

## برآورد تبخیر- تعرق برنج با استفاده از مدل SEBAL و برخی روش‌های محاسباتی و تجربی در شرایط کشت غرقابی لنجان اصفهان

سید امید میرمحمدصادقی<sup>۱</sup>، مهدی قبادی‌نیا<sup>۲\*</sup> و محمدحسن رحیمیان<sup>۳</sup>

### چکیده

در سال‌های اخیر به دلیل افزایش مصرف آب، به میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف توجه شده است. در بخش کشاورزی حوضه زاینده‌رود، برنج به عنوان یکی از محصولات پر مصرف مطرح می‌شود. در پژوهش حاضر تبخیر- تعرق برنج در منطقه لنجان استان اصفهان برای بررسی انتخاب و الگوریتم توازن انرژی سطحی (SEBAL) برای تعیین تبخیر و تعرق در ماه‌های خرداد تا شهریور (فصل کشت) سال ۱۳۹۶ روی هشت تصویر ماهواره لندست ۸ اجرا شد. همچنین روش‌های تجربی و ترکیبی برآورد تبخیر- تعرق شامل فائو- پنمن- مانتیث، کیمبرلی- پنمن، هارگریوز- سامانی، بلانی- کریدل، پنمن- مانتیث و برنامه netwat بررسی و ارزیابی شدند. بر همین اساس، مدل SEBAL در محدوده کشت برنج لنجان، بیشترین و کمترین میزان تبخیر- تعرق روزانه را در تصاویر تاریخ‌های ۳ مرداد و ۴ شهریور سال ۱۳۹۶ معادل ۷/۹۵ و ۵/۸۸ میلی‌متر بر روز برآورد کرد. همچنین از میان روش‌های تجربی یاد شده برنامه netwat کمترین برآورد و داده‌های SEBAL با شاخص‌های MAE، RMSE و  $R^2$  به ترتیب ۰/۵۸، ۰/۳۵ و ۰/۷۵، همبستگی بیشتری با روش هارگریوز- سامانی را داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم SEBAL، برنج، تبخیر- تعرق، سنجش از دور، لندست ۸.

**ارجاع:** میرمحمدصادقی س.ا.، قبادی‌نیا م. و رحیمیان م. ح. ۱۳۹۹. برآورد تبخیر- تعرق برنج با استفاده از مدل SEBAL و برخی روش‌های محاسباتی و تجربی در شرایط کشت غرقابی لنجان اصفهان. مجله پژوهش آب ایران. ۳۶: ۱۴۰-۱۳۱.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه آبیاری- زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دکترای آبیاری و زهکشی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مرکز ملی تحقیقات شوری، یزد، ایران.

\* نویسنده مسئول: [mahdi.ghobadi@gmail.com](mailto:mahdi.ghobadi@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

## مقدمه

آب از مهم‌ترین عوامل محدودکننده توسعه کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. استفاده بی‌رویه و خشکسالی‌های اخیر در کشور، موجب مشکلات زیادی شده است که برای جلوگیری و خروج از معضل کمبود آب، نیاز به مدیریت مناسب کشاورزی و منابع آب بیش از پیش شده است (شیرمبک و همکاران، ۲۰۱۷). تبخیر- تعرق از جمله راه‌های مهم مصرف یا هدررفت آب در یک حوضه است که پایش و بررسی تغییرات آن، در دوره‌های زمانی معین می‌تواند در مسایل مهمی از جمله تعیین مقدار آب مصرفی گیاه و برنامه‌ریزی آبیاری و در نتیجه تعیین ظرفیت سیستم‌های آبیاری اهمیت فراوانی داشته باشد (جانا و همکاران، ۲۰۱۶).

برنج از مهم‌ترین محصولات اصلی غذایی برای اکثر مردم ایران است که بر وضعیت معیشت و اقتصاد کشاورزان تأثیر به‌سزایی دارد. از آن‌جا که آب مهم‌ترین جزء برای تولید پایدار در مناطق برنج‌خیز است، توجه ویژه به نیازهای اکولوژیک، آب و خاک آن اهمیت دارد (رضایی و همکاران، ۱۳۹۵). در ایران، کشت برنج به‌دلیل محدودیت منابع آب و پایین بودن راندمان آبیاری در مزارع برنج دارای مشکلاتی است و به ویژه در مناطقی به‌غیر از شمال کشور، این مشکلات دوچندان بوده که توجه دقیق به نیازهای اکولوژیک آن در کنار لزوم استفاده بهینه و افزایش بهره‌وری از منابع موجود را می‌طلبد (اسدی و همکاران، ۱۳۸۳).

برای محاسبه تبخیر- تعرق روش‌های مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. در روش مستقیم از اصل بیلان آب در یک حجم کنترل‌شده برای محاسبه تبخیر- تعرق استفاده می‌شود؛ در حالی که در روش غیرمستقیم عوامل مختلف اقلیمی و گیاهی کاربرد دارد و تبخیر- تعرق گیاه مرجع محاسبه شده و سپس با استفاده از ضرایب گیاهی، تبخیر- تعرق گیاه به‌دست می‌آید (سلیمان و همکاران، ۲۰۰۹). از آن‌جایی که روش‌های مستقیم و غیرمستقیم مانند لایسیمتر، همبستگی ادی و همچنین روش‌های تجربی محاسبه این پارامتر هریک دارای محدودیت‌هایی است، به تازگی از روش‌های سنجش از دور برای محاسبه تبخیر- تعرق استفاده می‌شود (ولی‌زاده کامران، ۱۳۹۱). سنجش از دور علاوه بر این که مشکل دسترسی به محل و حضور فیزیکی در آن که لازمه روش‌های زمینی و سنتی

