

برآورد تبخیر-تعرق واقعی گندم با استفاده از الگوریتم سبال نسبت به نتایج لایسیمتری در شرایط استاندارد در ایستگاه‌های تحقیقاتی تبریز و کرج

علی مرشدی^۱، حسین جعفری و اژدر عنابی میلانی

استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران.

a.morshedi@areeo.ac.ir

استادیار پژوهش، بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

jafari52_h@yahoo.com

استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران.

a_o_milani@yahoo

دریافت: مهر ۱۴۰۰ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۰

چکیده

این پژوهش با هدف برآورد تبخیر-تعرق واقعی گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال و مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری شده از لایسیمتر، در دو منطقه مطالعاتی تبریز و کرج در سه سال زراعی (۱۳۹۶ تا پایان سال زراعی ۱۳۹۹) اجرا شد. مقدار تبخیر-تعرق واقعی گندم در طول دوره رشد به دو روش الف: استفاده از ماهواره لندست ۸ در قالب الگوریتم توازن انرژی برای سطح (سبال، SEBAL) و ب: استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار، محاسبه و یافته‌ها مقایسه شدند. با توجه به اینکه الگوریتم سبال، تبخیر-تعرق گیاهان را در شرایط واقعی و لایسیمترها تبخیر-تعرق را در شرایط پتانسیل (بدون تنش رطوبتی و دارای پوشش کامل در سطح زمین) ارائه می‌دهند، برای جلوگیری از بروز خطا، در روش استفاده از فناوری سنجش از دور، از تبخیر-تعرق واقعی در پیکسل‌هایی استفاده شد که دارای شرایط رطوبتی مشابه یا نزدیک به شرایط استاندارد در لایسیمتر بودند (طبق تعریف پیکسل سرد در الگوریتم سبال). همبستگی مقدار تبخیر-تعرق واقعی بدست آمده از الگوریتم سبال و لایسیمتر، نسبت مناسبی داشت به طوری که در منطقه‌های مطالعاتی کرج و تبریز ضریب تبیین (R^2) به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۶۵ بدست آمد. افزون بر این، مقایسه داده‌های تبخیر-تعرق واقعی گندم نسبت به لایسیمتر با استفاده از پارامترهای آماری دیگر مانند MAE, RMSE, NRMSE و MBE نشان داد که در دو منطقه مزبور، نتایج به نسبت خوب بود، ولی مقدار تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده توسط سبال در بیشتر موارد، بیش از مقدار تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر بود. در مجموع، با توجه به مزایای بیشتری که الگوریتم سبال دارد، پیشنهاد می‌شود برای سطح وسیع از این فناوری برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی گیاه گندم استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: نیاز آبی واقعی، سنجش از دور، لندست ۸

۱-آدرس نویسنده مسئول: بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران.

مقدمه

در بین گیاهان زراعی، گندم در تأمین مواد غذایی کشور سهم ویژه‌ای دارد به طوری که نزدیک به ۳/۵ میلیون هکتار از مزارع کشور، تحت کشت گندم قرار دارد (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۸). از این رو برآورد تبخیر-تعرق، به عنوان مبنای برنامه‌ریزی آبیاری، سبب صرفه‌جویی حجم قابل توجهی آب در کشور خواهد شد.

در سال‌های اخیر، به دلیل هزینه‌های فراوان و مشکلات اجرای پروژه‌های لایسیمتری، تخمین مقدار آب مصرفی از طریق برآورد تبخیر-تعرق گیاهان زراعی و باغی بر اساس داده‌های سنجش از دور، از موضوعات مورد توجه بوده است (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۵). فناوری سنجش از دور و پیشرفت‌های اخیر در مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق از طریق سنجش از دور مانند الگوریتم بیلان انرژی برای سطح زمین^۱ (سبال، SEBAL) سبب شده که تخمین تبخیر-تعرق واقعی گیاهان زراعی و باغی در اراضی بزرگ و نواحی گسترده‌ی کشت امکان‌پذیر شود (باستیانسن، ۱۹۹۵؛ باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸).

الگوریتم سبال روشی است که بر پایه روابط تجربی و فیزیکی، میزان تبخیر-تعرق واقعی را با کمترین داده‌های زمینی برآورد می‌کند و اولین بار توسط باستیانسن و همکاران (۱۹۹۸a و ۱۹۹۸b) ارائه شد. این الگوریتم در سال ۲۰۰۲ توسط آلن و همکاران اصلاح شد. الگوریتم سبال در برآورد تبخیر-تعرق واقعی هم در مقیاس مزرعه (صحرائی) و هم در مقیاس حوضه در شرایط اقلیمی متنوعی در بیش از ۳۰ کشور جهان، با دقت نزدیک به ۸۵ درصد در مقیاس صحرائی و ۹۵ درصد در مقیاس روزانه و فصلی آزمون شده است (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۵؛ باستیانسن، ۲۰۰۰؛ باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸b؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۲). سنای و همکاران (۲۰۱۶) نیز با استفاده

از مقادیر ماهواره Landsat 8 روش سنجش از دور را برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی، مهم و توانا گزارش نمودند. در پژوهش جورج و همکاران (۲۰۱۳) مقدار خطای الگوریتم سبال برابر ۰/۱۵ میلی‌متر در روز بوده است.

در طی سال‌های اخیر و در کشور ایران، مطالعات متعددی به منظور ارزیابی صحت و کارایی الگوریتم سبال در برآورد تبخیر-تعرق در مناطق مختلف انجام شده و با نتایج لایسیمتری و دیگر مدل‌های ریاضی، مقایسه شدند. مختاری (۲۰۰۵) در دشت برخوار استان اصفهان نشان داد که تبخیر-تعرق محاسبه شده با استفاده از الگوریتم سبال برای چغندر قند حدود ۲۰ درصد پایین‌تر و برای ذرت ۱۵ درصد بالاتر از مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ بوده است. کریمی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست در دشت ماهیدشت کرمانشاه، بیشترین درصد خطا بین الگوریتم سبال و مقادیر لایسیمتر را برای محصول ذرت، کمتر از ده درصد اعلام کردند. مشتاق و همکاران (۲۰۱۵) توانایی الگوریتم سبال در برآورد تبخیر-تعرق واقعی را در استان اصفهان با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 5 در مقایسه با روش پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ تأیید کردند. نوروزی و همکاران (۱۳۹۵) کارایی تصاویر ماهواره MODIS را در برآورد تبخیر-تعرق واقعی شالیزارهای شهرستان رشت، مطالعه و مقادیر R^2 و RMSE را برابر با ۰/۳۸۳ و ۳/۳۳۵ میلی‌متر بر روز بدست آوردند. در پژوهش ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵) الگوریتم سبال نسبت به مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶، دارای ضریب همبستگی ۰/۷۶۴ بود.

هدف از این تحقیق، برآورد و ارزیابی صحت تبخیر-تعرق واقعی گندم با استفاده از الگوریتم سؤال نسبت به نتایج لایسیمتری در طول سه سال زراعی و در دو منطقه مطالعاتی کرج و تبریز با استفاده از شاخص‌های آماری شناخته شده بود.

