

ارزیابی الگوریتم سنجش از دور SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه)

محمد حسین باقری هارونی^۱، سعید مرید^{۲*} و صالح ارشد^۳

چکیده

تبخیر و تعرق واقعی یکی از مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر مدیریت آب بخش کشاورزی است که برآورد آن به‌ویژه در سطح‌های وسیع، مشکلات اجرایی خاص خود را دارد. در دهه‌های اخیر بررسی‌های زیادی در زمینه برآورد این متغیر با فناوری سنجش از دور انجام شده که بیشتر بر مبنای بیلان انرژی سطح زمین استوار هستند. از مطرح‌ترین الگوریتم‌ها در این زمینه، SEBAL است که پیاده‌سازی آن نیاز به شناخت قابلیت‌ها و کارایی آن در کاربری‌های مختلف است. هدف مهم حاضر این است که با به‌کارگیری الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره Terra (سنجنده MODIS) برای دوره زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی به صورت ماهانه برآورد شود. منطقه مطالعاتی حوضه دریاچه ارومیه است که با توجه به تنوع کاربری آن، مقدار تبخیر و تعرق واقعی به صورت مجزا برای کاربری‌های مختلف شامل کشت‌های آبی، دیم، شوره‌زارها و پیکره‌های آبی برآورد شد. نتایج پژوهش و مقایسه با مقادیر مشاهداتی، نشان از دقت مناسب مدل در زمین‌های کشاورزی آبی (ضریب تبیین ۰/۸۴) و همچنین پیکره‌های آبی (ضریب تبیین ۰/۸۴) دارد اما در شوره‌زارها، زمین‌های دیم و مراتع مدل با ضعف روبروست.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق واقعی، سنجش از دور، SEBAL، MODIS.

ارجاع: باقری هارونی م. ح. مرید س. و ارشد ص. ۱۳۹۴. ارزیابی الگوریتم سنجش از دور SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه). مجله پژوهش آب ایران. ۱۶: ۱۰۱-۱۱۰.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان.

* نویسنده مسئول: s_morid@hotmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۱۲

مقدمه

بررسی‌های مدیریت آب کشاورزی به اطلاعات دقیقی از تبخیر و تعرق واقعی نیاز دارد. این اطلاعات باید دارای جزئیات مکانی کافی باشد تا بتوان تحلیل‌ها را در سطح مزرعه و یا حوضه انجام داد (سانچز و همکاران، ۲۰۰۸). در این زمینه، به تخمین میزان تبخیر و تعرق بر مبنای رابطه‌های تجربی، همیشه توجه شده است (آلن و همکاران، ۲۰۰۷). مبنای بیشتر روش‌های ارائه شده، بر پایه رابطه‌های بین پارامترهای هواشناسی است که کمبود و یا نقصان این داده‌ها، استفاده از آن‌ها را با محدودیت روبرو می‌کند. از طرفی این اطلاعات، نقطه‌ای و مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی است و برآورد منطقه‌ای آن‌ها مشکل دیگری است که عدم قطعیت‌های خاص خود را دارد. بدین منظور استفاده از فناوری سنجش از دور و تصویرهای ماهواره‌ای، می‌تواند رویکرد مناسبی برای پاسخ به این محدودیت‌ها باشد. تبخیر و تعرق واقعی را می‌توان با تصویرهای ماهواره‌ای که دارای طول موج‌های کوتاه و بلند هستند و با کاربرد معادلات بیلان انرژی سطحی برآورد کرد (چی‌هدا و همکاران، ۲۰۱۰). از نمونه الگوریتم‌های مطرح می‌توان به مدل‌های SEBAL (بستینسن و همکاران، ۱۹۹۸ و بستینسن، ۲۰۰۰)، METRIC (الن و همکاران، ۲۰۰۷)، SEBS (سو، ۲۰۰۲) و TSEB (نورمن و همکاران، ۱۹۹۵ و کوستاس و نورمن، ۱۹۹۷) اشاره کرد. از این بین، به الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL)، توجه بیشتری شده است (باقری هارونی و همکاران، ۱۳۹۱ و تیکسریا و همکاران، ۲۰۰۹). از کارهای بنیادی در این مورد، پژوهش بستینسن و همکاران (۱۹۹۸) بود که از اطلاعات موجود تبخیر و تعرق مزرعه‌ها در مقیاس بزرگ در کشورهای چین، هند، اسپانیا و پاکستان استفاده کردند. نتایج نشان داد که در ۸۵ درصد موردها، داده‌های حاصل از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین با داده‌های مزرعه‌ای بدون هیچ‌گونه واسنجی هماهنگی داشته است. همچنین آن‌ها در پژوهشی دیگر، نتایج تبخیر و تعرق واقعی حاصل از SEBAL را با مدل شبیه‌سازی بیلان آب در دلتای رود مصر با ۷۰۰۰۰۰ هکتار زمین‌های آبیاری مقایسه و اختلاف حدود ۵ درصد را گزارش کردند. تیکسریا و همکاران (۲۰۰۹) برای برآورد مقادیر روزانه تبخیر و تعرق واقعی از این روش استفاده و برای واسنجی و صحت‌سنجی آن از چهار برج سنجش