است، را مرتفع می‌سازد و آن را به حداقل می‌رساند، با ایجاد پوشش خوبی از منطقه مورد مطالعه، امکان دید کلی و عام‌تر از آن را فراهم می‌کند (مدینا و همکاران، ۱۹۹۸). سنجش از دور، می‌تواند مقدار تبخیر- تعرق را تخمین بزند و حتی توزیع مکانی آن را بررسی کند؛ زیرا تنها روشی است که می‌تواند پارامترهایی مانند دمای سطحی، ضریب آلبیدو و شاخص پوشش‌گیاهی را به صورت منطبق یا سازگار با محیط فراهم کند و همچنین از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه باشد (کرباسی و همکاران، ۱۳۹۵). دقت این روش‌ها بسته به قدرت تفکیک مکانی، قدرت تفکیک طیفی و نسبت نویز به سیگنال ماهواره متفاوت است. از جمله روش‌هایی که بتوان از تصاویر ماهواره‌ای در برآورد شارهای سطح استفاده کرد، الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (SEBAL) است. این الگوریتم را در سال ۱۹۹۸ باستیانس و همکاران در هلند ارائه کردند و سپس برای منطقه کوهستانی آیداهو با استفاده از مقادیر تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده در سطح زمین توسعه یافت (باستیانس و همکاران، ۱۹۹۸) تاکنون پژوهش‌های زیادی انجام شده که همه نشان‌دهنده کارایی الگوریتم SEBAL در برآورد تبخیر- تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای و حوضه‌های بزرگ است. جکسون و رگینتون (۱۹۷۷) با به دست آوردن تبخیر- تعرق به‌وسیله داده‌های سنجش از دور و ارزیابی نتایج با استفاده از دماسنج مادون قرمز در مزرعه گندم در آریزونا، پیشگام استفاده از سنجش از دور هستند. باستیانس و همکاران (۱۹۸۸) برآوردهای SEBAL را با داده‌های مزرعه‌ای در اسپانیا و چین مقایسه کردند. در ۸۵ درصد موارد، اختلاف‌ها در محدوده پذیرفتنی قرار داشت. مقدار ریشه میانگین مربعات خطای جز تبخیری برای فواصل کمتر از ۱۰۰ متر، بین ۰/۱ تا ۰/۲ متغیر و با تلفیق چندین بازه و ایجاد فواصل کمتر از یک کیلومتر، خطای کلی به ۵ درصد کاهش یافته است. باستیانس (۲۰۰۰) و باستیانس و همکاران (۲۰۰۵) عملکرد SEBAL در تعیین تبخیر- تعرق واقعی را با مقادیر به‌دست آمده از روش همبستگی ادی مقایسه کردند که درصد صحت در برای دوره یک روزه ۸۵ درصد و برای دوره فصلی ۹۵ درصد بوده است. جویت (۲۰۰۶) یک شبکه کنترل در زیرحوضه گابورن<sup>۱</sup> در جنوب آفریقا ایجاد و از الگوریتم SEBAL برای به‌دست

برآورد تبخیر- تعرق برنج در شرایط کشت غرقابی با استفاده از روش‌های مختلف تجربی و محاسباتی با محوریت الگوریتم SEBAL است. همچنین حساسیت روش SEBAL به تغییرات پارامترهای اصلی این روش نیز ارزیابی می‌شود.

### مواد و روش‌ها

#### الگوریتم SEBAL

SEBAL یک الگوریتم پردازش تصویر است که تبخیر- تعرق واقعی را برای هر پیکسل در زمان تصویربرداری محاسبه می‌کند. معادله کلی الگوریتم توازن انرژی به صورت زیر است:

$$Rn = G + H + \lambda ET \quad (1)$$

$Rn$  شار تابشی خالص) بر حسب  $(\frac{W}{m^2})$ ،  $\lambda ET$  مقدار شار گرمایی نهان در لحظه عبور ماهواره بر حسب  $(\frac{W}{m^2})$ ،  $H$  شار گرمایی محسوس هوا بر حسب  $(\frac{W}{m^2})$  و  $G$  شار گرمایی خاک بر حسب  $(\frac{W}{m^2})$  است.

برای محاسبه شار تابشی خالص بایستی گام‌های نشان داده شده در شکل ۱، به ترتیب طی شده تا در نهایت تمامی پارامترهای مورد نیاز محاسبه شود (جانا و همکاران، ۲۰۱۶).

شار گرمایی خاک ( $G$ ) میزان ذخیره گرمایی خاک در نتیجه گرادیان دمایی مابین سطح خاک و لایه‌های پایین‌تر است. تشعشع خورشید در طول روز سبب گرم شدن زمین و خاک می‌شود (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۵). همچنین این پارامتر با استفاده از شاخص‌های گیاهی، تشعشع خالص، دمای سطح زمین و آلبیدوی سطح نیز محاسبه می‌شود. باستیانسن (۱۹۹۸) بر پایه پژوهش‌های خود و دیگر پژوهش‌های مربوط به خاک رابطه تجربی زیر را پیشنهاد کرده است.

$$G = Rn \frac{(Ts - 273.15)}{100\alpha} (0.32\alpha - 0.62\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (2)$$

که  $\alpha$  متوسط آلبیدو،  $NDVI$  شاخص پوشش گیاهی و  $Ts$  نیز دمای سطح زمین است.