^۱-Surface Energy Balance Algorithm For Land, SEBAL

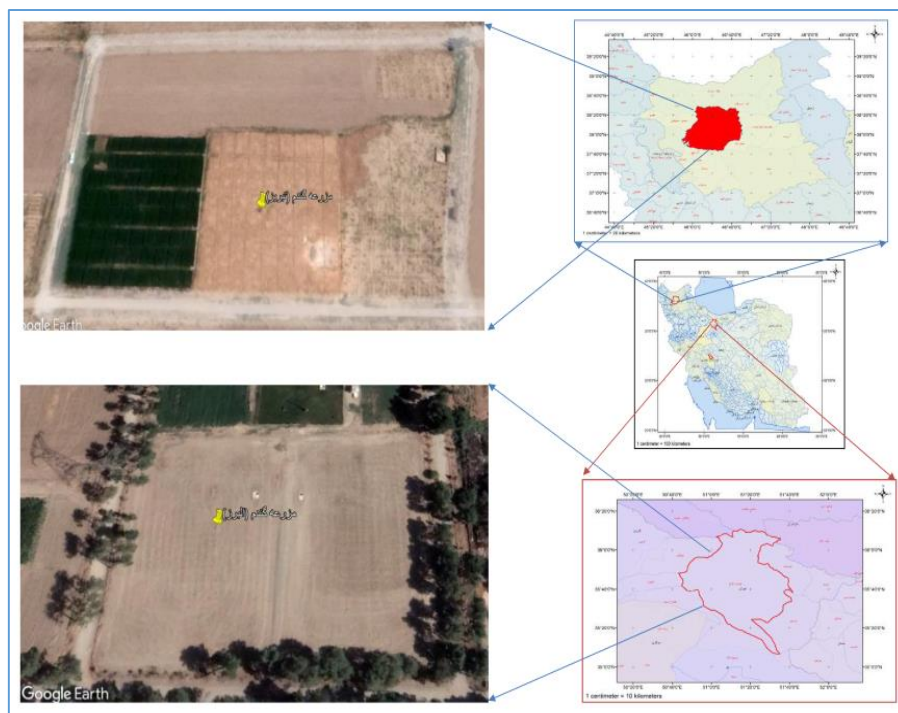
مواد و روش‌ها

محل‌های اجرای پژوهش

محل اجرای آزمایشات لایسیمتری در ایستگاه تحقیقات ستاد مؤسسه تحقیقات خاک و آب در شهرستان کرج (واقع در استان البرز) و ایستگاه تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی در شهرستان خسروشهر (واقع در استان آذربایجان شرقی) بود (شکل ۱). در این پروژه ملی، اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاه گندم در لایسیمترهای مستقر در ایستگاه‌های تحقیقاتی از یک سو و برآوردهای حاصل از تبخیر-تعرق واقعی به کمک تصاویر ماهواره‌ای (الگوریتم سبال) از سوی دیگر انجام شد. ایستگاه تحقیقات خاک و آب کرج با مشخصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه و ۲۱ ثانیه طول شمالی و ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شرقی و ارتفاع ۱۲۸۹ متر از سطح دریا، در جنوب شهرستان کرج و در شهر مشکین‌دشت قرار دارد. طبق آمار بلندمدت ایستگاه هواشناسی کرج، میانگین بارندگی سالیانه کرج حدود

۲۴۷/۴ میلی‌متر، میانگین سالیانه دمای هوا ۱۴/۴ درجه سلسیوس که بیشینه و کمینه مطلق آن به ترتیب ۴۲ و ۲۰- درجه سلسیوس، میانگین رطوبت نسبی ۵۳ درصد، میانگین سرعت باد روزانه ۲/۲ متر بر ثانیه و تبخیر سالانه ۲۱۸۴ میلی‌متر و دارای اقلیم نیمه‌خشک با زمستان نسبتاً سرد و تابستان نسبتاً معتدل است (جدول ۱).

ایستگاه تحقیقات خاک و آب تبریز با مشخصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲ دقیقه و ۳۹ ثانیه طول شمالی و ۳۷ درجه و ۵۸ دقیقه و ۴۲ ثانیه عرض شرقی و ارتفاع ۱۳۶۱ متر از سطح دریا، در غرب شهرستان تبریز و در شهر خسروشهر قرار دارد. طبق آمار بلندمدت ایستگاه هواشناسی تبریز، میانگین بارندگی سالیانه تبریز حدود ۲۶۷، میانگین سالیانه دمای هوا ۱۲/۴ درجه سلسیوس که بیشینه و کمینه مطلق آن به ترتیب ۲۶/۲ و ۴/۱- درجه سلسیوس، میانگین رطوبت نسبی ۵۵ درصد، میانگین سرعت باد روزانه ۲/۶ متر بر ثانیه و دارای اقلیم نیمه‌خشک با زمستان سرد و تابستان گرم است (جدول ۱).



شکل ۱- موقعیت لایسیمترهای مستقر در مزرعه‌های گندم ایستگاه‌های خاک و آب کرج و تبریز

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات بلندمدت اقلیمی ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز و کرج

پارامتر	میانگین رطوبت نسبی (درصد)	میانگین بارندگی (میلی‌متر)	میانگین بیشینه دمای هوا (سلسیوس)	میانگین کمینه دمای هوا (سلسیوس)	سرعت متوسط باد روزانه (متر بر ثانیه)	اقلیم
کرج	۵۳	۲۴۷/۴	۴۲	-۲۰	۲/۲	زمستان نسبتاً سرد و تابستان نسبتاً معتدل
تبریز	۵۵	۲۶۷	۲۶/۲	-۴/۱	۲/۶	زمستان سرد و تابستان گرم

اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاه گندم با استفاده از لایسیمتر

در استان البرز از لایسیمتر نصب شده در مزرعه موسسه تحقیقات خاک و آب واقع در مشکین‌دشت کرج با ابعاد ۱×۲×۲ متر (عرض، طول و عمق) در مرکز مزرعه به ابعاد ۳۰ × ۳۰ متر و در استان آذربایجان شرقی از لایسیمتر واقع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی این استان با ابعاد ۱/۵×۱/۵×۲ متر در مرکز مزرعه به ابعاد ۶۰ × ۶۰ متر استفاده شد. در هر منطقه برای جلوگیری از وقوع تنش آبی گندم داخل لایسیمتر، زمان آبیاری (دور آبیاری) به گونه‌ای تنظیم شد که رطوبت خاک درون لایسیمتر پائین‌تر از ۵۰ درصد آب قابل استفاده در خاک نباشد و به‌منظور اطمینان از آبیاری کامل و نفوذ آب تا پایین منطقه توسعه ریشه گندم درون لایسیمتر، مقدار آب آبیاری تا اندازه‌ای که حداقل ۱۰ درصد از مقدار آن از طریق زهکش نصب‌شده در کف لایسیمتر خارج شود، ادامه پیدا نمود. آب زهکشی شده در هر نوبت آبیاری، جمع‌آوری و اندازه‌گیری شد. تاریخ شروع آماربرداری از آبان ماه تا تیر ماه هر سال و به مدت سه سال زراعی (۱۳۹۶ تا ۱۳۹۹) بود. به‌منظور برآورد تغییر رطوبت خاک داخل لایسیمتر (ΔS) قبل از هر آبیاری، رطوبت خاک در لایه‌های ۱۰ سانتیمتری تا عمق توسعه ریشه گندم بوسیله نوترون‌متر اندازه‌گیری شد. در پایان با استفاده از رابطه ۱ مقدار تبخیر-تعرق گندم محاسبه شد:

$$ET_c = I + P - D \pm \Delta S \quad (1)$$

در این معادله P میزان بارندگی (میلی‌متر)، I میزان آب آبیاری (میلی‌متر)، میزان آب خروجی یا زهکش شده