انرژی و هفت ایستگاه هواشناسی در حوضه‌ای در برزیل استفاده کردند. نتایج نشان دهنده مقادیر پایین خطا (RMSE برابر با ۰/۳۸ میلی‌متر در روز) این مدل بود. سان و همکاران (۲۰۱۱) SEBAL را با استفاده از تصویرهای لندست برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف و برای حوضه دریاچه ناسی در چین پیاده‌سازی و نتایج مثبتی را از آن گزارش کردند. در زمینه کارهای انجام شده در کشور ایران روی مدل SEBAL، مباحثی و همکاران (۱۳۸۶) با تصویرهای MODIS و الگوریتم SEBAL، مقدار تبخیر و تعرق واقعی برای محدوده مزرعه نمونه ارتش در استان گلستان در دو تاریخ ۱۵ اردیبهشت و ۱۷ خرداد سال ۱۳۸۲ برآورد کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از باندهای ۱ تا ۵ و ۷ تصویر MODIS، برآورد دقیق‌تری از آلبیدوی سطحی به دست می‌آید. در راستای به کارگیری مدل SEBAL، نوری (۱۳۸۹) با استفاده از تصویرهای سنجنده MODIS و به کارگیری الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (SEBAL)، توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی روزانه در منطقه مشهد در روزهای ۱۴ خرداد، ۱۰ تیر و ۴ مرداد سال ۱۳۸۸ را تهیه کرد. نتایج حاصل نشان داد که تصویرهای سنجنده MODIS و الگوریتم SEBAL می‌توانند مقدار تبخیر و تعرق واقعی را در مقیاس روزانه در منطقه مشهد به خوبی برآورد کنند. در زمینه ارزیابی مدل SEBAL و مقایسه آن با اطلاعات زمینی، باقری هارونی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده لایسیمتری برای ۶ گذر سنجنده MODIS در مزرعه کشاورزی دانشگاه تبریز، دقت مدل را حدود ۸۰ درصد در سطح مزرعه کشاورزی برآورد کردند. همچنین در این پژوهش مدل SEBAL، با سایر مدل‌های سنجش از دور مطرح مانند METRIC و TSEB، مقایسه شد و مدلی مناسب برای به کارگیری در سطح مزرعه‌های کوچک و در سطح مقیاس‌های بزرگ‌تر گزارش شد. در این پژوهش، تلاش شده است تا مدل SEBAL در سطح حوضه‌ای ارزیابی شود. بدین منظور با استفاده از تصویرهای سنجنده MODIS برای دوره زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸، مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده است. منطقه مطالعاتی حوضه دریاچه ارومیه است و با توجه به تنوع کاربری زمین‌ها در آن، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برای زمین‌های کشاورزی به صورت جداگانه برای کشت‌های آبی و دیم و همچنین برای پیکره‌های

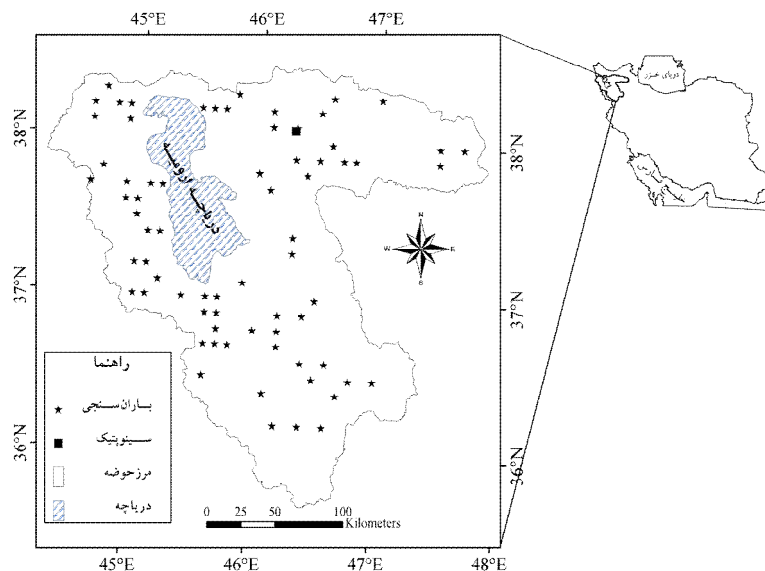
نصف‌النهار ۱۳° ۴۴' تا ۵۳° ۴۷' شرقی در شمال غرب ایران قرار دارد (شکل ۱). مقادیر سالانه بارندگی در سطح حوضه از ۳۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و اقلیم بیشتر بخش‌ها نیمه‌خشک است. از نظر توپوگرافی حدود ۳۳۴۷۰ کیلومترمربع آن را منطقه‌های کوهستانی، ۱۲۵۶۰ آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها و ۵۳۲۰ کیلومترمربع آن را دریاچه ارومیه تشکیل می‌دهد.

آبی شامل دریاچه ارومیه و مخزن‌های موجود در حوضه ارزیابی می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و داده‌ها

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعتی برابر ۵۱۷۰۰ کیلومترمربع بین مدارهای ۴۰° ۳۵' تا ۲۹° ۳۸' شمالی و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه دریاچه ارومیه

۱۴ به وقت محلی از ایران عبور می‌کند (نوری، ۱۳۸۹). فاصله‌های زمانی گذر آن‌ها در روز در میان است. کلیه تصویرهای مورد نیاز این پژوهش از باندهای ۱ و ۲ (۲۵۰ متر)، ۳ تا ۷ (۵۰۰ متر) و باندهای حرارتی ۳۱ و ۳۲ (۱۰۰۰ متر) تهیه شد. برای برآورد تبخیر و تعرق ماهانه و مدل‌سازی‌های ماهانه، به ازای هر ماه از سال یک تصویر تهیه و زمین مرجع شد.

