

ارزیابی فناوری سنجش از دور در برآورد تبخیر- تعلق گیاه یونجه با استفاده از داده‌های

تبخیر- تعلق برآورد شده توسط لایسیمتر در استان‌های البرز و چهارمحال و بختیاری

حسین جعفری^۱ و علی مرشدی

استادیار پژوهشی موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج ایران.

jafari52_h@yahoo.com

استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد،

ایران. alimorshedi2000@gmail.com

دریافت: مهر ۱۴۰۰ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۱

چکیده

به دلیل برخی مشکلات در استفاده از لایسیمتر برای برآورد تبخیر- تعلق، مانند هزینه‌های فراوان، زمان‌بر بودن و تعمیم داده‌ها به سطح وسیعی از مزرعه، فناوری سنجش از دور برای این منظور در کانون توجه قرار گرفته است. این مطالعه با هدف برآورد تبخیر- تعلق گیاه یونجه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مقایسه و صحت‌سنجی آن‌ها با داده‌های برآورد شده از لایسیمتر، در طول سه سال زراعی (۱۳۹۹-۱۳۹۶)، در دو استان البرز و چهارمحال و بختیاری اجرا شد. در این پروژه مقدار تبخیر- تعلق یونجه در طول دوره رشد به دو روش: استفاده از ماهواره لندست ۸ در قالب الگوریتم سبال و استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار برآورد و نتایج مقایسه شد. چون تصاویر ماهواره‌ای تبخیر- تعلق گیاهان را در شرایط واقعی و لایسیمترها تبخیر- تعلق را در شرایط استاندارد ارائه می‌دهند، برای جلوگیری از ورود خطا، در این پروژه، تبخیر- تعلق پیکسل‌های سرد که دارای شرایط استاندارد هستند استفاده شد. میانگین مقدار نیاز خالص آب آبیاری یونجه در دو استان البرز و چهارمحال و بختیاری توسط لایسیمتر زهکش‌دار به ترتیب ۱۳۸۳ و ۱۰۸۷ میلی‌متر به دست آمد. تبخیر- تعلق به‌دست آمده از ماهواره و لایسیمتر در هر دو استان نشان از همبستگی نسبتاً مناسب بین تبخیر- تعلق حاصل از لایسیمتر و ماهواره داشت. در استان البرز و استان چهارمحال و بختیاری ضریب تبیین (R^2) به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۶ حاصل شد. افزون بر این، پراکندگی داده‌های این دو روش نسبت به میانگین کم بود و مقدار تبخیر- تعلق برآورد شده توسط لایسیمتر بیشتر از مقدار تبخیر- تعلق برآورد شده توسط ماهواره بود. در مجموع با توجه به مزایای فراوانی که ماهواره در برآورد تبخیر- تعلق دارد، از جمله ساده و ارزان بودن و دربر گرفتن سطح وسیعی از مزرعه، توصیه می‌شود از این فناوری برای برآورد آب مصرفی گیاهان زراعی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: نیاز آبی یونجه، آب مصرفی گیاه، لایسیمتر زهکش‌دار، الگوریتم سبال

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: موسسه تحقیقات خاک و آب، بخش آبیاری و فیزیک خاک، کرج.

مقدمه

سطح برداشت يونجه در كل کشور در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ حدود ۶۲۳ هزار هکتار برآورد شده که سهم اراضی آبی ۹۰/۹ درصد و سهم اراضی دیم ۹/۱ درصد است. همچنین میزان تولید يونجه کشور حدود ۶/۲ میلیون تن برآورد شده که سهم اراضی آبی ۹۷/۶ درصد و سهم اراضی دیم ۲/۴ درصد است. از نظر عملکرد کشوری، ۱۰۶۵۷ کیلوگرم عملکرد يونجه آبی و ۲۶۲۱ کیلوگرم عملکرد يونجه دیم در هکتار است. سطح زیر کشت يونجه (آبی و دیم) در استان‌های البرز و چهارمحال و بختیاری به ترتیب برابر با ۲۷۵۴ و ۱۳۷۹۰ هکتار است (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۹).

برآورد تبخیر- ترق به کمک فناوری سنجش از دور، برتری‌های متعددی بر اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای تبخیر- ترق دارد، از جمله: الف- این فناوری در زمان اندکی به پوشش مکانی گسترده و پیوسته تبخیر- ترق دست می‌یابد؛ ب- این فناوری برای تهیه اطلاعات مکانی (فضایی) نیاز به هزینه اندکی دارد؛ پ- استفاده از این فناوری به خصوص در مناطقی که نصب و استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی و یا سایر ابزارها مشکل یا غیرممکن است، امکان‌پذیر است (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸).