شار گرمایی محسوس ( $H$ ) میزان تلفات انرژی از خاک از طریق همرفت و فرآیند انتشار در نتیجه اختلاف دمایی مابین سطح و پایین‌ترین لایه جو است. این پارامتر از طریق محاسبات مکرر باتوجه به چندین عامل مانند دمای سطحی و سرعت باد، زبری سطح و اختلاف دمای سطح

آوردن تبخیر- تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ استفاده کرد. با کاربرد الگوریتم SEBAL، یک نقشه تبخیر- تعرق روزانه برای منطقه مورد مطالعه در نیمه دوم مارس ۲۰۰۱ به دست آمد. مقایسه بین برآوردهای SEBAL و مقادیر ثبت‌شده در ایستگاه‌های آب و هوایی برگیل در یک روز و برای یک پیکسل انجام شد که شاخص‌های  $RMSE$  و  $R$ - Square مشاهده شده بین مقادیر SEBAL و داده‌های اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر  $0.4$  و  $0.81$  بوده است که استفاده از SEBAL در حوضه مذکور و حوضه‌های مجاور آن پیشنهاد شده است. لیو و همکاران (۲۰۰۲) و لیو و همکاران (۲۰۱۴) میزان تبخیر- تعرق واقعی گیاه برنج را به کمک دو روش S- SEBI و SEBAL در ۵۰ مزرعه کشور تایوان با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای ارزیابی کردند. اختلاف نتایج روش S- SEBI با مقادیر اندازه‌گیری شده در حد قابل قبول نبوده است؛ اما روش SEBAL با محدود کردن شار گرمایی محسوس و شار گرمایی نهان به وسیله جز تبخیری و همچنین استفاده از طول مانین- ابوخوف<sup>۱</sup> برای تصحیح‌های اتمسفری، نتایج بسیار نزدیکی به داده‌های اندازه‌گیری شده داشته است.

یانگوان و سنونجون (۲۰۱۷) از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره لندست ۵ برای برآورد تبخیر- تعرق در مناطق سرد و مرتفع حوضه آبریز رودخانه شول<sup>۲</sup> در چین استفاده کردند. مقدار برآوردی تبخیر تعرق در روزهای ژولایوس ۱۶۰، ۱۷۶ و ۲۰۸ در سال ۲۰۱۰ نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده دارای  $RMSE$  برابر  $0.52$  میلی‌متر بر روز بوده است. کمالی و نظری (۲۰۱۸) برای تعیین نیاز آبی زراعت ذرت در شهرستان مازندران واقع در شمال ایران و جنوب دریای خزر، از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره لندست استفاده کردند. تصحیح‌های اتمسفری روی تصاویر انجام شده و نقشه تبخیر- تعرق برای منطقه مورد نظر تهیه شده است. این نقشه دارای مقادیر  $RMSE$ ،  $0.73$ ،  $1/38$  و  $0.74$  میلی‌متر بر روز نسبت به کتاب مرجع، برنامه netwat و مقادیر فائو است.

با توجه به این‌که در سال‌های اخیر کاهش بارندگی و افزایش مصرف در بخش‌های مختلف، محدودیت شدید منابع در دسترس را باعث شده است، هدف پژوهش حاضر

1- Monin- Obukhov

2- ShuleRiver

پوشش گیاهی و خشک است. فرض به کار رفته در مورد پیکسل گرم، این است که هیچ گرمای نهانی را منتشر نمی‌کند؛ به عبارتی دیگر مقدار تبخیر-تعرق آن نزدیک به صفر است.

شار گرمایی نهان ( $\lambda ET$ ) از طریق تفاضل جبری معادله توازن انرژی و به‌عنوان جزء باقی‌مانده این معادله، قابل محاسبه است (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۵).

سپس تبخیر-تعرق لحظه‌ای بر اساس رابطه زیر تعیین می‌شود (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۵).

$$ET_{inst} = 3600 \lambda ET / \lambda \quad (4)$$

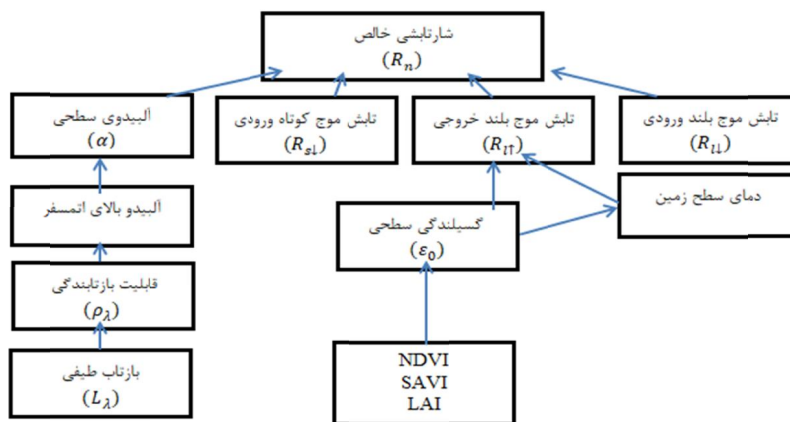
در معادله فوق  $\lambda ET$  مقدار شار گرمایی نهان در لحظه عبور ماهواره بر حسب  $(\frac{W}{m^2})$  و  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر بر حسب  $(J/Kg)$  است. برای محاسبه گرمای نهان تبخیر از رابطه تجربی زیر استفاده می‌شود (عظیمی و همکاران، ۱۳۹۴).

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 273)] \times [10]^{\wedge 6} \quad (5)$$

زمین با هوای اطراف سطح زمین تعیین می‌شود (حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

$$H = (\rho \times C_p \times dT) / r_{ah} \quad (3)$$

در معادله فوق  $\rho$  چگالی هوا بر حسب  $(\frac{Kg}{m^3})$ ،  $C_p$  گرمای ویژه هوا برابر  $1.00 J/(Kg/K)$ ،  $dT$  اختلاف دما بین دو ارتفاع  $Z_1$  و  $Z_2$  بر حسب  $(K)$  و  $r_{ah}$  مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرما بر حسب  $(s/m)$  است. شار گرمایی محسوس تابعی از گرادیان حرارتی، زبری سطح و سرعت باد است. برای محاسبه اختلاف دما، دو پیکسل آستانه انتخاب می‌شوند: یکی از این پیکسل‌ها که پیکسل سرد نامیده می‌شود، مربوط به منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه و خوب آبیاری شده است که دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هواست و تبخیر-تعرقی معادل تبخیر-تعرق مرجع دارد. دارا بودن بیشترین شاخص پوشش گیاهی NDVI، کمترین آلبیدو و دمای سطحی از ویژگی‌های پیکسل سرد محسوب می‌شود. پیکسل دوم که پیکسل گرم نامیده می‌شود، زمین کشاورزی بدون



