توسط باستیانس و همکارانش توسعه یافته است، مطابق معادله ۳ محاسبه می‌شود [۹].

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} \left( 0.038\alpha + 0.074\alpha^2 \right) \left( 1 - 0.98NDVI^4 \right) \quad (3)$$

که در آن  $T_s$  دمای سطحی ( $^{\circ}C$ )،  $\alpha$  آلبدوی سطحی و  $NDVI$  شاخص تفاضل نرمال‌شده گیاهی هستند. ارزیابی شار گرمای خاک مشکل است و باید در محاسبه آن دقت شود.

شار گرمای محسوس ( $H$ ) عبارت است از میزان هدررفت گرما به هوا به‌وسیله همرفت و هدایت مولکولی به‌علت اختلاف دما که با استفاده از معادله زیر برای انتقال گرما محاسبه می‌شود:

$$dT = b + aT_s \quad (4)$$

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

که در آن  $\rho_{air}$  چگالی هوا ( $kg/m^3$ )،  $C_p$  گرمای ویژه هوا ( $J/kg/K$ )،  $dT$  اختلاف دمای بین دو ارتفاع و  $r_{ah}$  مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما ( $s/m$ ) است.

مهم‌ترین مرحله در فرایند سبال تعیین پیکسل گرم و سرد برای محاسبه ضرایب معادله ۴ به‌عنوان شرایط مرزی در یک فرایند تکراری است که در تخمین شار گرمای محسوس با استفاده از معادله ۵ به‌کار می‌رود.

$ET_{inst}$  تبخیر- تعرق لحظه‌ای است که از معادله ۶ محاسبه می‌شود.

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (6)$$

در مدل سبال تبخیر- تعرق واقعی ۲۴ ساعته از معادله ۷ محاسبه خواهد شد.

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad (7)$$

در معادله یادشده ( $ET_{r-inst}$ )، تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره، ( $ET_{r-24}$ ) تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مقیاس روزانه ( $ET_{act-24}$ ) میزان تبخیر- تعرق واقعی روزانه محاسبه‌شده با الگوریتم سبال هستند.

### معادله پنمن-مانتیت فائو ۵۶

معادله پنمن-مانتیت فائو ۵۶ به‌عنوان نوعی مدل استاندارد برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع گیاهان به‌صورت زیر ارائه شده است [۱۴].

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + 900\gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \cdot \frac{uD}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u)] \cdot (T + 273)} \quad (8)$$

در معادله ۸  $ET_0$  تبخیر- تعرق مرجع ( $mm/day$ ) =  $T$  متوسط دمای هوا ( $^{\circ}C$ )؛  $G$  = چگالی شار حرارتی خاک ( $MJ/m^2 \cdot day$ )؛  $u$  = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری ( $m/s$ )؛  $R_n$  = تابش خالص در سطح گیاه ( $MJ/m^2 \cdot day$ )؛  $D$  = کمبود فشار بخار (برابر اختلاف فشار بخار اشباع و واقعی ( $Kpa$ )؛  $\Delta$  = شیب منحنی فشار بخار اشباع ( $Kpa/C$ )؛  $\gamma$  = ضریب ثابت سایکرومتری ( $Kpa/C$ ). برای محاسبه پارامترهای معادله پنمن-مانتیت به داده‌های هواشناسی زیر نیاز است:

۱. کمترین دما ( $T_{min}$ ) و بیشترین دما ( $T_{max}$ )؛
۲. کمترین رطوبت نسبی ( $RH_{min}$ ) و بیشترین رطوبت نسبی ( $RH_{max}$ )؛

۳. سرعت باد؛

۴. تشعشع خورشیدی.

بنابراین برای ایجاد شرایط مرزی مناسب با کمترین خطا از لحاظ حرارتی لازم است که پیکسل گرم و سرد به درستی انتخاب شوند. در جدول ۲ مشخصات پیکسل گرم و سرد و رابطه خطی dt و TS برای هر تصویر آورده شده است. در محاسبه شار گرمای محسوس سعی شده است تا حد امکان برای رسیدن به ضرایب مناسب در فرایند تکراری تخمین H در رابطه خطی dt و TS، درصد تغییرات مقاومت آیرودینامیکی کمتر از ۵ درصد در نظر گرفته شود.