(میلی‌متر)، ET_c میزان تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر) و ΔS تغییرات رطوبت خاک (ارتفاع معادل تغییرات رطوبت خاک پیش و پس از آبیاری) می‌باشد که بر این اساس مقدار تبخیر-تعرق یا نیاز آبی گیاه در طول فصل زراعی، از رابطه‌ی ۱ برآورد شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

برآورد تبخیر-تعرق واقعی گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL)

در این تحقیق از هشت تصویر ماهواره لندست ۸ برای دشت تبریز و ۱۵ تصویر ماهواره لندست ۸ برای دشت کرج در طول سه سال آزمایش استفاده شد. این تصاویر با دقت تفکیک زمانی ۱۶ روزه و دقت تفکیک مکانی ۳۰ متر در ۳۰ متر از طریق پایگاه اینترنتی USGS^۱ تهیه شد. این تصاویر بصورت فشرده بوده (Compressed) و پس از باز کردن (Decompressing) دارای باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی مربوط به ردیف ۱۶۵ و مسیر ۳۵ (کرج) و ردیف ۱۶۸ و مسیر ۳۴ (تبریز) در قالب تصاویر GeoTIFF ذخیره و پردازش شد. تصاویر مربوط به ماهواره به همراه فایل سرآیند (Header) ارائه می‌شوند که دربردارنده اطلاعات مهم برای پردازش تصاویر است. این فایل کوچک دربرگیرنده تاریخ و زمان گذر ماهواره، طول و عرض جغرافیایی مرکز تصویر، زاویه ارتفاعی خورشید (b) در لحظه گذر، مقدار بهره (Gain) و مقدار عرض از مبدأ (Bias) مربوط به تبدیل داده‌های رقومی به تشعشع است. زمان گذر برحسب گرینویچ (Greenwich

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

در این معادله α آلبدوی سطح زمین و ϵ_0 تابندگی انتشار حرارتی در طیف حرارتی ($6-14 \mu m$) می‌باشد. روند کلی محاسبه شار تابش خالص سطح به صورت شماتیک در شکل ۲ ارائه شده است.

شار گرمای خاک G_0 عبارت است از نرخ گنجایش گرما در خاک و پوشش گیاهی ناشی از هدایت گرمایی است. در الگوریتم سبال، ابتدا نسبت G_0/R_n با استفاده از معادله تجربی زیر که توسط باستیانسن (۱۹۹۵) برای نیمه‌روز بدست آمده، محاسبه شد:

$$\frac{G_0}{R_n} = T_s / \alpha (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (4)$$

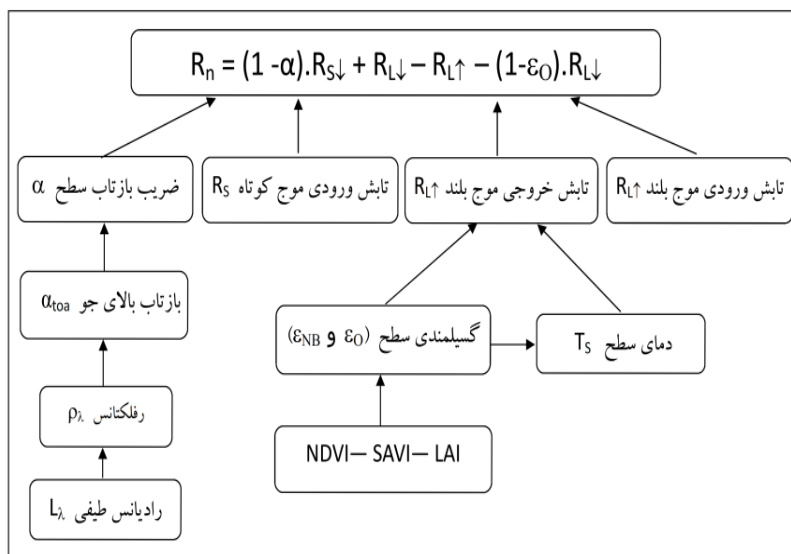
در این معادله T_s دمای سطح ($^{\circ}C$)، α آلبدوی سطح زمین و $NDVI^1$ شاخص گیاهی می‌باشد. شار گرمای خاک G_0 در ادامه با ضرب نمودن مقدار G_0/R_n در مقدار محاسبه شده R_n به دست می‌آید.

(Mean Time, GMT) حدود هفت صبح و به زمان محلی، حدود ۱۱ و ۳۰ دقیقه بود.

الگوریتم سبال بر مبنای استفاده از معادله توازن انرژی (معادله ۲) و محاسبه مقدار شار لحظه‌ای گرمای نهان تبخیر به‌عنوان باقیمانده این معادله برای هر پیکسل است (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$\lambda ET_{inst} = R_n - G_0 - H \quad (2)$$

در این معادله λET_{inst} شار گرمای نهان تبخیر، R_n میزان تابش خالص خورشیدی، G_0 شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس (همه دارای واحد w/m^2) می‌باشند. مقدار تابش خالص از بیلان چهار شار تابشی در سطح زمین به دست می‌آید که شامل تابش طول موج کوتاه ورودی ($R_{s\downarrow}$)، باز تابش طول موج کوتاه خروجی ($R_{s\uparrow}$)، تشعشعات طول موج بلند ورودی از اتمسفر ($R_{L\downarrow}$) و تشعشعات طول موج بلند گسیل شده از سطح ($R_{L\uparrow}$) است. تابش خالص لحظه‌ای در واحد سطح با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸):



شکل ۲- شمای مراحل محاسبه شار تابش خالص R_n در الگوریتم سبال

گرم) شناسایی و انتخاب شوند. از پیکسل سرد به‌عنوان پیکسل مرطوب نیز نام برده می‌شود که در آن پیکسل، از گیاه یونجه که به‌طور مطلوب آبیاری شده و دارای پوشش

به‌منظور محاسبه شار گرمای محسوس H در رابطه ۳، ضروری است دو پیکسل مرجع برای تثبیت شرایط مرزی در توازن انرژی (پیکسل سرد و پیکسل