شکل ۱- محاسبه شار تابشی خالص Rn

تفکیک مکانی ۳۰ متری، باند ۸ تفکیک مکانی ۱۵ متری و باند ۹ تفکیک مکانی ۳۰ متری دارد. باندهای ۱۰ و ۱۱، باندهای مادون قرمز حرارتی هستند که گرمای سطح زمین و اشیای آن را نشان می‌دهند و قدرت تفکیک مکانی آن‌ها ۱۰۰ متر است (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۱). برای برآورد میزان تبخیر-تعرق در منطقه مورد مطالعه، ۸ تصویر ماهواره لندست ۸ برای سال زراعی ۱۳۹۶ همزمان

### تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر ماهواره‌ای، ابزار اصلی مورد استفاده در الگوریتم SEBAL هستند. در حال حاضر از سنجنده‌هایی که با قدرت تفکیک مکانی متوسط در مدار قرار دارد، ماهواره لندست است. ماهواره لندست ۸ از سال ۲۰۱۳ روی مدار قرار گرفته است و تصاویر ماهواره‌ای را در ۱۱ باند از طریق دو عملگر<sup>۱</sup> OLI و<sup>۲</sup> TIRS می‌فرستد. باندهای ۱ تا ۷

1- Operational Land Imager

2- Thermal Infrared Sensor

با کشت برنج در منطقه در تاریخ‌های ۹۶/۰۳/۰۱ تا ۹۶/۰۶/۲۰ به فاصله ۱۶ روز، جمع‌آوری شده است.

### روش‌های تجربی و محاسباتی

در نیم قرن گذشته روابط ساده تجربی تا معادلات پیچیده علمی، توسط پژوهشگران برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از پارامترهای هواشناسی مختلف ارائه شده است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۳). سایر روش‌های

تجربی و ترکیبی مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل بلانی- کریدل، هارگریوز- سامانی، فائو- پنمن- مانتیث در شرایط کشت برنج، کیمبرلی- پنمن و داده‌های برنامه netwat (این برنامه در برخی شرکت‌های مشاور برای تعیین نیازآبی در طراحی سامانه‌های آبیاری استفاده می‌شود) است که در ادامه معادلات مربوط به هر روش در جدول ۱ آمده است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۳؛ علیزاده، ۱۳۸۱).

جدول ۱- روابط تجربی مورد استفاده در پژوهش حاضر

شماره رابطه	نام رابطه	معادله
۱	بلانی- کریدل	$ET_0 = a + b[p(0.46T + 1.13)]$
۲	هارگریوز- سامانی	$ET_0 = 0.13 \Delta K_T R_a T D^{1/5} (T + 17/8)$
۳	فائو- پنمن- مانتیث	$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left[ \frac{890}{T + 273} \right] U_r (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_r)}$
۴	کیمبرلی- پنمن	$\lambda ET_r = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \epsilon / 43 W_f (e_s - e_a)$

کشت برنج از نرم افزار کراپوات و داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های یاد شده استفاده شد.

### آماره‌های ارزیابی مدل

برای بررسی و ارزیابی کارایی مدل SEBAL و مقایسه آن با روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق، از سه شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق<sup>۱</sup> و ضریب تبیین استفاده شده است.

### منطقه مورد مطالعه

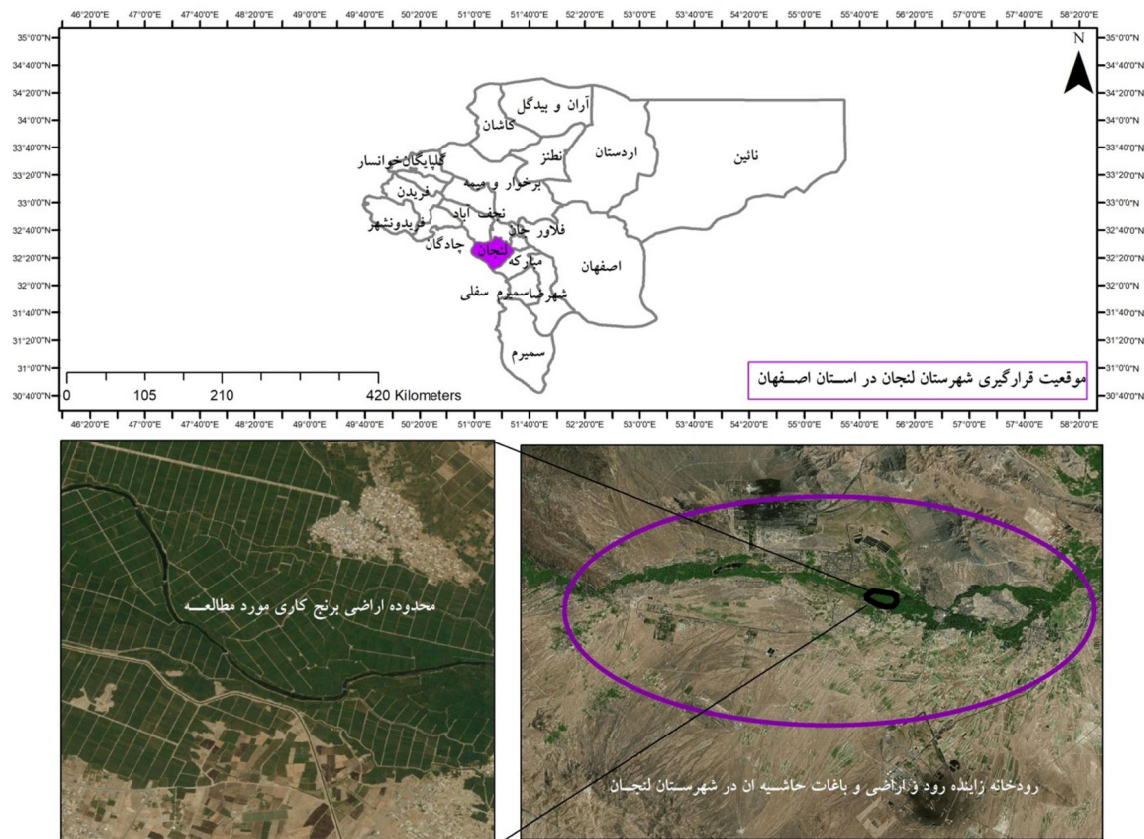
شهرستان لنجان با مساحت تقریبی ۳۳۰۰ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۵۱ درجه ۱۵ دقیقه و ۴۰ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه ۱۶ دقیقه و ۵۰ ثانیه قرار دارد. متوسط بارش سالانه در محدوده مورد مطالعه حدود ۱۵۵ میلیمتر، دمای متوسط سالانه ۱۷/۷ و میانگین سالانه تبخیر از تشتک ۲۰۱۷/۵ میلی‌متر است. کشت برنج از دیرباز در حاشیه زاینده‌رود و به‌ویژه دشت لنجان متداول بوده است و حتی برای کشاورزانی که در