بعد از اطمینان نسبی از روند نتایج به دست آمده از پارامترهای مؤثر بر میزان تبخیر-تعرق، نتایج به دست آمده برای تبخیر-تعرق با الگوریتم سبال با مقادیر به دست آمده از معادله پنمن-مانتیت مقایسه شد (با توجه به نبود لایسیمتر در محدوده مطالعه شده). با توجه به اهمیت گیاهان علوفه‌ای در محدوده مطالعه شده، مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده گیاهان ذرت و یونجه با مدل پنمن-مانتیت و الگوریتم SEBAL مقایسه شد.

در شکل‌های ۲ و ۳ توزیع زمانی تبخیر-تعرق واقعی گیاه در دوره‌های ۱۶ روزه با استفاده از تصاویر Landsat 8 در مزارع کشت ذرت و یونجه خرم‌دره و داده‌های آب و هوایی نشان داده شده است. این داده‌ها به صورت میانگین از نتایج به دست آمده از فرایند سبال در مزارع یونجه و ذرت خرم‌دره برداشت شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقادیر تخمینی تبخیر-تعرق واقعی برای گیاه ذرت به مدل سبال، به جز در تصاویر روزهای ابتدا و انتهای رشد کمتر از مقادیر P-M به دست آمد. نتایج به دست آمده با نتایج کریمی و همکارانش [۹]، راموس و همکارانش [۱۷] و پاپادیوید و همکارانش [۱۶] همخوانی داشت. این تفاوت بین مقادیر تبخیر-تعرق واقعی گیاه در ابتدا و انتهای رشد با سایر روزهای فصل رشد می‌تواند مختص به خطای تعیین فاکتور تصحیح سطح خاک در روزهای ابتدایی و انتهای فصل رشد باشد چرا که در این دوران تراکم پوشش گیاهی در سطح مزرعه کم می‌شود.

### معیارهای آماری برای مقایسه روابط

به منظور مقایسه مدل‌ها از معیارهای آماری متوسط خطای اریب (MBE)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، متوسط درصد خطا (MARE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) مطابق معادله‌های ۹ تا ۱۲ استفاده شد.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i) \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (10)$$

$$MARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (12)$$

در روابط یادشده پارامتر  $O_i$  مقادیر معادله پنمن-مانتیت فائو ۵۶ به عنوان مدل استاندارد (مشاهداتی) و  $P_i$  مقادیر برآوردی از الگوریتم سبال و  $\bar{O}_i$  و  $\bar{P}_i$  نیز به ترتیب میانگین مقادیر مدل پنمن-مانتیت و سبال هستند.

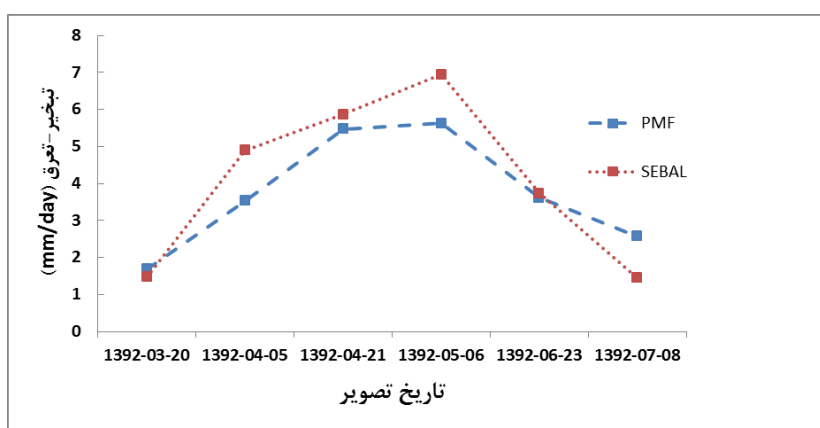
### نتایج و بحث

برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از مفهوم سبال، برای تصاویر Landsat 8 برنامه‌ای برای اجرای الگوریتم سبال در نرم‌افزار متلب (MATLAB) ایجاد شد. مراحل آماده‌سازی داده‌ها شامل پیش‌پردازش، تصحیحات هندسی تصاویر برای باندهای مختلف و استخراج منطقه بررسی شده در باندهای مختلف، در نرم‌افزارهای ENVI 4.2 انجام گرفت.