مختاری (۲۰۰۵) برای ارزیابی عملکرد زیست- توده و تبخیر- ترق، الگوریتم سبال را برای دو محصول چغندر قند و ذرت در دشت برخوار استان اصفهان به کار برد. نتایج این مطالعه نشان داد که تبخیر- ترق محاسبه‌شده با استفاده از الگوریتم سبال برای چغندر قند حدود ۲۰ درصد پایین‌تر و برای ذرت ۱۵ درصد بالاتر از روش فائو ۵۶ بود.

غلامی سفیدکوهی و همکاران (۱۳۸۹) کاربرد سری زمانی ۱۶ روزه شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) تصاویر سنجنده برای محاسبه مقادیر تبخیر- ترق واقعی گندم در طول دوره رشد در یک سطح وسیع (حوضه گرگانرود) را با استفاده از

اطلاعات ماهواره‌ای و زمینی بررسی کردند. نتایج آماری حاصل از روش بکار رفته در این تحقیق نسبت به روش فائو ۵۶ نشان داد که استفاده از این روش دارای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱۸ میلی‌متر، میانگین خطای مطلق (MAE) ۱۶ میلی‌متر، میانگین خطا (ME) ۱/۱- میلی‌متر و شاخص خطا (E) ۱/۱۹ درصد در کل فصل رشد گندم بود.

سهیلی‌فر و همکاران (۱۳۹۲) از داده‌های مودیس در الگوریتم سبال برای برآورد تبخیر- ترق (ET_a) در کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک‌خان استان خوزستان استفاده کردند. از مقایسه ET_a برآورد شده از سبال با ET₀ اندازه‌گیری شده از روش پنمن-مانتیت-فائو ۵۶ ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۷ و RMSE برابر با ۰/۶۶ میلی‌متر بر روز به دست آمد.

جوانشیر و همکاران (۱۴۰۰) در بررسی عملکرد الگوریتم سبال کوهستانی در برآورد تبخیر- ترق واقعی در شهرستان‌های شرق دریاچه ارومیه نتیجه گرفتند که مقدار تبخیر- ترق واقعی محاسبه شده از الگوریتم سبال برای گیاه مرجع در مرحله ابتدایی رشد، مرحله توسعه، مرحله میانی و پایانی رشد به ترتیب حداکثر ۱۸/۶۶، ۲۳/۹۹، ۱۴/۹۶ و ۱۶/۳ میلی‌متر در روز است. نتایج حاصل نشان داد که الگوریتم سبال قادر است پاسخ‌های معتبری را با صحت و دقت کافی در زمان نسبتاً کوتاهی ارائه نماید و به‌عنوان روشی کارآمد و سودمند در سازمان‌دهی منابع آب و بهینه‌سازی مصرف در تأمین نیاز آبی گیاهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد (جوانشیر و همکاران ۱۴۰۰).

ملک‌پور و همکاران (۱۳۹۵) مقادیر تبخیر- ترق و ماده خشک تولیدی در دشت قزوین با استفاده از الگوریتم سبال و برای ۵ تصویر گرفته‌شده از ماهواره لندست ۵ محاسبه کردند. نتایج اجرای الگوریتم سبال با داده‌های لایسومتر زهکش‌دار موجود در منطقه ارزیابی شد که مقدار ضریب تبیین ۰/۹۹۴۸ و میانگین تفاضل مطلق آن‌ها ۰/۴۴۶ میلی‌متر بر روز به دست آمد. این نتیجه نشان از دقت

خطای به دست آمده از الگوریتم سبال حاصل از این تحقیق برابر ۰/۱۵ میلی متر در روز بود.

مطالعه‌ای توسط روات و همکاران (۲۰۱۷) برای ارزیابی برآورد واقعی تبخیر- تعرق گندم در منطقه هاریانا کشور هند با استفاده از روش‌های الگوریتم سبال، لایسیمتر و روش فائو ۵۶ انجام شد. نتایج همبستگی خوبی بین سبال با داده‌های لایسیمتری ($r=0.85$) و ریشه میانگین مربعات خطای کمی با روش فائو ۵۶ ($RMSE=0.56$) نشان داد.