الگوریتم^۴ SEBAL

الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین یا SEBAL در حقیقت شار گرمای نهان که به مصرف تبخیر و تعرق می‌رسد را بر اساس مقدار باقیمانده انرژی از معادله زیر تعیین می‌کند (بستینسن و همکاران، ۱۹۹۸):

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

در رابطه بالا، ET تبخیر و تعرق، λ گرمای نهان تبخیر، R_n تابش خالص خورشید، H شار گرمای محسوس و G شار

برای اجرای مدل SEBAL نیاز به محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه و ساعتی است که بدین منظور اطلاعات لازم شامل دمای کمینه و بیشینه، نقطه شبنم، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعت‌های روشنایی از ایستگاه سینوپتیک تبریز برای دوره زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ تهیه شد. برای برآورد تغییرات مکانی بارندگی نیز آمار ۷۴ ایستگاه بارندگی که دارای قدمت بودند، استفاده شد (شکل ۱). در ادامه داده‌های ماهواره‌ای از سنجنده^۱ MODIS تهیه شد. این سنجنده با دارا بودن ۳۶ باند می‌تواند اطلاعات دریافتی از سطح زمین را در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر و با عرض پوشش ۲۳۳۰ کیلومتر ثبت نماید. قدرت تفکیک مکانی باندهای مذکور از ۲۵۰ متر تا ۱۰۰۰ متر متغیر است. سنجنده MODIS بر روی دو ماهواره ترا^۲ و آکوا^۳ نصب شده است که به طور معمول ترا بین ساعت‌های ۱۰ تا ۱۱ صبح و آکوا بین ساعت‌های ۱۳ تا

1- MODerate resolution Image Spectroradiometer

2- Terra

3- Aqua

4- Surface Energy Balance Algorithm

ارومیه، رابطه‌های شار گرمای خاک تعدیل شده است (جدول ۱).

جدول ۱- رابطه‌های شار گرمای خاک برای سطح‌های برف و آب (کالیبره شده برای حوضه مطالعاتی (باقری هارونی، ۱۳۹۰))

کاربری	شار گرمای خاک
برف	$G=0.5R_n$
آب (عمق < ۲)	$G_{water}=0.46 R_n$ شهریور $G_{water}=0.6 R_n$ سال
آب (عمق > ۲)	$G_{water}=0.39 R_n$ شهریور $G_{water}=0.53 R_n$ سال

شار گرمای محسوس (H)

شار گرمای محسوس میزان هدر رفت انرژی (یا گرما) است که در اثر اختلاف دما به هوا منتقل می‌شود:

$$H = \rho C_p \frac{T_0 - T_{air}}{R_{AH}} \quad (4)$$

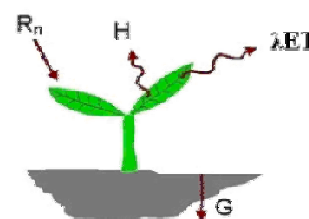
در رابطه بالا T_0 دمای آیرودینامیک سطح، T_{air} دمای هوا (کلوین)، ρ_{air} چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($J/kg/K$) و R_{AH} مقاومت آیرودینامیکی هوا (s/m) است. اندازه‌گیری یا برآورد دمای آیرودینامیک، در عمل غیرممکن و پیچیده بوده پس مدل‌های مختلف، الگوریتم‌های متفاوتی را برای برآورد اختلاف دمای هوا و سطح (dT) به کار می‌برند. در SEBAL، برای برآورد dT از یک فرآیند تکراری استفاده می‌شود 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 پیکسل‌های تصویر اعمال می‌شود (بستینسن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$dT = aT_s + b \quad (5)$$

در محاسبه مقاومت آیرودینامیکی نیاز به برآورد طول زبری مومنتوم (Z_{om}) است که در حال کلی به‌عنوان کسری از شاخص سطح برگ (LAI) در نظر گرفته می‌شود از آنجایی که برای برف و آب LAI در عمل صفر می‌باشد، از مقادیر جدول ۲ استفاده می‌شود.

مراحل بالا در مدلی که بدین منظور در محیط نرم‌افزاری ENVI کدنویسی و توسعه یافته است (باقری هارونی، ۱۳۹۰) به انجام رسید. از امکانات مهم این نرم‌افزار، امکان کدنویسی با محیط برنامه‌نویسی موسوم به IDL است که

گرمای خاک است (تمامی اجزای معادله بالا بر حسب W/m^2 هستند). شکل ۲ نمایی از نحوه توزیع اجزای بیلان انرژی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شماتیک نحوه توزیع اجزاء بیلان انرژی

شار تابش خالص (R_n)

در رابطه ۱، فرآیند محاسباتی R_n براساس اختلاف بین جریان تابش‌های فرودی و بازتابیده بوده و معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین است (رابطه ۲).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

در رابطه بالا، α آلبیدوی سطحی، $R_{S\downarrow}$ تابش موج کوتاه (0.3 تا 3 میکرومتر) فرودی (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند (3 تا 100 میکرومتر) فرودی (W/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند بازتابیده (W/m^2) و ϵ_0 گسیلمندی سطحی پهن باند است.