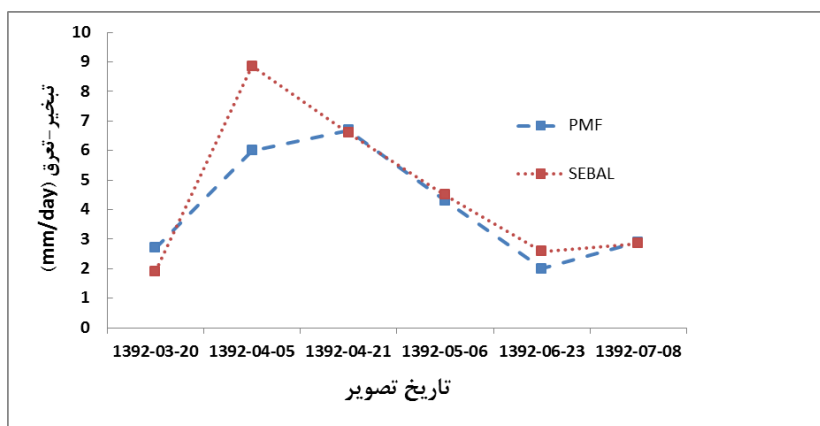
یکی از پارامترهای مهم و مشکل برای محاسبه در الگوریتم سبال، محاسبه شار گرمای محسوس (H) است. به گونه‌ای که H می‌تواند در شرایط خاصی تغییر جهت بدهد و با توجه به تغییرات شار خالص خورشیدی و شار تابش حرارتی زمین در طول روز، خطاهایی جدی را در برآورد صحیح میزان تبخیر-تعرق سبب شود [۱۶]؛

جدول ۲. ضرایب شیب خط dt و TS و دماهای پیکسل‌های سرد و گرم

تاریخ تصویربرداری	دمای پیکسل سرد ( $K^0$ )	دمای پیکسل گرم ( $K^0$ )	a	b
۱۳۹۲/۰۳/۲۰	۳۰۵/۱	۳۲۱/۸	۰/۳۹	-۱۱۰
۱۳۹۲/۰۴/۰۵	۳۰۱/۷	۳۲۳/۵	۰/۲۰	-۶۰/۲۹
۱۳۹۲/۰۴/۲۱	۳۰۴	۳۲۳/۲۴	۰/۳۹	-۱۱۵/۱۷
۱۳۹۲/۰۵/۰۶	۳۰۶/۴	۳۲۲/۲	۰/۴۸	-۱۴۷/۲۵
۱۳۹۲/۰۶/۲۳	۳۰۲/۳	۳۲۱/۳	۰/۲۳	-۶۰/۴
۱۳۹۲/۰۷/۰۸	۲۹۸/۱	۳۱۵	۰/۲۲	-۶۰/۹۵



شکل ۲. توزیع زمانی تبخیر- تعرق واقعی گیاه ذرت در مدل SEBAL و مدل پنمن-مانتیت



شکل ۳. توزیع زمانی تبخیر- تعرق گیاه یونجه در مدل SEBAL و مدل پنمن-مانتیت

همان طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده از مدل سبال برای گیاه یونجه همان روند تغییر مقدار تبخیر- تعرق واقعی گیاه در طول فصل رشد خود با استفاده از مدل پنمن-مانتیت را دارد. مقادیر تبخیر- تعرق گیاه به‌دست‌آمده از مدل سبال از مقادیر تبخیر- تعرق گیاه به مدل پنمن-مانتیت برای گیاه یونجه بیشتر برآورد شده است.

بیشترین میزان اختلاف میان مقدار تبخیر- تعرق واقعی گیاه به مدل سبال و تبخیر- تعرق واقعی گیاه به مدل P-M، در دوره رشد گیاه ذرت مختص به تاریخ ۱۳۹۲/۵/۶ است؛ می‌توان گفت که در میان تصاویر، این تصویر در دوره‌ای از رشد گیاه قرار دارد که تراکم پوشش گیاه ذرت در سطح مزرعه به بیشترین مقدار خود رسیده است.