بانسوله و همکاران (۱۳۹۵) در ارزیابی برآورد تبخیر- تعرق واقعی ذرت در مراحل مختلف رشد با استفاده از الگوریتم سبس و تصاویر لندست، آزمایشی در ماهیدشت کرمانشاه اجرا کردند. در این آزمایش، پس از یکسان نمودن شرایط رشد در لایسیمتر و مزرعه، مقدار آب مصرفی، تبخیر- تعرق واقعی ذرت، همزمان با استفاده از یک لایسیمتر زهکش‌دار که در آن ذرت کشت شده بود اندازه‌گیری و با نتایج الگوریتم سبال مقایسه شد. حداکثر اختلاف بین تبخیر- تعرق برآورد شده با الگوریتم سبال در مزرعه ذرت و مقادیر اندازه‌گیری شده درون لایسیمتر ۰/۳۴ میلی متر در روز تعیین گردید که معادل ۴/۵۶ درصد تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده در همان روز بود.

بالا و همکاران (۲۰۱۵) برای ارزیابی و اعتبار سنجی تبخیر- تعرق با استفاده از الگوریتم سبال و داده‌های لایسیمتری، آزمایشی بر اساس داده‌های لندست ۷ (رزولوشن ۳۰ متر) در زمین‌های کشاورزی مؤسسه تحقیقات کشاورزی هند اجرا نمودند. تبخیر- تعرق حاصل از دو روش لایسیمتر و فناوری سنسجش از دور، با استفاده از چهار آزمون آماری (ضریب همبستگی (r^2))، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربع نرمال شده خطا ($NRMSE$)، مقایسه شدند. آماره‌های به دست آمده در این آزمایش ($NRMSE=0.21$ ، $MAE=0.19$ ، $RMSE=0.51$)، $r^2=0.91$) حاکی از همبستگی بالا بین مقادیر ET اندازه‌گیری و مشاهده شده بود. در نهایت توصیه نمودند که فناوری سنسجش از دور برای زمین‌های کشاورزی که در آن

مناسب روش سنسجش از دور در تخمین تبخیر- تعرق در سطح دشت دارد (ملک‌پور و همکاران، ۱۳۹۵).

زمان‌ثانی و همکاران (۱۳۹۶) در ارزیابی برآورد تبخیر- تعرق گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال در شهرستان حاجی‌آباد و مقایسه نتایج حاصل از آن با داده‌های لایسیمتر، نشان داد که میانگین تفاضل مطلق بین نتایج یاد شده ۰/۷ میلی متر در روز و ضریب همبستگی برابر ۰/۸۳ است. بررسی آماری نتایج با آزمون تی نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین نتایج حاصل از الگوریتم سبال و لایسیمتر وجود ندارد (زمان‌ثانی و همکاران، ۱۳۹۶).

راموس و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از الگوریتم سبال، تبخیر- تعرق منطقه فلومن دشت ابرو در شمال شرقی اسپانیا را بررسی و با مقادیر لایسیمتری مقایسه نمودند. نتایج به دست آمده نشان که داد الگوریتم سبال قادر به برآورد دقیق تبخیر- تعرق روزانه برای گندم، ذرت و چمن بوده است.

نوری و فرامرزی (۱۳۹۶) در بررسی تبخیر- تعرق کاربری‌های مختلف اراضی مناطق کوهستانی با استفاده از الگوریتم سبال و ترکیب تصاویر ماهواره‌ای مودیس و لندست ۸ نشان دادند که در برآورد تبخیر- تعرق روزانه، به طور میانگین ۰/۴۳ درصد اختلاف میان روش سبال و روش پنمن-مانتیث فائو ۵۶ وجود دارد و نتیجه گرفتند که می‌توان تبخیر- تعرق ساعتی و روزانه را برای منطقه در دست مطالعه با دقتی مناسب برآورد کرد.

کریمی و همکاران (۱۳۹۱) در برآورد تبخیر- تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم سبال در دشت ماهیدشت کرمانشاه، نشان دادند که حداکثر درصد خطا بین تبخیر- تعرق محاسبه شده برای محصول ذرت با الگوریتم سبال و مقادیر اندازه‌گیری شده در لایسیمتر کمتر از ده درصد بود.