¹ -Normalized Difference Vegetation Index, NDVI

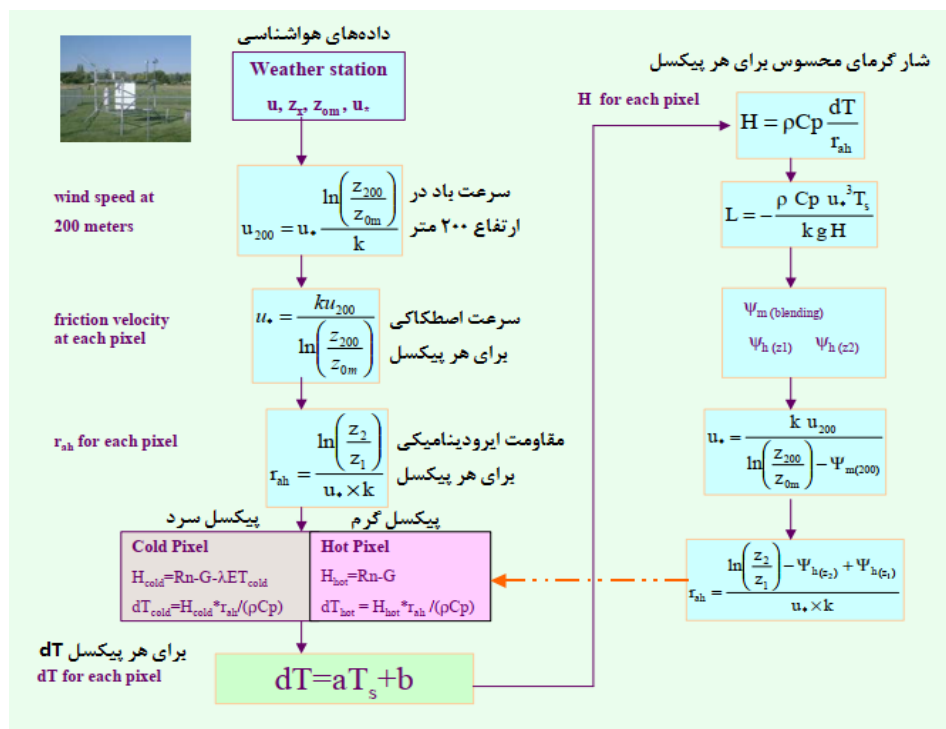
(شکل ۳) است و از رابطه ۵ محاسبه شد (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$H = (\rho \cdot c_p \cdot dT) / r_{ah} \quad (5)$$

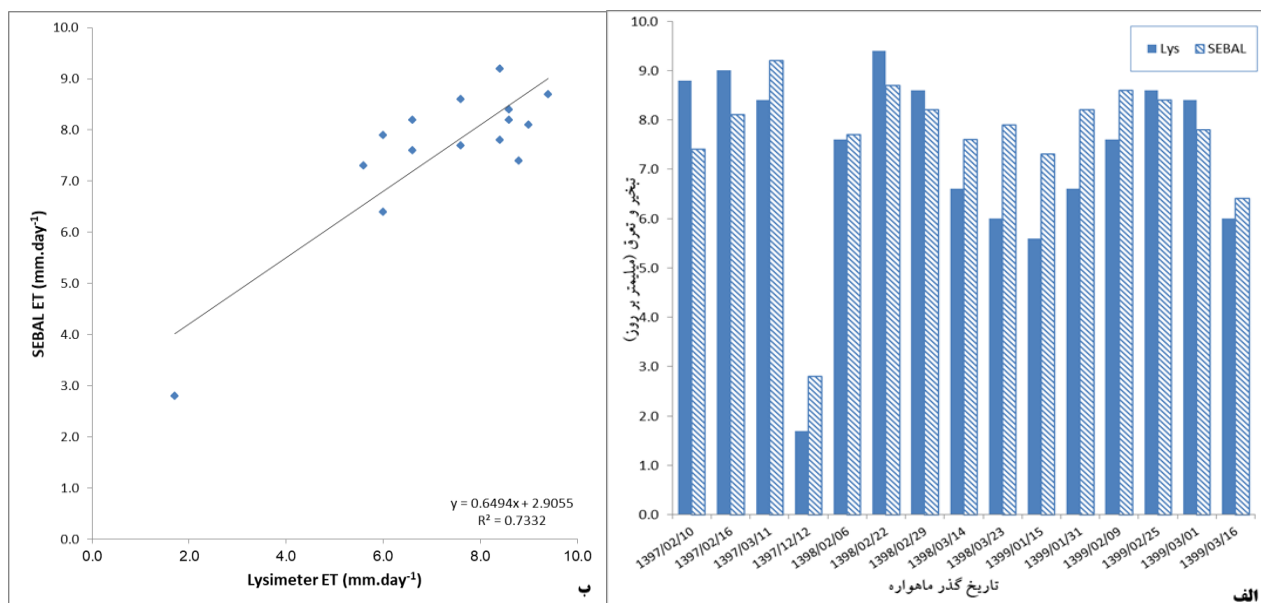
در این معادله ρ عبارت است از وزن مخصوص هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا (1004 j/kg/K)، dT برحسب (K) تفاوت دمای (T_1-T_2) بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (s/m) می‌باشد. شار گرمای محسوس (H) تابع شیب دمایی، زبری سطح و سرعت باد است. حل رابطه ۵ به دلیل وجود دو پارامتر مجهول، مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال حرارتی (r_{ah}) و تفاوت دمای پیکسل سرد و گرم (dT) مشکل است و از این رو برای حل آن، استفاده از محاسبات چرخشی (Iteration Calculation) ضروری است. با فرض شرایط جوی خنثی، مقدار اولیه r_{ah} با استفاده از رابطه ۶ به دست می‌آید.

کامل در سطح زمین باشد، به‌عنوان مبنا استفاده می‌شود. دمای سطح T_s و دمای هوای نزدیک سطح زمین T_a در این پیکسل یکسان فرض می‌شود. پیکسل گرم که پیکسل خشک نیز نامیده می‌شود در مزارع کشاورزی بایر و بدون پوشش گیاهی بوده و تبخیر-تعرق واقعی در آن صفر منظور می‌شود. در پیکسل گرم، شاخص سطح برگ (LAI) نزدیک به صفر (غیر صفر)، NDVI نزدیک به صفر (غیر صفر)، T_s نزدیک به حداکثر است. در پیکسل سرد یونجه، مقدار تبخیر-تعرق واقعی، LAI و NDVI در بالاترین مقدار و T_s بایستی در حداقل باشد. مقدار تبخیر-تعرق واقعی محاسبه‌شده در سایر پیکسل‌ها بستگی به دقت در انتخاب این پیکسل‌ها در سبال دارد.