شار گرمای خاک (G)

شار گرمای خاک میزان ذخیره گرمای داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی است که براساس رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$G = R_n \times \frac{T_s}{\alpha} [0.0032\alpha + 0.0062\alpha^2] \times [1 - 0.978 NDVI^4] \quad (3)$$

در رابطه بالا، T_s دمای سطحی ($^{\circ}C$)، α آلبیدوی سطحی، NDVI شاخص پوشش گیاهی و R_n تابش خالص خورشیدی است. این رابطه عملکرد خوبی در زمین‌های کشاورزی دارد، اما تأثیر زیاد آلبیدوی سطحی و شاخص سطح برگ (LAI)^۱ در آن، برای منطقه‌های با پوشش آب و برف (که مقادیر LAI صفر بوده و نیز مقادیر آلبیدو شرایط حدی دارد) این رابطه را با مشکل روبرو می‌کند و از دقت آن کم می‌کند (بستینسن و همکاران، ۲۰۰۲). بدین منظور براساس پژوهش باقری هارونی (۱۳۹۰) برای آب عمیق و کم عمق و نواحی برفی برای حوضه دریاچه

1- Leaf Area Index

پایاده‌سازی الگوریتم‌های چند مرحله‌ای روی تصویرهای ماهواره‌ای را فراهم می‌کند.

جدول ۲- مقادیر طول زبری مومنتوم (Z_{om}) برای سطح‌های برف و آب (بستینسن و همکاران، ۲۰۰۲)

پوشش سطح	Z_{om}
برف	$Z_{om}=0.0005$
آب (عمق $< 2m$)	$Z_{om}=0.0005$
آب (عمق $> 2m$)	$Z_{om}=0.005$

نتایج و بحث

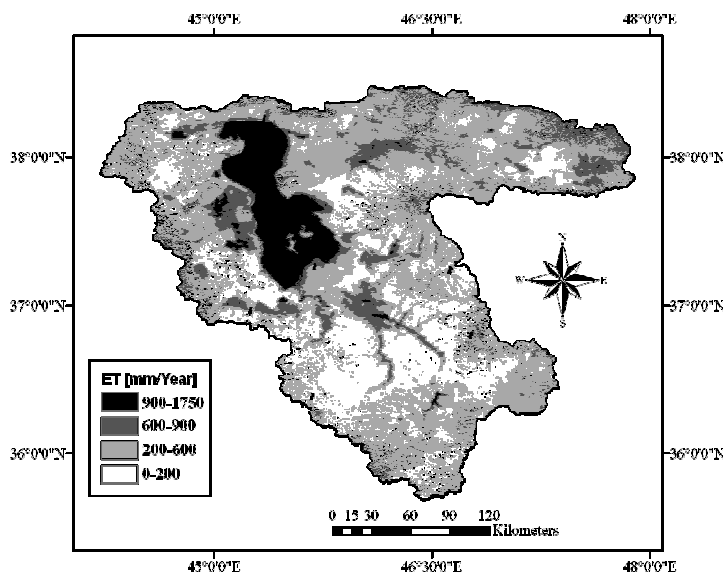
الگوریتم SEBAL برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی به صورت ماهانه و برای دوره زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ میلادی اجرا شد. بدین منظور برای هر ماه از سال، تصویرهای سنجنده MODIS آماده و سپس مقادیر تبخیر و تعرق واقعی به تفکیک هر ماه به دست آمد و با جمع مقادیر ماهانه، مقادیر سالانه برآورد شد. برای برآورد تبخیر و تعرق روزانه از تبخیر و تعرق لحظه‌ای ماهواره، از نسبت تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه به ساعتی استفاده شد. بدین منظور تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی (میلی‌متر در ساعت) در لحظه گذر ماهواره (ET_{r-inst}) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه بر حسب میلی‌متر در

روز (ET_{r-24}) برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه از روش پنمن-مانتیت-فانو محاسبه شد. سپس از رابطه زیر، میزان تبخیر و تعرق واقعی روزانه الگوریتم‌های ماهواره‌ای (ET_{act-24}) بر حسب میلی‌متر در روز برآورد شد (بستینسن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad (6)$$

با توجه به آنچه گفته شد، برای دوره مطالعاتی (۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸) نقشه‌های تبخیر و تعرق سالانه برآورد شد. به‌عنوان نمونه شکل ۳، مقادیر سالانه این متغیر را در سال ۲۰۰۸ نشان می‌دهد.

برای این پژوهش، چهار کاربری زمین‌های عمده منطقه شامل: (۱) پیکره‌های آبی شور و شیرین، (۲) زمین‌های فاریاب، (۳) دیم و (۴) شوره‌زارهای اطراف دریاچه بررسی شده است. بدیهی است که به دلیل عدم وجود اندازه‌گیری‌های زمینی، امکان مقایسه مستقیم وجود ندارد و در این مورد از اطلاعات کمکی استفاده شد. از جمله این اطلاعات، مقادیر بارندگی این دوره بود که با توجه به کاربری زمین‌های مورد بررسی، برای محدوده آن با استفاده از نقشه‌های مکانی بارندگی (براساس ۷۴ ایستگاه) قابل بهره‌برداری است.



شکل ۳- توزیع پراکندگی تبخیر و تعرق واقعی حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۰۲