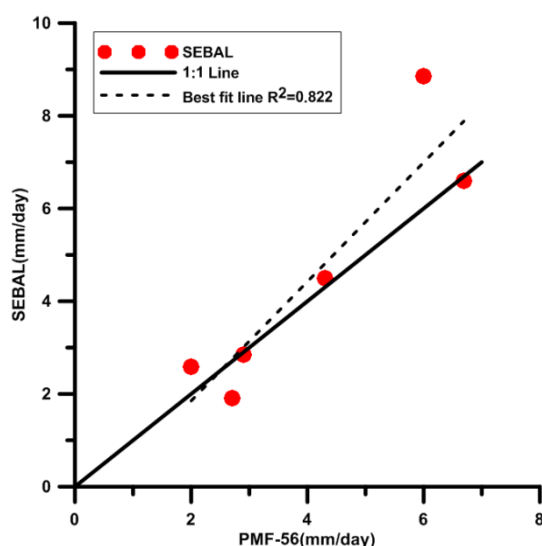
برآورد کرده است. این روند تخمین کمتر یا بیشتر از ابتدا تا انتهای طول دوره رشد گیاه، با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه الگوریتم سبال همخوانی دارد. آلن و همکارانش در زمینه تخمین تبخیر- تعرق واقعی گیاه چغندر قند با استفاده از الگوریتم سبال مشاهده کردند که بیشترین خطا در برآورد در دو دوره ابتدایی و انتهایی رشد حادث می‌شود. کریمی و همکارانش نیز در برآورد تبخیر- تعرق واقعی گیاه ذرت مشاهده کردند که مدل سبال در ابتدای فصل رشد مقدار تبخیر- تعرق را بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند [۱۸]. نتیجه یادشده توسط اکبری و همکارانش [۸] و سهیلی‌فر و همکارانش [۱۹] نیز گزارش شده است. تخمین بیشترین مقدار تبخیر- تعرق گیاه یونجه با الگوریتم سبال می‌تواند ناشی از برآورد کسر تبخیر بزرگ‌تر از یک باشد، چرا که حد فوقانی کسر تبخیر برای سطوح وسیعی از پوشش‌های گیاهی بوده است که به‌خوبی آبیاری شده‌اند [۱۸].

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، برای ارزیابی عملکرد الگوریتم سبال در تخمین تبخیر- تعرق واقعی گیاه به کمک تصاویر 8 Landat از سه شاخص استفاده شد. این شاخص‌ها عبارت‌اند از: خطای انحراف از میانگین (MBE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای قدر مطلق میانگین (MAE). جدول ۳ و شکل‌های ۴ و ۵ پارامترهای آماری یادشده را برای گیاهان ذرت و یونجه در طول فصل رشد نشان می‌دهند.

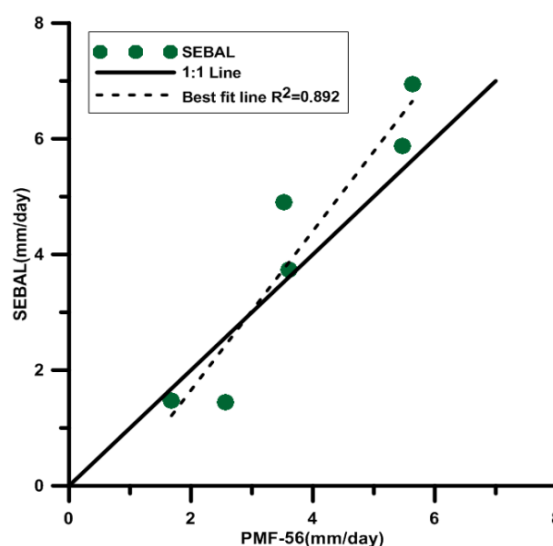
با توجه به جدول ۳ و شکل‌های ۴ و ۵ مقادیر شاخص MBE،  $0/495$  و  $-0/307$  (mm/day) که به ترتیب برای گیاه ذرت و یونجه به دست آمد، بیانگر این موضوع است که مقادیر تخمینی تبخیر- تعرق واقعی برای گیاه ذرت به مدل سبال، کمتر از مقادیر پمن-مانتیت به دست آمده است. درحالی‌که این موضوع با توجه به مثبت بودن MBE برای مقادیر تبخیر- تعرق واقعی از گیاه یونجه عکس است و مدل سبال مقادیری بیشتر از مدل پمن-مانتیت را