شار گرمایی محسوس (H) شدت هدر رفت گرما در هوا به‌وسیله جابجایی و هدایت در اثر اختلاف دما



شکل ۳- روندنمای تعیین ضرایب a و b (واترز و همکاران، ۲۰۰۲)



شکل ۴- الف- مقادیر تبخیر- تعرق روزانه اندازه‌گیری و برآورد شده توسط لایسیمتر و سبال در روزهای گذر ماهواره در منطقه مطالعاتی کرج
 شکل ۴- ب- رابطه برازش بین مقادیر تبخیر- تعرق اندازه‌گیری و برآورد شده توسط لایسیمتر و سبال در روزهای گذر ماهواره در منطقه مطالعاتی کرج

پس از حل رابطه‌های بالا، مقدار تبخیر- تعرق در لحظه‌ی گذر ماهواره (ET_{inst}) به دست آمد (مورس و همکاران، ۲۰۰۰):

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

در این معادله ET_{inst} عبارت است از تبخیر- تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، عدد ۳۶۰۰ تبدیل ثانیه به ساعت و λ گرمای نهان تبخیر (J/kg) می‌باشد (معادله ۷).

مقادیر روزانه تبخیر- تعرق بیست و چهار ساعته (ET_{24}) در الگوریتم سبال با روابط ۸ و ۹ و ۱۰ محاسبه شد. در رابطه ۹ متغیر ETF جزء تبخیر- تعرق است. ET_{r-24} از مجموع ۲۴ ساعته تبخیر- تعرق مرجع ساعتی برای روز عبور ماهواره بدست می‌آید.

$$ET_{24} = ETF * ET_{r-24} \quad (8)$$

$$ETF = \frac{\lambda ET}{R_n - G_0} = \frac{R_n - G_0 - H}{R_n - G_0} \quad (9)$$

$$ET_{r-24} = \sum_1^{24} (ET_{24}) \quad (10)$$

برای تعیین مقدار dT ، یک معادله خطی بین dT و دمای رادیومتریکی سطح (Ts) برقرار می‌شود ($dT = aTs + b$). در این معادله dT عبارت است از تفاوت دمای نزدیک به سطح، T_s دمای رادیومتریکی سطح و a و b ضرایب تجربی هستند. خطی بودن تابع dT با T_s یک فرض مهم در سبال است و تحقیقات انجام‌شده در دانشگاه آیداهو در کیمبرلی بر مناسب بودن این فرض در شرایط متنوع دلالت می‌کند (واترز و همکاران، ۲۰۰۲).

مقاومت آئرودینامیکی در انتقال گرما (r_{ah}) با معادله زیر محاسبه شد:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{U_* \times K} \quad (6)$$

Z_1 و Z_2 ارتفاعات بر حسب متر در بالای سطح جابجایی صفر (d) گیاه، U_* سرعت اصطکاکی (متر بر ثانیه) و K ثابت ون‌کارمن (۰/۴۱) هستند. سرعت اصطکاکی با استفاده از قانون لگاریتمی سرعت باد در شرایط خشی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

ارزیابی صحت برآورد تبخیر-تعرق گندم

در این مطالعه از شاخص‌های آماری شامل میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error, MAE) که بدون علامت است، میانگین خطای اریب (Mean Bias Error, MBE)، ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error, RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE Normalized Coefficient of Determination, R²) استفاده شدند (معادله‌های ۱۱ تا ۱۴). هر چه MAE، RMSE و MBE به صفر و مقادیر R² به یک نزدیک‌تر باشد، صحت برآورد الگوریتم سبال بهتر است.

همچنین معادله رگرسیون خطی به صورت $Y = a \cdot X + b$ بین مقادیر برآورد شده تبخیر-تعرق از الگوریتم سبال به عنوان متغیر وابسته (Y) و داده‌های لایسیمتری به عنوان متغیر مستقل (X) برازش داده شد. پارامترهای a و b ضرایب رگرسیون هستند. در روابط زیر O_i و P_i به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و مقدار برآورد شده توسط ماهواره و \bar{O} میانگین حسابی داده‌های اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها است.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (11)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad (14)$$

آماره MAE هر چقدر به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده صحت بیشتر روش در برآورد می‌باشد. مقدار این معیار همواره مثبت است. آماره MBE در حقیقت اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی است و بیانگر انحراف از میانگین می‌باشد. این مقدار می‌تواند مثبت یا منفی باشد که نشان‌دهنده برآورد بیشتر (مثبت) و یا کمتر (منفی) از میانگین داده‌ها می‌باشد. این معیار نیز هر چقدر به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده اختلاف کمتر مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای

می‌باشد. آماره RMSE بیانگر میزان خطای برآورد متغیرها نسبت به مقدار مشاهداتی است که بر اساس ریشه مربعات خطا مورد محاسبه قرار می‌گیرد. ضریب تبیین عددی است بین صفر تا یک که رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهد. آماره NRMSE بدون بعد بوده و به صورت نرمال شده از RMSE به دست می‌آید. هر چقدر RMSE و NRMSE از نظر عددی، کوچک‌تر باشند، صحت برآورد، بیشتر است. از نرم‌افزارهای ERDAS Imagine 2015 و ENVI 5.3.1 برای محاسبات مربوط به الگوریتم سبال و از ArcGIS 10.8.1 برای تولید نقشه‌های خروجی و استفاده شد.

نتایج و بحث

پس از حذف روزهای ابری، تصاویر ماهواره‌ای مناسب مورد پردازش قرار گرفت، بنابراین در طول سه سال زراعی در کرج (البرز) و تبریز (آذربایجان شرقی) به ترتیب و در مجموع از ۱۵ تصویر و ۸ تصویر استفاده شد.

منطقه مطالعاتی کرج

مقادیر تبخیر-تعرق روزانه اندازه‌گیری شده (لایسیمتر) و برآورد شده توسط ماهواره (الگوریتم سبال) در روزهای عبور ماهواره مربوط به کرج در شکل‌های ۴ (الف و ب) نشان داده شده‌است. مقادیر پارامترهای آماری شامل میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین انحراف خطا (MBE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) و ضریب تبیین (R²) به منظور مقایسه این دو روش تعیین تبخیر و تعرق، برای هر دو منطقه در جدول ۲ نشان داده شد.

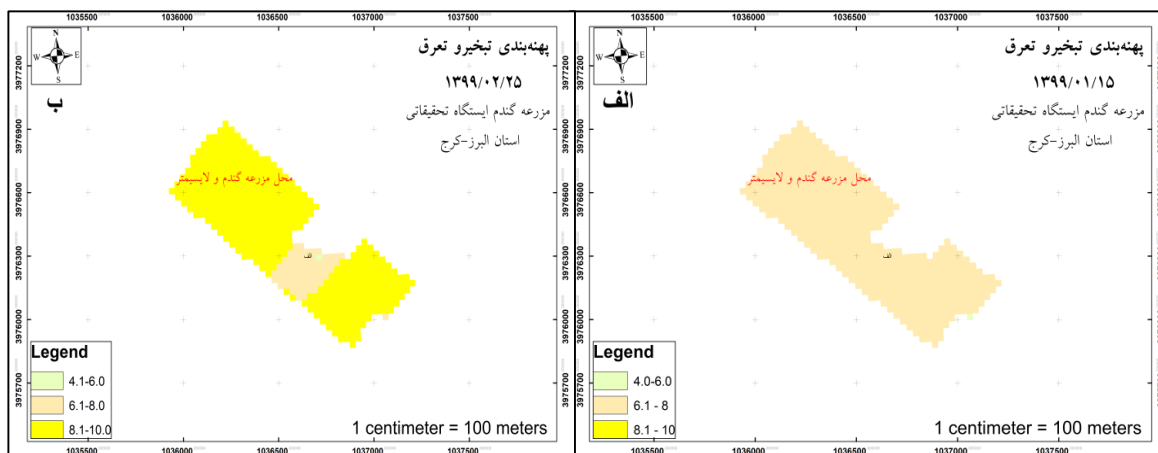
همان‌طورکه در شکل‌های ۴ و جدول ۲ مشاهده می‌شود، ضریب تبیین ۰/۷۳ بیانگر خوبی برازش مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از لایسیمتر و برآورد شده توسط الگوریتم سبال در منطقه مطالعاتی کرج می‌باشد. علامت منفی MBE و مقدار آن نشان داد که در مجموع