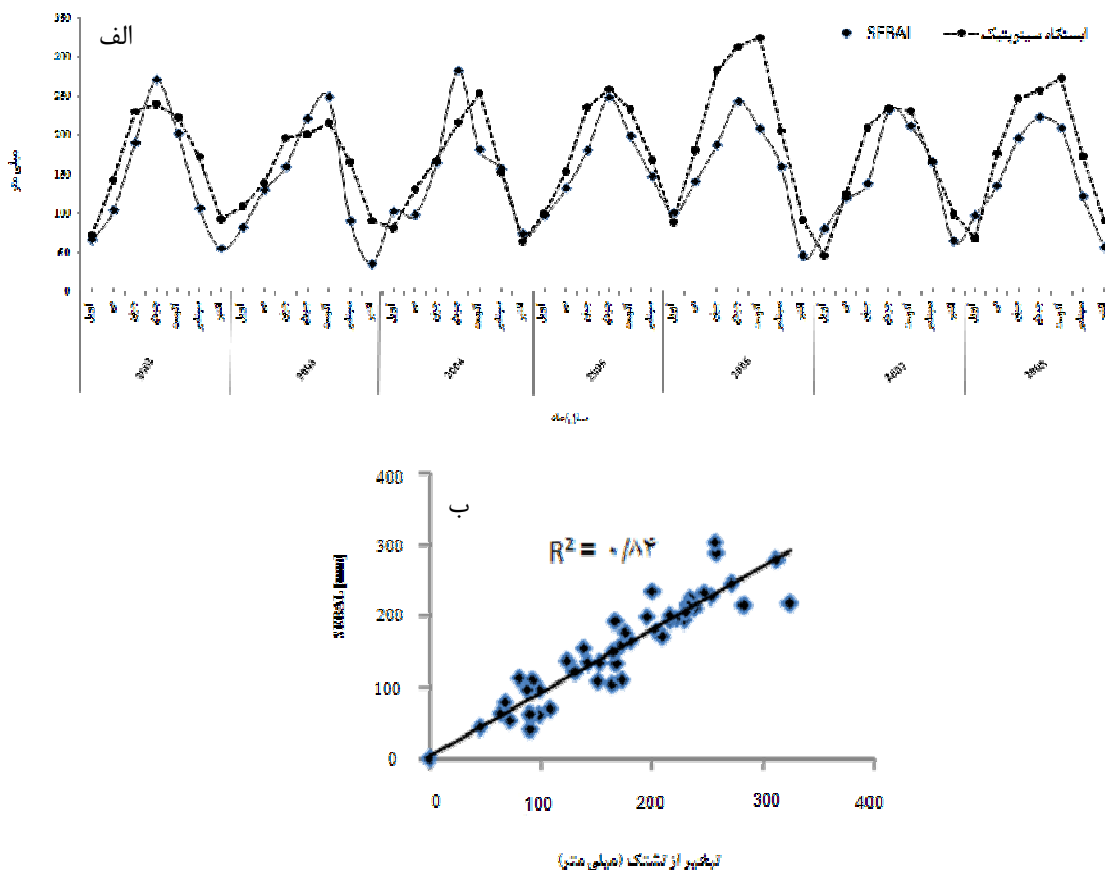
تغییراتی در آن ایجاد شد و با توجه به عمق پایین آب در دریاچه ارومیه، ضریب‌های ویژه توسعه و واسنجی شد. در همین راستا، برای جداسازی و تفکیک نتایج مربوط به

مقادیر ماهانه تبخیر برای پیکره‌های آبی

همان‌طور که در قبل نیز بیان شد، برای به‌کارگیری الگوریتم SEBAL برای برآورد تبخیر از پیکره‌های آبی،

حوضه، از مقادیر مشاهداتی جداگانه برای آن‌ها استفاده شده است. در این خصوص برای آب شیرین، ایستگاه سینوپتیک تکاب در کنار سد زرینه رود (با اعمال ضریب تشتک ۰/۶۸ براساس بررسی‌های باقری هارونی (۱۳۹۰)) و برای دریاچه ارومیه، از مقادیر تشتک تبخیر آب شور ایستگاه تبخیر سنجی گلمنخانه استفاده و نتایج مقایسه شدند. نتایج این بخش به تفکیک در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند.

پیکره‌های آبی از سایر کاربری‌های حوضه، با توجه به اینکه شاخص NDVI در این پیکره‌ها دارای مقادیر منفی است، نقشه مربوط به این نواحی تهیه شد. این مراحل برای هر تصویر (هر ماه) به طور جداگانه، انجام و در نهایت نتایج مربوط به تبخیر از پیکره‌های آبی برای محدوده زمانی پژوهش (۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ میلادی) در نظر گرفته شد. با توجه به شور بودن دریاچه ارومیه و از طرفی مخزن‌های آب شیرین (مانند سد زرینه‌رود) در سطح



شکل ۴- الف) مقادیر ماهانه تبخیر از مخزن سد زرینه‌رود حاصل از الگوریتم SEBAL و مقادیر تشتک تبخیر ایستگاه تکاب، ب) نمودار پراکنده‌گی مقادیر تبخیر از تشتک و تبخیر برآورد شده از سد زرینه رود حاصل از الگوریتم

مشاهداتی ایستگاه گلمنخانه با فقدان داده زیادی در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵ روبرو بوده و در این مقایسه فقط از داده‌های سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ استفاده شده است.

مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق واقعی برای زمین‌های کشاورزی باغی-زراعی

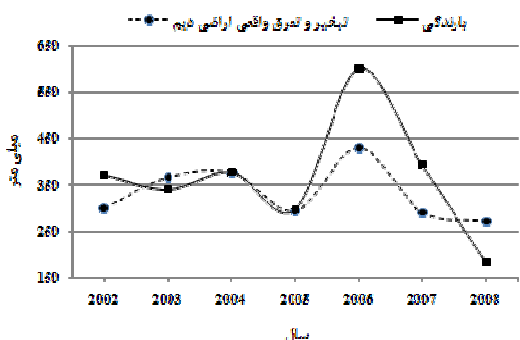
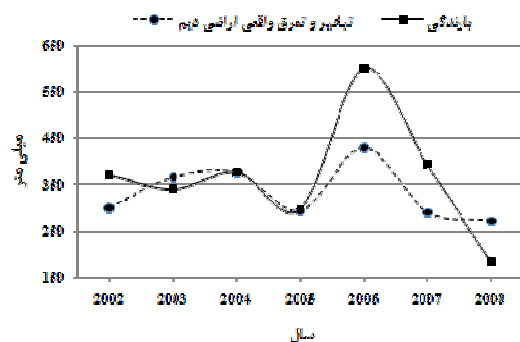
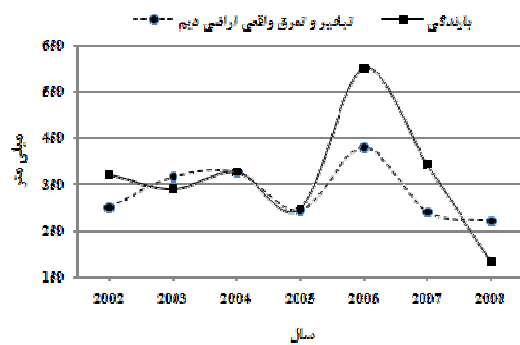
بیش از ۴۶۰۰ کیلومترمربع از سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه شامل زمین‌های باغی و زراعی است که همانند