در معادلات فوق  $ET_0$  تبخیر- تعرق گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر بر روز،  $p$  ضریب مربوط به طول روز،  $T$  متوسط درجه حرارت ماهانه بر حسب درجه سانتی‌گراد،  $a$  و  $b$  ضرایبی که به حداقل رطوبت نسبی هوا، نسبت ساعات واقعی آفتاب به حداکثر ساعات آفتابی ممکن و سرعت باد بر روز بستگی دارد،  $R_a$  تابش برون‌زمینی (میلی‌متر بر روز)،  $TD$  تفاوت دمای متوسط بیشینه و کمینه روزانه و  $KT$  ضریبی که به  $TD$  و درصد ساعات تابش آفتاب بستگی دارد.  $R_n$  تابش خالص در سطح پوشش گیاهی بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز،  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر حسب متر بر ثانیه،  $e_a - e_d$  کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری بر حسب کیلو پاسکال،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد،  $\gamma$  ضریب رطوبتی بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد و  $G$  شار گرمایی خاک بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز (هژبر و همکاران، ۱۳۹۳؛ علیزاده و همکاران، ۱۳۸۳). بدین منظور از ایستگاه تبخیرسنجی زفره و ایستگاه هواشناسی زرین‌شهر برای جمع‌آوری داده‌های هواشناسی مورد نیاز استفاده شده است. همچنین برای محاسبه تبخیر- تعرق از روش پنمن- مانتیث- فائو در شرایط

1- Root Mean Square  
2- Mean Absolute Error

در دستور کار این پژوهش قرار گرفته است. در این پژوهش، مساحتی در حدود ۲۰۰ هکتار از اراضی منطقه مورد مطالعه مطابق شکل ۲ بررسی شده است. مرز محدوده مورد مطالعه که بر اساس بازدیدهای میدانی تعیین شده، قسمتی از دشت لنجان است که فقط کشت برنج را در برمی‌گیرد و جاده‌های خاکی و آسفالت، ساختمان، کوه و تپه و سایر تأسیسات را شامل نمی‌شود.

این ناحیه کشت برنج انجام می‌دهند، بر اساس طومار شیخ بهایی حقایق تعلق گرفته است و این کشاورزان سال‌های زیادی در این منطقه به تولید برنج مشغول بوده‌اند (امامی حیدری و همکاران، ۱۳۹۳). در این میان با توجه به کاهش منابع آب در کشور و لزوم تغییر الگوی کشت مطابق با شرایط آب و هوایی هر منطقه، بررسی شرایط موجود از لحاظ میزان آب مصرفی و میزان آب مورد نیاز



شکل ۲- منطقه مورد مطالعه

در شکل ۳ روند تغییرات روزانه تبخیر-تعرق برآورد شده با روش‌های مورد اشاره در این پژوهش نشان داده شده است. لازم است بیان شود که ضرایب گیاهی برای محاسبه نیاز آبی در نظر گرفته شده است. روزهای مورد اشاره در نمودار منطبق بر روزهای برداشت تصاویر ماهواره‌ای برای الگوریتم SEBAL است. مطابق شکل ۳ بیشترین مقدار تبخیر-تعرق روزانه مربوط برای همه روش‌ها به جز SEBAL در تاریخ ۱۸ تیر اتفاق افتاده است که روش بلانی-کریدل با مقدار تبخیر و تعرق

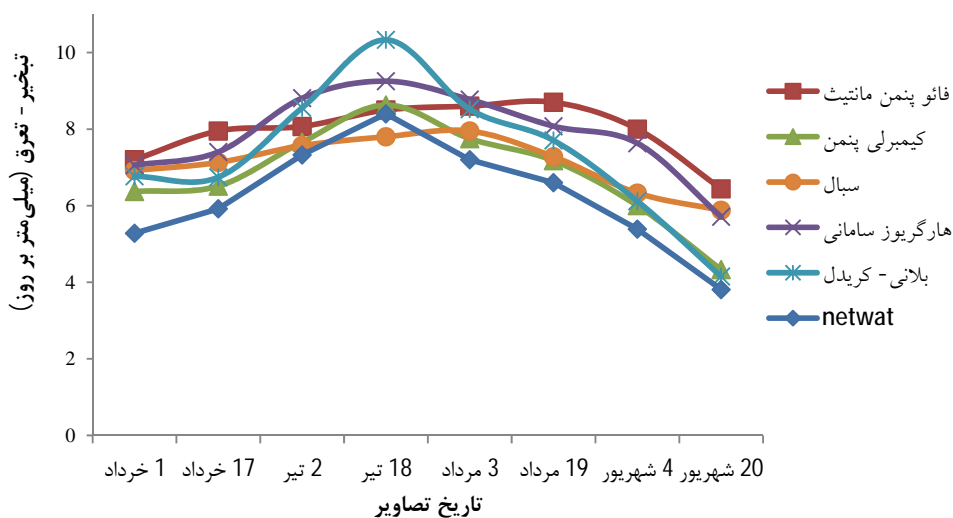
## نتایج و بحث

برای محاسبه میزان تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم SEBAL، ابتدا تصحیح‌های اتمسفری روی تصاویر انجام، سپس پارامترهای شارتابشی خالص، شار گرمایی خاک و شار گرمایی محسوس از تصاویر استخراج شد و در نهایت پس از محاسبه همه پارامترهای معادله اصلی الگوریتم SEBAL، شار گرمایی نهان از طریق تفاضل جبری معادله توازن انرژی و به‌عنوان جزء باقیمانده این معادله، قابل محاسبه است.