سبال در منطقه مطالعاتی کرج به طور میانگین ۱۴ درصد کمتر از روش لایسیمتری برآورد شد ($NRMSE=0.14$). از این رو، بر پایه $NRMSE$ می توان کارآیی الگوریتم سبال را خوب ارزیابی کرد. بر این اساس، برآورد تبخیر-تعرق واقعی گندم توسط سبال قابل قبول بوده و با توجه به مزایایی که استفاده از ماهواره مانند پوشش سطح و سیعی از مزارع، سریع و ارزان بودن، نیاز به حداقل داده های میدانی دارد استفاده از این فناوری برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی گیاه گندم توصیه می شود. نقشه های پهنه بندی دو روز از منطقه مطالعاتی کرج در شکل های ۵ (الف و ب) نمایش داده شده است.

مقدار تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده توسط سبال کمتر از اندازه گیری شده در لایسیمتر بود و مقدار شاخص MAE (۰/۹۲) بیانگر تفاوت اندک نتایج این دو روش برآورد تبخیر-تعرق گندم در ایستگاه کرج بود. اختلاف دو پارامتر MAE و MBE (۰/۹۲ و -۰/۳۶) نشان داد که در برخی از روزهای برآورد تبخیر-تعرق واقعی، مقدار برآورد شده توسط سبال بیشتر و در برخی از روزها کمتر از لایسیمتر بوده است. ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) بین داده های تبخیر-تعرق واقعی اندازه گیری شده توسط لایسیمتر و برآورد شده توسط سبال از اختلاف اندک (۱/۱ میلی متر بر روز) در این دو روش است. از طرفی، تبخیر-تعرق واقعی گیاه گندم با الگوریتم

جدول ۲- پارامترهای آماری محاسبه شده بین دو زوج تبخیر-تعرق در ایستگاه تحقیقاتی خاک و آب کرج و تبریز

مقدار		پارامتر آماری
آذربایجان شرقی	البرز	
۰/۶۵	۰/۷۳	R^2
۱/۲۵	۰/۹۲	MAE
-۰/۵۰	-۰/۳۶	MBE
۱/۵۰	۱/۱	RMSE
۰/۲۴	۰/۱۴	NRMSE



شکل ۵- نقشه های پهنه بندی در دو تاریخ گذر ماهواره از فراز منطقه مطالعاتی در کرج

الف- تاریخ گذر ماهواره ۱۳۹۹/۰۱/۱۵ و ب- تاریخ گذر ماهواره ۱۳۹۹/۰۲/۲۵

روزهای عبور ماهواره در منطقه مطالعاتی تبریز در شکل های ۶ (الف و ب) نشان داده شده است. میانگین تبخیر-تعرق دو روش برابر با ۵/۶۸ و ۶/۱۵ میلی متر بر

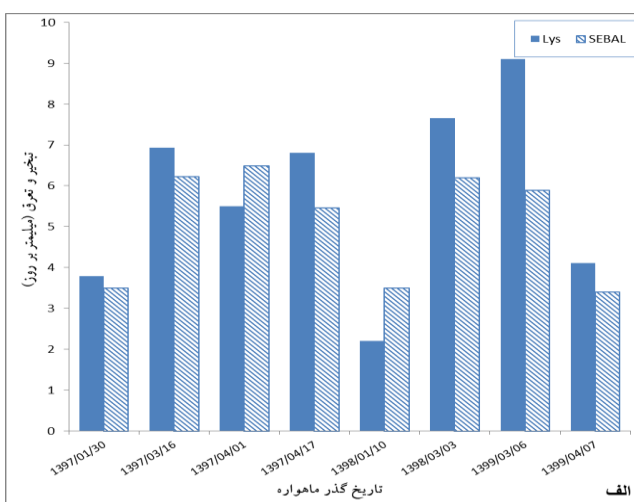
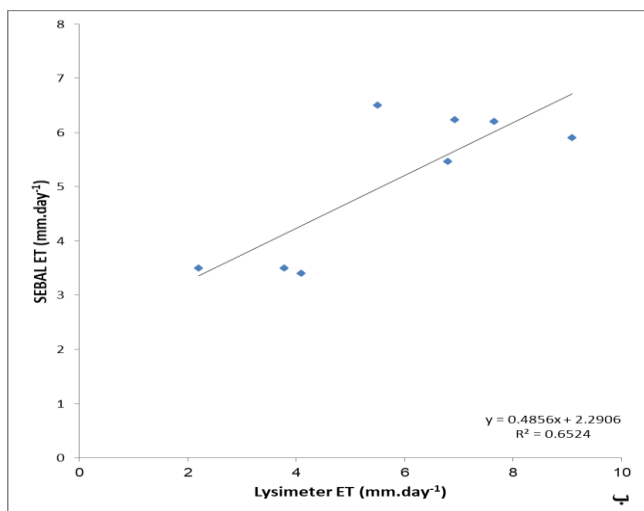
منطقه مطالعاتی تبریز

مقادیر تبخیر-تعرق روزانه اندازه گیری شده توسط لایسیمتر و برآورد شده توسط الگوریتم سبال در

بودن و نیاز به حداقل داده‌های میدانی) دارد، استفاده از این فناوری برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی گیاه گندم در این منطقه هم قابل توجه است. نقشه‌های پهنه‌بندی دو روز از منطقه مطالعاتی تبریز در شکل‌های ۷ (الف و ب) نمایش داده شده است.