مقدار ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۸۴ نشان از دقت خوب الگوریتم SEBAL در برآورد تبخیر از آب شیرین مخزن‌های آبی دارد. البته با توجه به اینکه به طور معمول در ایستگاه‌های سینوپتیک مقادیر تشتک در ماه‌های سرد سال (نوامبر تا می) اندازه‌گیری نشده بود، در این مقایسه فقط ماه‌های دارای آمار مقایسه شده است.

شکل ۵ نیز مربوط به ارزیابی تبخیر برآورد شده از سطح دریاچه ارومیه و مقادیر تشتک تبخیر آب شور ایستگاه گلمنخانه است. این نکته قابل ذکر است که مقادیر

کشت می‌شوند (بی‌نام، ۱۳۸۹). به همین دلیل در اجرای الگوریتم SEBAL تلاش شد، پیکسل‌های سرد و گرم به گونه‌ای انتخاب شوند که مقادیر واقعی‌تری از تبخیر و تعرق این زمین‌ها برآورد گردد.

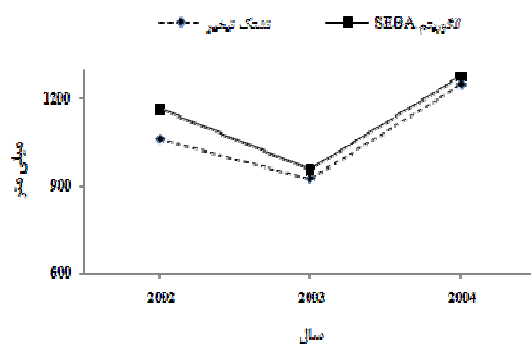
شکل ۷ تغییرات سالانه بارندگی و تبخیر و تعرق واقعی را از زمین‌های دیم نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود، تغییرات سالانه تبخیر و تعرق در زمین‌های دیم، روند مشابهی با تغییرات بارندگی دارد. بدیهی است که تبخیر و تعرق در زمین‌های دیم باید کمتر از بارندگی باشد هرچند در بیشتر سال‌های دوره پژوهش این مورد وجود دارد. اما در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۸ تبخیر و تعرق زمین‌های دیم بیش از مقادیر بارندگی در این سال‌هاست که این تناقض را می‌توان به‌عنوان ضعف الگوریتم SEBAL در زمین‌های دیم به حساب آورد.



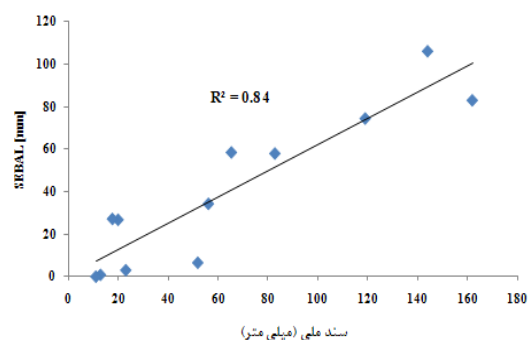
شکل ۷- مقادیر سالانه تبخیر و تعرق واقعی برای کاربری‌های مختلف

سطح‌های آبی، پلیگون مربوط به آن نیز تهیه شد. براساس پژوهش احمد (۲۰۰۲) شاخص NDVI بیش از ۰/۳ برای تفکیک این زمین‌ها توصیه شده است. قابل ذکر است که نتایج پژوهش فتحیان (۱۳۹۰) این عددها را برای حوضه ارومیه تأیید کرده است.

برای ارزیابی الگوریتم SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در این کاربری به‌دلیل نبود اطلاعات لایسِمتری، داده‌های تبخیر و تعرق ماهانه حاصل برای سال ۲۰۰۶ با نیاز خالص ماهانه آب آبیاری این زمین‌ها، براساس سند ملی آب مقایسه شد. انتخاب سال ۲۰۰۶ به‌دلیل بارندگی‌های بالا در این سال (۶۰۰ میلی‌متر در سال حوضه) بوده است. نتایج این مقایسه در شکل ۶ آمده است که نتایج رضایت‌بخشی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقادیر سالانه الگوریتم SEBAL برای تبخیر از دریاچه ارومیه و مقادیر تشتک آب شور ایستگاه گل‌منخانه



شکل ۶- مقایسه مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق واقعی در زمین‌های باغی-زراعی حاصل از الگوریتم SEBAL و مقادیر نیاز آبی خالص سند ملی در سال ۲۰۰۶

مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق واقعی برای زمین‌های کشاورزی دیم

با توجه به وضعیت اقلیمی منطقه و نوع توپوگرافی آن، حدود ۵۸۰۰ کیلومتر مربع از زمین‌های حوضه به‌طور دیم،

الگوریتم برای این زمین‌ها بین ۱۲۰۰ تا ۱۳۵۰ میلی‌متر تبخیر در دوره مورد بررسی‌ها است که مقادیر غیر واقعی و حتی بالاتر از پیکره‌های آبی حوضه هستند. دلیل ضعف SEBAL را در این برآورد می‌توان به آلبیدوی بالای این زمین‌های و تأثیر آن در برآورد غیرواقعی تابش خالص خورشیدی نسبت داد.