ارزیابی مدل SEBAL نسبت به روش‌های تجربی و ترکیبی مورد استفاده نشان داده شده است. از میان روش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و با توجه به هر سه پارامتر آماری ارزیابی جدول ۲، مقادیر تبخیر- تعرق محاسبه شده به روش SEBAL بیشترین نزدیکی را به داده‌های محاسبه شده توسط روابط بلانی- کریدل و هارگریوز- سامانی داشته‌اند. هر دو روش یاد شده از پارامتر دما به عنوان عامل اصلی در محاسبه تبخیر- تعرق، به صورت مستقیم استفاده می‌کنند و از همین روی، نسبت به روش‌های دیگر در منطقه مورد مطالعه (عدم حضور مستقیم پارامتر دما در رابطه)، توانسته‌اند نتایج نزدیک‌تری به روش SEBAL ارائه دهند. از سوی دیگر سایر روش‌های محاسبه تبخیر- تعرق به غیر از روش پنمن- مانتیث- فائو، ارتفاع آب روی سطح خاک را در نظر نمی‌گیرند و به همین دلیل مقادیر تبخیر- تعرق را کمتر برآورد کرده‌اند.

برابر ۱۰/۳۳ میلی‌متر بر روز بیشترین و روش SEBAL با مقدار ۷/۸ میلی‌متر بر روز کمترین مقدار در آن تاریخ است. در روش SEBAL نیز بیشترین مقادیر تبخیر- تعرق روزانه به روش SEBAL مربوط به تاریخ ۳ مرداد و حداقل مقدار تبخیر- تعرق نیز مربوط به تاریخ ۲۰ شهریور است که به دلیل کاهش دما، پایان فصل کشت و در نتیجه کاهش میزان پوشش گیاهی اتفاق افتاده است. از آنجایی که کل منطقه مورد مطالعه زیر کشت برنج بوده است، مقدار بیشینه تبخیر- تعرق نیز مربوط به دوره پنجه‌زنی و رشد و همچنین گلدهی بوده که گیاه برای رشد خود نیاز به آب زیادی داشته است و توسعه گیاه در این زمان در بیشینه مقدار بوده است و تعرق بیشتری نیز اتفاق افتاده است.

دلیل بیشتر بودن مقدار تبخیر- تعرق برآورد شده به کمک SEBAL در تاریخ ۳ مرداد، ازدیاد پوشش گیاهی در مزارع آبی نسبت به تاریخ ۱۸ خرداد که در محاسبات مربوط به مدل SEBAL تأثیر گذاشته است. جدول ۲ آماره‌های



شکل ۳- مقایسه مقادیر برآورد شده به روش‌های تجربی با مقادیر الگوریتم SEBAL

جدول ۲- آماره‌های ارزیابی روش‌های تجربی

رابطه	فائو- پنمن- مانتیث	کیمبرلی- پنمن	هارگریوز- سامانی	بلانی- کریدل	پنمن- مانتیث	netwat
RMSE (mm/d)	۱/۳	۱/۱	۰/۵۸	۰/۸۸	۰/۹	۰/۷
MAE (mm/d)	۱/۷۳	۰/۸۳	۰/۳۵	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۶۸
R <sup>۲</sup>	۰/۸۲	۰/۹	۰/۷۵	۰/۸۶	۰/۶۵	۰/۸۵

تعرق برآورد شده به کمک روش SEBAL نشان داده شده است. آن‌چنان که از این شکل بر می‌آید، در این روش از

برنامه netwat نیز از میان روش‌های فوق، کمترین برآوردها را داشته است. در شکل ۴ روند تغییرات تبخیر-

در عمل طول دوره کشت در منطقه، کمتر از این مدت است (حدود ۱۱۰ روز). همچنین در اواخر دوره کشت آبیاری قطع می‌شود؛ اما مدل‌ها یا جدول‌های موجود تا زمان برداشت، آبیاری را ادامه می‌دهد.

برای بررسی تأثیرگذاری پارامترهای الگوریتم SEBAL بر مقادیر نهایی تبخیر- تعرق، پنج پارامتر آلبیدوی سطحی، شاخص پوشش گیاهی NDVI، دمای سطح زمین، شار تابشی خالص، شار گرمایی محسوس ارزایی شدند. بدین منظور حساسیت مدل به چهار پارامتر آلبیدوی سطحی، دمای سطح زمین، شار تابشی خالص و شار گرمایی محسوس، با ۵ درصد تغییر در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، پارامتر شار تابشی خالص با در نظرگیری پارامترهای جانبی مانند آلبیدوی سطحی و شاخص‌های پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را بر مقادیر تبخیر- تعرق داشته و مدل نسبت به تغییرات این پارامتر، بیشترین حساسیت را از خود نشان داده است. همچنین با در نظرگیری ۵ درصد تغییر هر یک از پارامترها، الگوریتم SEBAL کمترین حساسیت را به تغییرات دمای سطح زمین و شار گرمایی محسوس داشته است.