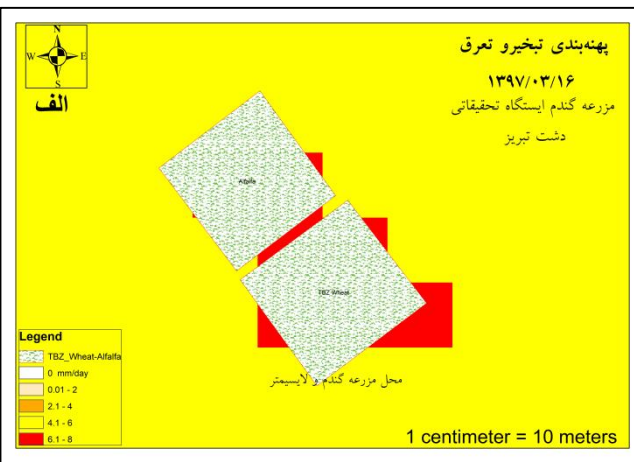
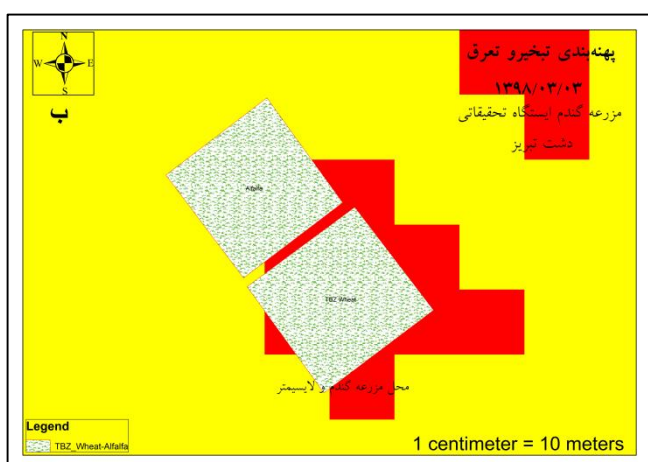
نتایج این تحقیق با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت خوبی دارد. بطور مثال در پژوهش ارشد (۱۳۸۶) و کریمی و همکاران (۱۳۹۱) حداکثر درصد خطا بین تبخیر-تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال و مقادیر اندازه‌گیری شده در لایسیمتر، کمتر از ده درصد اعلام شد. غلامی سفیدکوهی (۱۳۸۹) الگوریتم سبال را نسبت به مدل پنمن-مانتیث-فائو مقایسه و گزارش کرد ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱۸ میلی‌متر، میانگین خطای مطلق (MAE) ۱۶ میلی‌متر و میانگین خطا (ME) برابر با ۱/۱-میلی‌متر در طول دوره رشد گندم بود که در تحقیق حاضر، شاخص‌های متناظر و مورد اشاره از مقادیر کمتری برخوردار بودند. تیگزریا و باستیانسن (۲۰۰۹) مقدار ضریب تبیین (R^2) را بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۹ گزارش کردند که در تحقیق حاضر بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۳ بدست آمد. نتایج مشابهی نیز در پژوهش راموس و همکاران (۲۰۰۹)، سینگ و سنای (۲۰۱۵)، سنای و همکاران (۲۰۱۶) و بها تری و همکاران (۲۰۱۲) گزارش شد. جورج و همکاران (۲۰۱۳) نیز خطای ۲۰ درصدی را در مقیاس ناحیه‌ای از مقایسه داده‌های لایسیمتر، نسبت به الگوریتم سبال گزارش کردند.

روز (به ترتیب برای سبال و لایسیمتر) بدست آمد. ضریب تبیین بین مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و برآورد شده توسط سبال در این منطقه از کشور ۰/۶۵ بدست آمد که بیانگر برازش نزدیک دو روش تعیین تبخیر-تعرق گیاه گندم می‌باشد. علامت منفی MBE (با مقدار ۰/۵۰-) نشان داد که در مجموع مقدار تبخیر-تعرق برآورد شده توسط الگوریتم سبال کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر است اما این تفاوت بیشتر از منطقه مطالعاتی کرج است. مقدار شاخص MAE بیانگر تفاوت قابل قبول (۱/۲۵) نتایج این دو روش در برآورد تبخیر-تعرق گندم است. مساوی نبودن قدر مطلق مقدار MAE و MBE نشان داد که در مراحل از طول دوره رشد گندم، الگوریتم سبال، تبخیر-تعرق واقعی گندم را کمتر از لایسیمتر و در برخی مراحل بیشتر برآورد نموده است. میانگین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و برآورد شده، نشان داد که پراکندگی داده‌های تبخیر-تعرق واقعی بدست آمده توسط الگوریتم سبال در این منطقه بیشتر از کرج (۱/۵ در مقابل ۱/۱) است و درصد پراکندگی از میانگین در این منطقه بیشتر از منطقه مطالعاتی کرج بود (NRMSE=0.24). بر پایه NRMSE می‌توان کارایی الگوریتم سبال برای منطقه مطالعاتی تبریز را به نسبت خوب ارزیابی کرد. همانطور که پیش‌تر بیان شد، با توجه به مزایایی که استفاده از ماهواره (مانند پوشش وسیع مورد بررسی، سریع و ارزان



شکل ۶- الف- مقادیر تبخیر- تعرق روزانه اندازه‌گیری و برآورد شده توسط لایسیمتر و سبال در روزهای گذر ماهواره در منطقه مطالعاتی تبریز

شکل ۶- ب- رابطه برازش بین مقادیر تبخیر- تعرق اندازه‌گیری و برآورد شده توسط لایسیمتر و سبال در روزهای گذر ماهواره در منطقه مطالعاتی تبریز



شکل ۷- نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر- تعرق گندم در دو تاریخ گذر ماهواره از فراز منطقه مطالعاتی در کرج
 الف- تاریخ گذر ماهواره ۱۳۹۹/۰۱/۱۵ و ب- تاریخ گذر ماهواره ۱۳۹۹/۰۲/۲۵

داد که میانگین داده‌های تبخیر- تعرق گندم بین دو روش مورد مطالعه، از اختلاف اندک برخوردار بود. به دلیل مشکلات فراوان در استفاده از لایسیمتر برای برآورد تبخیر- تعرق (هزینه زیاد، زمانبر بودن، عدم تعمیم داده‌ها در سطح وسیع و کنترل رطوبت خاک در شرایط پتانسیل) استفاده از روش‌های سنجش از دور می‌تواند برای این منظور در کانون توجه قرار گیرد. در نهایت، الگوریتم سبال به‌عنوان یک روش پایدار، علمی و اقتصادی قادر به

نتیجه‌گیری نهائی

مقایسه مقدار تبخیر- تعرق بدست آمده از الگوریتم سبال و لایسیمتر در هر دو منطقه مطالعاتی، نشان از همبستگی به نسبت مناسبی بین تبخیر- تعرق حاصل از روش‌های مورد استفاده داشت. به طوری که در منطقه‌های مطالعاتی کرج و تبریز، ضریب تبیین (R^2) به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۶۵ حاصل شد. افزون بر این، مقایسه‌های آماری با استفاده از شاخص‌های MAE, RMSE و MBE نشان

تشکر و قدردانی

این مقاله، در بردارنده‌ی بخشی از نتایج یک پروژه ملی با عنوان "برآورد تبخیر و تعرق و پهنه‌بندی نیاز آبی گندم با استفاده از فناوری سنجش از دور (الگوریتم سبال) برای برخی حوضه‌های آبریز در استان‌های البرز، آذربایجان شرقی و چهارمحال و بختیاری" است و بدینوسیله از مؤسسه تحقیقات خاک و آب و همینطور مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی به دلیل تأمین اعتبار مالی و زیرساخت‌های مورد نیاز اجرای این پروژه تقدیر و تشکر می‌شود.