جدول ۳. خلاصه شاخص‌های آماری

شاخص	MAE(mm/d)	MBE(mm/d)	RMSE(mm/d)	R <sup>2</sup>
ذرت	۰/۰۳۵	-۰/۳۰۷	۰/۹۲	۰/۸۹
یونجه	۰/۱۲۵	۰/۴۹۵	۱/۲۵	۰/۸۳



شکل ۵. برازش مقادیر تبخیر- تعرق واقعی محاسبه شده به مدل SEBAL با مقادیر تبخیر- تعرق واقعی مدل پمن-مانتیت در طول فصل رشد گیاه یونجه



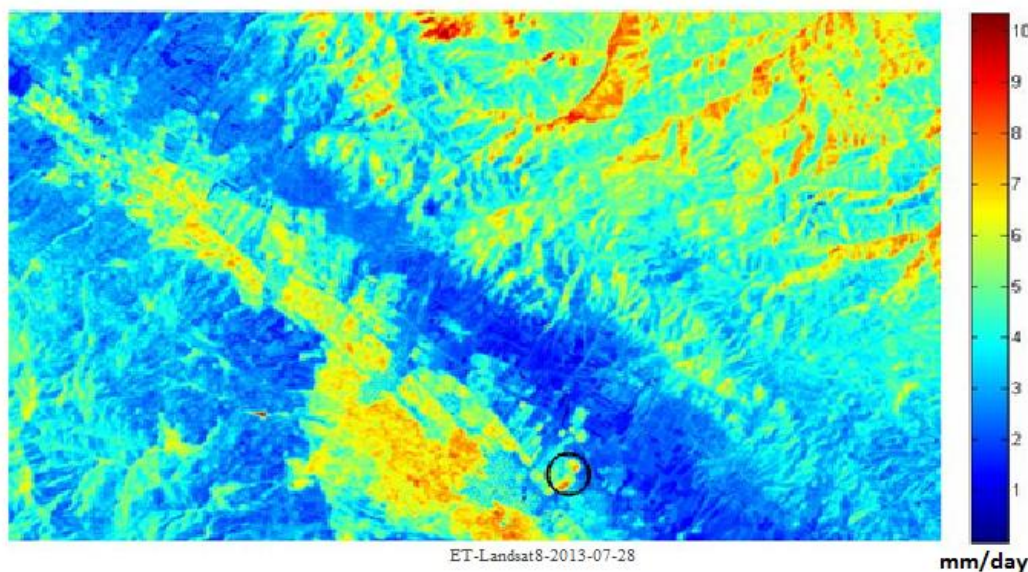
شکل ۴. برازش مقادیر تبخیر- تعرق واقعی محاسبه شده به مدل SEBAL با مقادیر تبخیر- تعرق واقعی مدل پمن-مانتیت در طول فصل رشد گیاه ذرت



میلی‌متر بر روز و ۰/۸۷ به‌دست آمدند و مقدار تبخیر- تعرق برآورد شده با استفاده از مدل سبال بیشتر از مدل پنمن-مانتیت به‌دست آمد که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد [۸].

با توجه به حدود خطای قابل قبول در تخمین تبخیر- تعرق به‌وسیله الگوریتم سبال که توسط باستیانس و همکارانش [۳] و هندریکس و هونگ [۲۰] ارائه شده است. میزان خطای برآوردشده در این تحقیق برای تخمین تبخیر- تعرق واقعی روزانه گیاهان ذرت و یونجه با استفاده از تصاویر 8 Landsat و الگوریتم سبال قابل قبول است. با توجه به این موضوع که نقشه کاربری به‌روز، در سطح منطقه در دسترس نبود و با علم تقریبی به مکان باغ‌ها و زمین‌های زراعی، با بررسی تصاویر ET تخمینی با الگوریتم سبال و تصاویر 8 Landsat، مشخص شد که بیشترین مصرف آب در سطح منطقه مطالعه‌شده، باغ‌ها و زمین‌های زراعی است (شکل ۶).