اواسط فصل رشد گیاه و همزمان با سایه اندازی گیاه روی خاک، الگوریتم SEBAL توانسته با دقت مناسبی مرز میان زمین‌های کشاورزی را تفکیک و در واقع اثر زمین‌های بایر و یا جاده‌های دسترسی را نیز لحاظ کند. در حالی که در روش‌های تجربی و ترکیبی از داده‌هایی استفاده می‌شود که عموماً تحت تأثیر اراضی بایر اطراف آن‌ها، بیان‌کننده شرایط کلی منطقه و به‌ویژه اراضی کشاورزی نیستند؛ لذا برای استفاده از روش‌های تجربی در سطوح وسیع در شرایطی که پراکندگی و تعداد ایستگاه‌های هواشناسی مناسب است، می‌توان از اطلاعات چند ایستگاه به‌طور همزمان استفاده کرد.

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، حجم تبخیر- تعرق گیاه برنج در طول فصل کشت با استفاده از روش‌های مختلف بین ۶۱۰۰ تا ۸۶۰۰ مترمکعب بر هکتار برآورد شده است. برخی منابع و پژوهش‌ها، مقادیر نیاز آبی برنج را بر اساس محاسبات بین ۹۵۰۰ تا ۱۵۰۰۰ مترمکعب بر هکتار لحاظ کرده‌اند (فرشی، ۱۳۷۸؛ سرحدی و همکاران، ۱۳۸۵؛ امامی‌حیدری و همکاران، ۱۳۹۳). این اختلاف می‌تواند ناشی از دو عامل باشد: عامل اول، طول دوره کشت، برنامه‌های محاسبه نیاز آبی یا جدول‌های موجود طول دوره کشت را حدود ۱۴۰ روز در نظر گرفته است که

جدول ۳- حساسیت مدل به تغییر در پارامترهای اصلی الگوریتم

پارامتر	درصد تغییر	تغییرات مقدار تبخیر- تعرق در هر تصویر								
		۱ خرداد	۱۷ خرداد	۲ تیر	۱۸ تیر	۳ مرداد	۱۹ مرداد	۴ شهریور	۲۰ شهریور	
آلبیدوی سطحی	+۵	۸/۸	۷/۴	۷/۴	۹/۲	۶/۸	۱	۶/۶	۴/۴	۶/۴۵
	-۵	-۴	-۴/۸	-۷	-۸/۸	-۷	-۱	-۵/۸	-۴/۶	-۵/۴
دمای سطح زمین	+۵	۵/۸	۵	۴/۲	۴/۲	۳	۲/۲	۲/۶	۲/۶	۳/۷
	-۵	-۱/۲	-۲/۴	-۴	-۴	-۳	-۲	-۲/۴	-۲/۴	-۲/۷
شار تابشی خالص	+۵	-۱۱/۶	-۱۱/۸	-۱۲/۶	-۲۱/۲	-۱۱	-۱۱	-۹/۶	-۹	-۱۲/۲
	-۵	۱۱/۴	۱۱/۸	۱۲/۵	۱۶	۱۱	۱۱/۲	۱۰	۸/۸	۱۱/۶
شار گرمایی محسوس	+۵	۴/۴	۴/۵	۵	۵/۲	۳/۶	۵/۶	۳/۸	۳	۴/۴
	-۵	-۴/۴	-۴/۶	-۴/۸	-۴	-۳/۶	-۳/۶	-۳/۴	-۲/۴	-۳/۸

### نتیجه‌گیری

مناسبی در مقایسه با روش‌های تجربی و محاسباتی، مقادیر تبخیر- تعرق را در منطقه مورد مطالعه برآورد کرده است. مقادیر برآورد شده در سطح مزرعه نشان داده است که مدل SEBAL بیشترین مقدار تبخیر- تعرق را در تصویر تاریخ ۳ مرداد محاسبه کرده؛ اما در تمامی

با توجه به مشکلاتی که در روش‌های بیلان رطوبتی (مثل نقطه‌ای بودن، زمان‌بر بودن، هزینه بالا، آسیب دیدن گیاهان و درختان، نیاز به ابزار دقیق) وجود دارد، الگوریتم SEBAL جایگزین روش‌های مرسوم شده و با دقت



- برآورد تبخیر تعرق در منطقه کرج، نشریه آب و خاک. ۲۶(۶): ۱۳۶۰-۱۳۷۱.
۴. رضایی ع. صداقت م. عربزاده ع. و سیاری ن. ۱۳۹۵. تأثیر روش‌های نوین آبیاری بر عملکرد و اجزای گیاه برنج. مجله مدیریت آب و آبیاری. ۶: ۱۹۳-۲۰۴.
۵. سرحدی ع. سلطانی س. و پورمنافی س. ۱۳۸۵. مقایسه نیاز آبی برنج و سایر محصولات زراعی در منطقه اصفهان جهت مدیریت بهینه منابع آب. کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، بهمن ماه، تهران.
۶. عظیمی ع. رنگرن ک. کابلی زاده م. و خرمیان م. ۱۳۹۴. برآورد تبخیر- تعرق با استفاده از سنجش از دور، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مقایسه نتایج آن با روش پنمن- مانیتث- فائو در باغات مرکبات خوزستان. مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در علوم منابع طبیعی. ۶: ۶۱-۷۵.
۷. علیزاده ا. ۱۳۸۱. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۷۳۵ ص.
۸. علیزاده ا. کمالی غ. خان جانی م. و رهنورد م. ۱۳۸۳. ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر- تعرق در نواحی خشک ایران. مجله تحقیقات جغرافیایی. ۱۱: ۸۷-۱۰۴.
۹. فاطمی ب. و رضایی ی. ۱۳۹۱. مبانی سنجش از دور. انتشارات آزاده. ۲۸۸ ص.
۱۰. فرشی ع. ۱۳۷۸. برآورد آب مورد نیاز گیاهان عمده زراعی و باغی کشور. انتشارات مؤسسه تحقیقات آب و خاک، جلد اول. ۳۳۳ ص.
۱۱. کرباسی م. مقدم م. نیکبخت ج. و کاویانی ع. ۱۳۹۵. برآورد تبخیر- تعرق واقعی گیاه با استفاده از الگوریتم SEBAL (مطالعه موردی منطقه خرم دره در استان زنجان). مجله اکوهیدرولوژی. ۳: ۴۲۸-۴۳۷.
۱۲. هژیر ح. معاضد ه. و شکری کوچک س. ۱۳۹۳. برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از مدل‌های تجربی، مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه با داده‌های لایسیمتری در ایستگاه کهرپز ارومیه. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۱۵: ۱۳-۲۵.