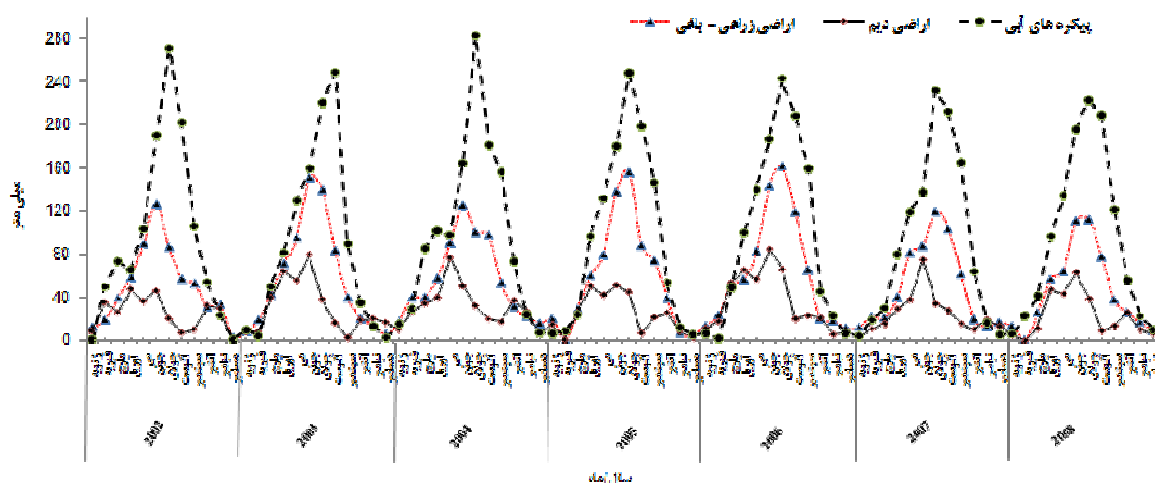
ارزیابی کلی نتایج ماهانه SEBAL

در پاره‌ای از پژوهش‌های ارزیابی عملکرد الگوریتم SEBAL برای کاربری‌های مختلف به دلیل نبود داده‌های مستقیم اندازه‌گیری شده، فقط به طور نسبی انجام شده است (نوری، ۱۳۸۹ و سان و همکاران، ۲۰۱۱). علاوه بر تحلیل‌های قبل، این رویکرد نیز در تفسیر نتایج این مقاله استفاده شد و در شکل ۸ قابل مشاهده هستند. رتبه نسبی کاربری‌ها و توزیع زمانی آن‌ها در این شکل دیده می‌شود.

این نکته نیز قابل ذکر است که با توجه به اینکه در حوضه مطالعاتی زمین‌های دیم و زمین‌های کشاورزی آبی به طور همزمان و در یک مرتبه اجرای الگوریتم SEBAL، برآورد می‌شوند، مقادیر تبخیر و تعرق در زمین‌های دیم کمی بیش از حالتی که فقط الگوریتم مذکور برای زمین‌های دیم اجرا گردد، حاصل می‌شود. هرچند که در این پژوهش تلاش شده است با سعی و خطای زیاد روی هر تصویر، پیکسل سرد و گرم و به‌ویژه پیکسل گرم به گونه‌ای انتخاب شوند که نتایج منطقی برای زمین‌های دیم و آبی به دست آید، اما در برخی از تصویرها برآورد بالایی از تبخیر و تعرق واقعی در زمین‌های دیم و مرتع دیده می‌شود.

مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در شوره‌زارها

سطح زیادی در اطراف دریاچه را شوره‌زارها تشکیل می‌دهد که در سال‌های اخیر نیز روند افزایشی دارند. نتایج



شکل ۸- مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق واقعی برای کاربری‌های مختلف

این بخش، با پژوهش اوانس و همکاران (۲۰۰۹) که در آن تبخیر حاصل از الگوریتم SEBAL برای دو دریاچه با مقادیر مشاهداتی مقایسه شده بود (ضریب‌های تبیین ۰/۸۴ و ۰/۸۰) هماهنگی دارد. به همین ترتیب این مقایسه برای آمار سه سال از تشتک آب شور ایستگاه گلمنخانه با مقادیر تبخیر از دریاچه با الگوریتم ماهواره‌ای انجام شد که از روند مشابهی پیروی می‌کردند.