جورج و همکاران (۲۰۱۳) میزان تبخیر- تعرق واقعی به دست آمده از الگوریتم سبال را در ایالت تگزاس امریکا مورد ارزیابی قرار دادند. میزان میانگین ریشه مربعات

داده‌های زمینی (داده‌های لایسیمیتری برای تخمین ET روزانه) در دسترس نیستند مفید بوده است.

صانع و همکاران (۱۳۹۹) در ارزیابی الگوریتم سبال برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی یونجه در منطقه وردیج استان تهران با استفاده از ماهواره لندست ۸ دریافتند که روش هارگریوز سامانی $MAE = 0/47$ و $RMSE = 0/62$ دارد و در رتبه بعدی روش فائو پنمن مانیت ($MAE = 1$ و $RMSE = 1/26$) قرار می‌گیرد. در ادامه تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده از الگوریتم سبال با مقدار متناظر به‌دست‌آمده از لایسیمیتر پورتابل وزنی مقایسه شد و نتایج به‌دست‌آمده مطابقت خوبی را نشان داد، به‌طوری‌که مقدار تفاضل مطلق $0/81$ (mm/day) به دست آمد و نتیجه گرفتند که روش سنسجش از دور برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در منطقه مورد مطالعه مناسب است.

مرشدی و همکاران (۱۳۹۵) در صحت سنسجی برآورد تبخیر - تعرق از الگوریتم سبال و مدل هارگریوز- سامانی با استفاده از داده‌های لایسیمیتر نشان دادند که مقادیر شاخص‌های MBE و MAE ، RMSE الگوریتم سبال نسبت به اندازه‌گیری‌های لایسیمیتری به ترتیب برابر با $1/728$ ، $1/275$ و $-0/272$ میلی‌متر بر روز و برای مدل هارگریوز سامانی مقادیر MBE و MAE ، RMSE به ترتیب برابر با $0/813$ ، $0/477$ و $0/206$ میلی‌متر بر روز بود. مطابق این مطالعات، فناوری سنسجش از دور می‌تواند جایگزین مناسبی برای برآورد تبخیر - تعرق گیاهان به شمار برود. بر این اساس این پژوهش با هدف ارزیابی و امکان‌سنجی به‌کارگیری از این فناوری در برآورد تبخیر- تعرق گیاه یونجه در دو منطقه از کشور با اقلیم مختلف انجام شد تا در صورت دارا بودن صحت لازم نسبت به روش لایسیمیتری، از آن برای برآورد تبخیر- تعرق گیاهان زراعی استفاده نمود.

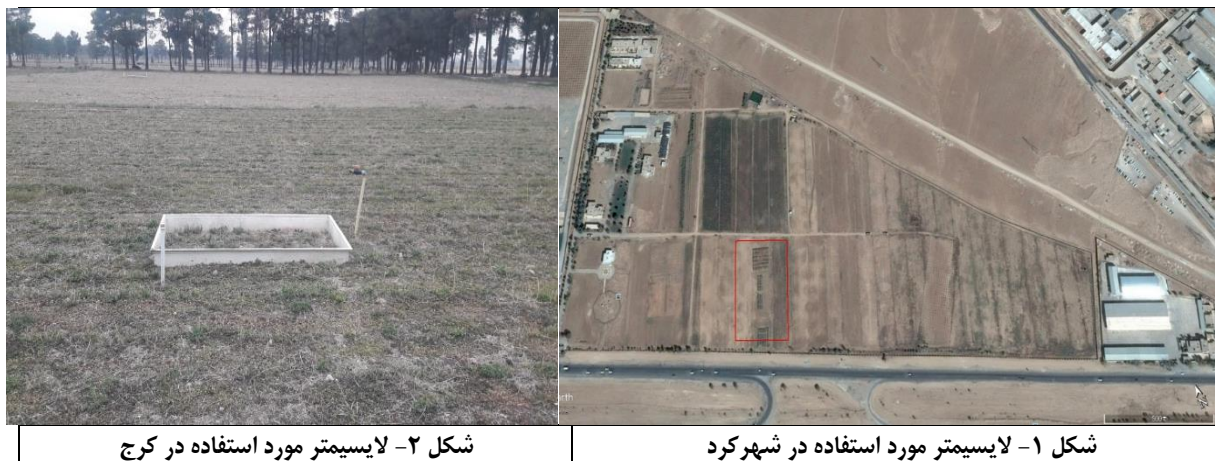
مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی استفاده از فناوری ماهواره در برآورد تبخیر- تعرق گیاه یونجه، آزمایشی در دو استان البرز و چهارمحال و بختیاری در سه سال زراعی از سال ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۹ اجرا شد. در این آزمایش مطابق دستورالعمل موجود، تبخیر- تعرق یونجه به دو روش؛ الف: استفاده از لایسیمیتر زهکش‌دار (گام اول) و ب: به‌کارگیری ماهواره لندست ۸ و استفاده از الگوریتم سبال، (گام دوم) و در نهایت تبخیر- تعرق حاصل از این دو روش، توسط معیارهای آماری متداول با هم مقایسه شدند (گام سوم).