روش‌های تجربی حداکثر تبخیر- تعرق مربوط به تاریخ ۱۸ تیر بوده است. دلیل بیشتر بودن مقدار تبخیر- تعرق در تاریخ ۳ مرداد، ازدیاد پوشش گیاهی در مزارع آبی نسبت به تاریخ ۱۸ خرداد است که در محاسبات مربوط به مدل SEBAL تأثیر گذاشته است؛ اما در روش‌های تجربی میزان پوشش گیاهی تأثیری ندارد. از میان روش‌های تجربی با در نظرگیری سه پارامتر ارزیابی یاد شده، دو روش هارگریوز- سامانی و بلانی کریدل در منطقه مورد مطالعه و برای گیاه برنج، روش‌هایی بوده‌اند که همبستگی بیشتری با داده‌های SEBAL داشته‌اند. به‌طور کلی مقایسه نتایج SEBAL با مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل نشان داده که این الگوریتم کارایی و دقت قابل قبولی در برآورد تبخیر- تعرق در مزارع کشت غرقابی داشته است.

بر اساس نتایج حاصل از مدل SEBAL، حجم تبخیر- تعرق گیاه برنج در طول فصل کشت آن حدود ۸۶۰۰ مترمکعب بر هکتار بود که با نتایج سایر پژوهش‌گران متفاوت است. این تفاوت می‌تواند ناشی از دو عامل تفاوت بین طول دوره کشت رایج منطقه با مطالعات پیشین و در نظر نگرفتن قطع آبیاری در انتهای دوره در مطالعات پیشین باشد. گفتنی است که با توجه به گرمایش زمین و افزایش متوسط دماهای هوا در فصل کشت، این افزایش دما می‌تواند روی کاهش دوره کشت اثرگذار باشد که این موضوع نیازمند بررسی بیشتر است. متأسفانه در سال مطالعه، به دلیل ممنوعیت کشت برنج، امکان اندازه‌گیری مزرعه‌ای میسر نشد، بنابراین با توجه به عدم تطابق نتایج پژوهش‌های مختلف، تعیین نیاز آبی برنج نیازمند مطالعات بیشتر به‌ویژه اندازه‌گیری مستقیم مزرعه‌ای است.

## منابع

۱. اسدی ر. رضایی م. و معتقد م. ۱۳۸۳. راه‌حل ساده برای مقابله با خشکسالی‌ها در شالیزارهای مازندران. فصلنامه علمی- ترویجی خشکی و خشکسالی کشاورزی. ۱۴: ۸۷-۹۰.
۲. امامی حیدری ح. جعفری ه. و کرمی غ. ۱۳۹۳. نقش مدیریت کشاورزی در تداوم جریان زاینده‌رود. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸: ۱۰۹۵-۱۱۰۶.
۳. حسن‌پور ب. میرزایی ص. و کوثری ه. ۱۳۹۱. مقایسه الگوریتم‌های SEBAL و S\_SEBI در

25. Suleiman A. A. Bali K. M. and Kleissi A. 2009. Comparison of ALARM and SEBAL evapotranspiration of irrigated Alfalfa. *Journal of Hydrometeorology*. 35: 411-424.
26. Yonggwan L. Seongjoon K. 2017. The modified SEBAL for mapping daily spatial evapotranspiration of South Korea using three flux towers and Terra MODIS data. *Remote Sensing*. 8: 66-75.
۱۳. ولی‌زاده کامران خ. ۱۳۹۱. برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی به روش استفتن با استفاده از GIS. نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی. ۱۸: ۳۱۷-۳۳۴.
14. Bastiaanse W. Menenti M. Feddes R. A. and Holtslag A. A. M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology*. 64: 198-213.
15. Bastiaanse W. 2000. SEBAL- based Sensible and Latent Heat Fluxes In the Irrigated Gediz Basin. *Journal of Hydrology*. 229: 87-100.
16. Bastiaanse W. Noordman E. Pelgrum H. Davids G. Thoreson B. and Allen R. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resource management under Actual Field Condition. *Journal of Irrigation and drainage Engineering*. 131: 85-93.
17. Jackson R. D. and Reginato R. J. 1977. Remote sensing of crop yields. *Journal of Water Resource and Protection*. 196: 19- 25.
18. Jana C. Rawat M. Sena D. R. Alam N. M. Mandal U. and Mishra P. K. 2016. Application of SEBAL model to estimate evapotranspiration in Doon Valley, India. *Indian Journal of Soil Conesevation*. 44: 191-197.
19. Jewitt G. 2006. Integrating blue and green water flows for water resource management. *Journal of Physics, Chemistry of the Earth*. 31: 753- 762.
20. Kamali M. E. and Nazari R. 2018. Determination of Maize Water Requirement Using Remote Sensing Data and SEBAL Algorithm. *Agriculture Water Management*. 209: 197-205.
21. Liou Y. Liu S. and Wang W. 2002. Retrieving Soil Moisture from Simulated Brightness Temperatures by a Natural Network. *Journal of Remote Sensing*. 39: 1662-1673.
22. Liou Y. and Kumar kar S. 2014. Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithm. *Journal of Energies*. 7: 2821- 2849.
23. Medina J. L. Camacho E. and Reza J. 1998. Determinization and Analysis of regional evapotranspiration in southern Spain based on remote sensing and GIS. *Physics and Chemistry of the Earth*. 34: 427-432.
24. Schirmbeck J. Fontana D. Roberti R. and Schirmbeck L. 2017. Energy Balance from Images in Humid Climate – SEBAL and METRIC. *Agrometeoros Journal*. 25: 383-393.