• در زمین‌های باغی-زرعی نیز SEBAL نتایج مطلوبی را ارائه داد. مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی ماهانه در

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با به‌کارگیری الگوریتم SEBAL و استفاده از تصویرهای سنجنده MODIS برای دوره زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ به صورت ماهانه، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف حوضه آبریز دریاچه ارومیه بررسی شد. به طور کلی از تحلیل‌های انجام شده نتایج زیر به دست آمد:

• در پیکره‌های آبی نتایج الگوریتم دارای دقت بالایی بود. مقایسه تبخیر از مخزن سد زرینه رود با تشتک تبخیر مجاور آن ضریب تبیین ۰/۸۴ را نشان می‌دهد. نتایج

- زیرزمینی مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مهندسی منابع آب. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۴۵ ص.
۳. بی‌نام. ۱۳۸۹. بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور، مطالعات کشاورزی و اقتصاد تولید حوضه دریاچه ارومیه دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا. ۲۳۸۵۰۷۰ - ۴۱۴۰.
۴. فتحیان ف. ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات کاربری اراضی با استفاده از فن آوری سنجنش از دور و متغیرهای آب و هواشناسی در حوضه دریاچه ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مهندسی منابع آب. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۵۱ ص.
۵. مباحثی م. ر. خاوریان ح. ضیاییان پ و کمالی غ. ع. ۱۳۸۶. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره Terra سنجنده MODIS در منطقه عمومی گرگان. مجله مدرس علوم انسانی. ۱۱(۱): ۱۲۱-۱۴۲.
۶. نوری س. ۱۳۸۹. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال و سنجنده MODIS در زیر حوضه آبریز مشهد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مهندسی آب. دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۱۱ ص.
7. Ahmad M. D. 2002. Estimation of net groundwater use in irrigated river basins using geo-information techniques: A case study in Rechna Doab Pakistan. ITC Ph.D. dissertation. 161 p.
8. 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(4): 380-394.
9. Bastiaanssen W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin., Journal of Hydrology. 229(1): 87-100.
10. Bastiaanssen W. Menenti M. Feddes R. and Holtslag A. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. Journal of Hydrology. 213: 198-212.
11. Bastiaanssen W. G. M. Allen R. Tasumi M. Trezza R. and Waters R. 2002. SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land, Idaho Implementation, Advanced Training and Users Manual, Version 1.0, Funded by: a NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through The Idaho Department of Water Resources. 98 p.
12. Chihda Wu. Cheng C. Lo H. and Chen Y. 2010. Study on estimating the evapotranspiration cover coefficient for stream flow simulation

- زمین‌های باغی- زراعی (براساس سند ملی آب) و الگوریتم، ضریب تبیین معادل ۰/۸۴ نشان داد که دقت مناسب الگوریتم را نشان می‌دهد. نتایج این بخش با نتایج حاصل از پژوهش باقری هارونی (۱۳۹۰) و سانتوس و همکاران (۲۰۱۰) که مقادیر تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم را در مقایسه با مقادیر لایسیمیتری ارزیابی کرده بود، هماهنگی دارد.
- در زمین‌های دیم و مرتع با توجه به اینکه این کاربری هم‌زمان با دیگر کاربری‌ها شبیه‌سازی می‌شد، بعضی موارد برآوردهای بیش از مقدار واقعی مشاهده شد، بدین ترتیب که تبخیر و تعرق واقعی از کل ریزش‌های سالانه نیز بیشتر می‌شد که از ضعف‌های الگوریتم برای زمین‌های دیم است.
 - در شوره‌زارها برآورد الگوریتم بالا بود که دلیل آن را می‌توان به آلبیدوی بالای در آن‌ها نسبت داد.
 - در مجموع مقایسه نسبی نتایج و روند ماهانه برآوردهای تبخیر و تعرق واقعی در پیکره‌های آبی، زمین‌های کشاورزی خوب و حکایت از توانایی الگوریتم SEBAL دارد.
 - روند محاسباتی و رسیدن به نتایج، نشان داد که الگوریتم SEBAL دارای عدم قطعیت‌هایی است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نحوه انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم اشاره کرد که نیاز به مهارت و تجربه زیادی دارد و هرگونه اشتباه در آن کل برآوردها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.
 - به طور کلی بر اساس نتایج این پژوهش، الگوریتم SEBAL در زمین‌های کشاورزی آبی و پیکره‌های آبی دارای دقت خوبی است اما به کارگیری آن در سایر کاربری‌ها نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.

منابع

۱. باقری هارونی م. ح. ارشد ص. مجنونی ا. و مرید س. ۱۳۹۱. مقایسه مدل‌های سنجنش از دور تک منبعی و دو منبعی شار انرژی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت تبریز. نشریه سنجنش از دور و GIS ایران. ۱(۴): ۸۱-۹۶.
۲. باقری هارونی م. ح. ۱۳۹۰. ارزیابی فن آوری سنجنش از دور در برآورد مؤلفه‌های بیلان آب در مقیاس حوضه‌ای با تأکید بر میزان برداشت خالص آب

- through remote sensing techniques. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12(4): 225-232.
13. Evans R. Hulbert S. Murrhy E. Bastiaanssen W. G. M. Molloy R. and Miltenburg I. 2009. Using satellite imagery to measure evaporation from storages. *Irrigation Australia 2009 Conference*. Swan Hill. 8 p.
 14. Kustas W. P. and Norman J. M. 1997. A two-source approach for estimating turbulent fluxes using multiple angle thermal infrared observations. *Water Resources Research*. 33(6): 1495-1508.
 15. Norman J. M. Kustas W. P. and Humes K. S. 1995. A approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. 77(3): 263-293.
 16. Sánchez J. Kustas W. Caselles V. and Anderson M. 2008. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*. 112(3): 1130-1143.
 17. Santos C. A. C. D. Bezerra B. G. Silva B. B. D. and Rao T. V. R. 2010. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 25(3): 383-392.
 18. Su Z. 2002. The Surface Energy Balance System(SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6(1): 85-100.
 19. Sun Z. Wei B. Su W. Shen W. Wang C. You D. and Liu Z. 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modeling in agriculture*. 54(3): 1086-1092.
 20. Teixeira A. H. C. Bastiaanssen W. G. M. Ahmad M. D. and Bos M. G. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149(3): 462-476.