در شکل‌های ۴ و ۵ مقدار ضریب تبیین مقادیر تبخیر- تعرق گیاه در مدل سبال با مقادیر تخمینی تبخیر- تعرق گیاه با مدل پنمن-مانتیت ۰/۸۹ و ۰/۸۳ به‌ترتیب برای گیاه ذرت و یونجه است. همچنین میزان خطای مدل در برآورد تبخیر- تعرق گیاهان ذرت و یونجه با (RMSE) به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۱/۲۵ میلی‌متر بر روز، به دست آمدند. رستمی و رائینی نیز با مقایسه دو مدل پنمن-مانتیت و سبال مقدار خطای RMSE و  $R^2$  را برای برآورد تبخیر- تعرق درخت سیب به‌ترتیب ۰/۹۶ میلی‌متر بر روز و ۰/۸۵ به‌دست آوردند [۱۲]. همچنین در تحقیق ایشان مدل سبال تبخیر- تعرق را بیشتر از مدل پنمن-مانتیت برآورد می‌کرد [۱۲]. در پژوهشی دیگر اکبری و همکارانش دو مدل سبال و پنمن-مانتیت را در حوضه زاینده‌رود با یکدیگر مقایسه کردند [۸]. نتایج پژوهش ایشان نیز نشان داد این دو مدل با هم مطابقت زیادی دارند و مقدار خطای RMSE و  $R^2$  در حوضه مطالعه‌شده به‌ترتیب ۰/۶۷



شکل ۶. ET به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم SEBAL در روز ۱۳۹۲/۵/۶

در منطقه مطالعه‌شده است. الگوریتم سبال تبخیر- تعرق واقعی گیاه ذرت را در ابتدا و انتهای فصل رشد بیشتر از مدل پنمن-مانتیت برآورد می‌کند، درحالی‌که در دوره میانی رشد مدل سبال مقدار تبخیر- تعرق واقعی را کمتر از مدل پنمن-مانتیت برآورد می‌کند. همچنین الگوریتم سبال تبخیر- تعرق واقعی گیاه یونجه را در ابتدای فصل رشد کمتر از مدل پنمن-مانتیت برآورد می‌کند، درحالی‌که در دوره میانی و انتهایی

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر نتایج به‌دست‌آمده در تعیین تبخیر- تعرق گیاهان ذرت و یونجه با نتایج به‌دست‌آمده از تبخیر- تعرق واقعی در مدل پنمن-مانتیت مقایسه و ارزیابی شد. در این مقایسه شاخص‌های آماری MAE، MBE و  $R^2$  به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی استفاده شدند. نتایج نشان داد الگوریتم سبال با دقت زیادی قادر به برآورد تبخیر- تعرق واقعی گیاه