پهنه‌بندی تغییرات تبخیر-تعرق در مقیاس ناحیه‌ای با سرعت و هزینه کمتر است و پیشرفت‌های اخیر در مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق از طریق سنجش از دور مانند سبال، تخمین مقدار تبخیر-تعرق واقعی را در اراضی بزرگ و نواحی گسترده‌ی کشت امکان‌پذیر می‌سازد.

فهرست منابع

۱. ابراهیمی، ح.، گندمکار، ا.، المدرسی، س.ع.، رامشت، م.ح. ۱۳۹۵. برآورد دمای سطح زمین و تأثیر پوشش گیاهی بر دمای سطح با استفاده از تصاویر مودیس (مطالعه موردی: حوزه تویسرکان). فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای، ۶(۴)، ۲۳-۳۲.
۲. ارشد، ص.، مباشری، م. ر.، مرید، س.، آقاعلیخانی، م. و ارشد، س. ۱۳۸۷. پیش‌بینی خسارات ناشی از خشکسالی کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در اراضی دیم استان کرمانشاه. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه تبریز
۳. آمارنامه کشاورزی. ۱۳۹۸. جلد اول، محصولات زراعی سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶. دفتر آمار و فناوری اطلاعات، معاونت برنامه‌ریزی اقتصادی، وزارت جهاد کشاورزی، ایران.
۴. کریمی، ع.، ب. فرهادی بانسوله. ه. حصادی. ۱۳۹۱. برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس منطقه ای با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۴، جلد ۶، ص. ۳۶۴-۳۵۳.
۵. مشتاق، ن.، جعفری، ر. سلطانی، س. و رمضانی، ن. ۱۳۹۴. کاربرد مدل توازن انرژی و داده‌های ماهواره لندست سنجنده TM در تخمین تبخیر و تعرق. مجله علوم آب و خاک. ۲۰۷-۲۱۸: (۷۳) ۱۹
۶. یزدانی، و.، ابراهیمی، ح. ۱۳۹۲. مقایسه برآورد ضریب گیاهی فضای سبز به کمک روش سبال و روش لیمپ (مطالعه موردی مشهد). علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، جلد ۳۷، شماره ۴، ص ۲۷-۱۱.
۷. غلامی سفیدکوهی، م.، میرلطیفی، س.، محمدی، ک.، و علی محمدی، ع. ۱۳۸۹. برآورد ضریب گیاهی و تبخیر-تعرق واقعی گندم با استفاده از سنجش از دور مطالعه موردی: حوضه گرگانرود. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۴(۲).
8. Allen R. G., Morse A., and Tasumi M. 2002. Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. Proceedings of the International Conference on Irrigation and Drainage, Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions; Montpellier, France.
9. Bastiaanssen W.G.M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in

- Mediterranean climates, Ph.D. Dissertation, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, The Netherlands
10. Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A. and Holtslag, A. A. M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1. Formulation. *Journal of Hydrology*. 212-213, 198-212.
 11. Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J. and van der, W.T. 1998. A Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2. Validation. *Journal of Hydrology*. 212-213, 213-229.
 12. Bastiaanssen, W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229: 87-100
 13. Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes and A.A.M Holtslag. 1998. "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation." *J. Hydrol.*, 212-213, 198-212.
 14. George, Paul, Prasanna, H. Gowda, P.V. Vara, Prasad, Terry A. Howell, Scott A. Staggenborg, Christopher M.U. Neale, 2013. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08, *Advances in Water Resources*, in press.
 15. Hair, Joseph F. (2011). *Multivariate Data Analysis: An Overview*. In Miodrag Lovric (Ed.), *International Encyclopedia of Statistical Science* (pp. 904-907). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
 16. Mokhtari, M. H. 2005. Agricultural drought impact using remote sensing. Ms. C. Diss., ITC. The Netherlands.
 17. Morse, A., Allen, R. G., Tasumi, M., Kramber, W. J., Trezza, R., and Wright, J. L. 2000. Final Report: Application of the SEBAL meteorology for estimating evapotranspiration and consumptive use of water through remote sensing. Idaho Department of Water Resources. University of Idaho, Department of Biological and Agricultural. 107p.
 18. Ramos, J.G., Cratchley, C.R., Kay, J.A., Casterad, M.A., Martinez-cob, A and Dominguez, R. 2009. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro valley of N.E. Spain. *Agricultural Water Management*. 96: 638-652.
 19. Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 185, 171-185.
 20. Singh, R. K., & Senay, G. B. (2016). Comparison of Four Different Energy Balance Models for Estimating Evapotranspiration in the Midwestern United States. *Water*, 8(1), 9
 21. Teixeira, A.H., W.G.M. Bastiaanssen, M.D. Ahmad & M.G. Bos. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation, *agricultural and forest meteorology*, 149, 462-476.
 22. Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, M. and Bastiaanssen. W. 2002. Surface Energy Balance Algorithms for Land, Advanced Training and User's Manual. NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through The Idaho Department of Water Resources.

Estimation of Actual Evapotranspiration of Wheat Using SEBAL Algorithm Compared to Lysimetric Results under Standard Conditions in Tabriz and Karaj Research Stations

A. Morshedi¹, H. Jafari, and A. Onnabi Milani

Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Shahrekord, Iran.

a.morshedi@areeo.ac.ir

Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

jafari52_h@yahoo.com

Assistant Professor, Soil and Water Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Tabriz, Iran.

a_o_milani@yahoo

Received: October 2021, and Accepted: March 2022

Abstract

The aim of this study was to estimate the actual evapotranspiration of wheat using Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and compare with data measured by lysimeters in two study sites in Tabriz and Karaj during three growing seasons (1396-1399). Values of actual evapotranspiration of wheat during the growing seasons were calculated by two methods: a) using Landsat 8 satellite data through SEBAL, and b) using drained lysimeter data. Considering that evapotranspiration in SEBAL is in actual conditions and lysimeters provide evapotranspiration in potential conditions (standard situation without any limitation), to reduce errors, remote sensing data were used for pixels that had moisture conditions similar to standard lysimeters conditions. Comparison of actual evapotranspiration obtained from SEBAL and lysimeter in both sites showed relatively good correlation. The coefficients of determination (R^2) were 0.73 and 0.65 in, respectively, Karaj and Tabriz sites. In addition, using statistical parameters such as NRMSE, RMSE, MAE, and MBE showed that SEBAL actual evapotranspiration data and lysimetric data were, relatively, in agreement in the two study sites. However, in most cases, evapotranspiration values by SEBAL were greater than values measured by the lysimeter. In general, considering the advantages of the SEBAL, it is suggested this technology be used to estimate the actual evapotranspiration of wheat in large-scale areas.

Keywords: Actual water requirement, Remote sensing, Landsat8

¹- Corresponding author: Soil and Water Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Shahrekord, Iran.