- Watershed Management Science and Engineering. 2010; 4(1): 13-30 [Persian].
- [7]. Mohseni Saravi M, Ahmadi H, Nosrati K. Application of SEBAL model to estimate evapotranspiration in Taleghan watershed. First conference on water, soil and atmosphere modeling. Shahid Bahonar University. Kerman. 2010 [Persian].
- [8]. Akbari M, Seyf Z, Zare Abyaneh H. Estimation of Evapotranspiration by Remote Sensing Technique under Different Climate Condition. Journal of Water and Soil. 2011; 5(4):835-844 [Persian].
- [9]. Karimi A, Farhadi B, Hesadi H. Estimation of regional evapotranspiration using Landsat-TM images and SEBAL algorithm. Iranian journal of irrigation and drainage. 2012; 4(6): 353-364 [Persian].
- [10]. Morshedi A, Tabatabaei SH, Naderi M. Verification SEBAL and Hargreaves - Samani Models to Estimate Evapotranspiration by Lysimeter Data. Journal of Water and Soil. 2016; 30(2):367-376 [Persian].
- [11]. Nosrati K, Mohseni Saravi M, Ahmadi H, Aghighi H. Estimation of evapotranspiration at Taleghan basin using MODIS images and SEBAL model. Journal of watershed and rangeland. 2015; 68(2): 385-398 [Persian].
- [12]. Rostami A, Raeini-Sarjaz M. remotely sensed measurements of apple orchard actual evapotranspiration and plant coefficient using MODIS images and SEBAL algorithm (Case study: Ahar plain, Iran). Journal of Agricultural Meteorology. 2016; 5(1):23-43 [Persian].
- [13]. Nazari R, Kaviani A. Comparing the Estimates of Reference Crop Evapotranspiration in Qazvin Plain Using SEBAL and METRIC Models. Journal of water research in agriculture. 2016; 30(2): 187-199 [Persian].
- [14]. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. 1998. FAO, Rome, 300, 6541.
- [15]. Jensen M.E, Burman R.D, Allen R.G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manual Report Engineering Practice. 1990; (70):332-350.
- [16]. Papadavid G, Hadjimitsis D, Toullos L, Michaelides S. A Modified SEBAL Modeling Approach for Estimating Crop Evapotranspiration in Semi-arid Conditions. Water Resources Management. 2013;27(9): 3493-3506.
- رشد مدل سبال مقدار تبخیر- تعرق واقعی را بیشتر از مدل پنمن-مانتیت برآورد می کند. استخراج میزان تبخیر- تعرق از داده های ماهواره ای راه کاری مناسب برای بالابردن سطح مدیریت منابع آب و برنامه ریزی آبیاری است، چرا که مدیریت آب آبیاری نیاز به اطلاعات دقیق ET در شرایط واقعی مانند زمین های ناهمگن متشکل از اکوسیستم های مختلف کشاورزی در الگوهای بارش نامنظم باران، تاج گیاهی پراکنده و اداره سیستم های آبیاری و زهکشی دارد. استفاده از مدل های سنجنش از دور مانند سبال می تواند جزئیات مکانی کافی ET برای تجزیه و تحلیل در سطح مزرعه را فراهم آورد. در بررسی حاضر از نتایج معادله تجربی پنمن-مانتیت برای واسنجی و صحت سنجی نتایج الگوریتم سبال استفاده شد. بنابراین، پیشنهاد می شود با توجه به اهمیت موضوع کمبود آب با صرف هزینه هایی در هر منطقه با احداث سیستم های اندازه گیری تبخیر- تعرق مانند لایسیمتر به دقت این گونه پژوهش ها کمک شود.

#### منابع

- [1]. Asgharzadeh H, Sanaei Nejad SH. Estimating of evapotranspiration using remote sensing (RS) and Geographic Information System (GIS) in Kermanshah Tang Kesht watershed. National Conference on irrigation and drainage network management. 2006; Shahid Chamran university. Ahvaz [Persian].
- [2]. Bastiaanssen W, Menenti M, Feddes R, Holtslag A. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. Journal of Hydrology. 1998; 12(2):198-212.
- [3]. Bastiaanssen W, Noordman E, Pelgrum H, Davids G, Thoreson B, Allen R. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. Journal of irrigation and drainage engineering. 2005; 131(1): 85-93.
- [4]. Bastiaanssen WG, Ahmad M, Chemin Y. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. Water Resources Research. 2002. 38(12): 9-1-9-9.
- [5]. Bastiaanssen W. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology. 2000. 229(1):87-100
- [6]. Poor Mohammadi S, Dastorani MT, Mokhtari MH, Rahimian MH. Determination and Mapping Evapotranspiration by Remote Sensing and SEBAL Algorithm (Case Study: Menshad watershed in Yazd province). Iranian Journal of

- [17]. Ramos JG, Cratchley CR, Kay J, Casterad M A, Martínez-Cob A, Dominguez R, Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of NE Spain. Agricultural water management. 2009; 96(4): 638-652.
- [18]. Allen R G, Morse A, Tasumi M, Trezza R, Bastiaanssen W, Wright JL, Kramber W. Evapotranspiration from a satellite-based surface energy balance for the Snake Plain Aquifer in Idaho. Proc. USCID Conference. 2002.
- [19]. Soheilifar Z, Mirlatifi SM, Naseri A, Asari M. Estimating actual evapotranspiration of sugarcane bay remote sensing (A case study: Mirza Kochakkhan sugarcane Agro-Industry company farms). Water and soil science. 2013; 23(1):151-163 [Persian].
- [20]. Hendrickx J M, Hong Sh. Mapping sensible and latent heat fluxes in arid areas using optical imagery. International Society for Optics and Photonics. 2005; 138-146.