در استان البرز آزمایش در مزرعه موسسه تحقیقات خاک و آب واقع در جنوب کرج با مشخصات جغرافیایی 50° درجه و $57'$ دقیقه و 21° ثانیه طولی و 35° درجه و $45'$ دقیقه و $30'$ ثانیه عرضی، با اقلیم نیمه‌خشک، زمستان نسبتاً سرد و تابستان نسبتاً معتدل اجرا شد. میانگین بارندگی سالیانه در آن حدود $247/4$ میلی‌متر و میانگین سالیانه دما و رطوبت نسبی هوا به ترتیب $14/4$ درجه سلسیوس و 53 درصد و ارتفاع مزرعه از سطح دریا 1289 متر بود. در استان چهارمحال و بختیاری، آزمایش در شهرکرد و در مزرعه تحقیقاتی چهارتخته بین طول‌های 50° درجه و $38'$ دقیقه تا 51° درجه و $10'$ دقیقه شمالی و عرض‌های 32° درجه و $07'$ دقیقه تا 33° درجه و $35'$ دقیقه شرقی، با اقلیم نیمه مرطوب معتدل سرد اجرا شد.

گام اول: برآورد تبخیر- تعرق گیاه یونجه با استفاده از لایسیمیتر

مهم‌ترین کاربرد لایسیمیتر، برآورد نیاز آبی (ETc) و ضرایب گیاهی (Kc) گیاهان زراعی و باغی در شرایط استاندارد (بدون محدودیت زراعی و تنش آبی) است. در استان چهارمحال و بختیاری از لایسیمیتری با شعاع دو متر و عمق دو متر در مرکز زمینی به ابعاد 120×50 متر (6000 متر مربع) و در استان البرز از لایسیمیتر به ابعاد $2 \times 2 \times 2$ متر در مرکز زمینی به ابعاد 30×30 متر استفاده شد (شکل‌های ۱ و ۲).



شکل ۲- لایسیمتر مورد استفاده در کرج

شکل ۱- لایسیمتر مورد استفاده در شهرکرد

مدرج جمع‌آوری و اندازه‌گیری گردید. مقدار بارش توسط ایستگاه هواشناسی کشاورزی واقع در محل اجرای طرح در هر دو منطقه، ثبت و در رابطه (۱) استفاده شد.

پس از حل معادله بیلان رطوبتی (رابطه ۱)، تبخیر- تعرق (خروجی رابطه شماره ۱) و نیاز آبی (خروجی رابطه ۱ منهای باران مؤثر) گیاه یونجه به صورت روزانه برآورد شد و تبخیر- تعرق برآورد شده به این طریق در روزهای عبور ماهواره، برای مقایسه با تبخیر- تعرق برآورد شده توسط ماهواره مورد استفاده قرار گرفت. برای برآورد باران مؤثر از رابطه ۲ استفاده شد:

$$Pe = 0.8 Pt - 2.4 \quad (2)$$

آماربرداری از نیمه دوم اسفند ۱۳۹۶ تا اول مهر ۱۳۹۸ به مدت سه سال زراعی ادامه داشت.

گام دوم: برآورد تبخیر- تعرق گیاه یونجه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر مورد استفاده در هر دو استان، از ماهواره لندست ۸ بود. علت انتخاب تصاویر ماهواره‌ای مورد اشاره قدرت تفکیک مکانی متوسط این تصاویر و در دسترس بودن آن بود. پس از دریافت تصاویر و پردازش آن توسط نرم‌افزارهای ENVI، ERDAS و Arcmap با استفاده از الگوریتم سبال تبخیر- تعرق یونجه برآورد گردید.

اساس کار این روش در برآورد تبخیر- تعرق یونجه بر خلاف روش لایسیمتری که در آن موازنه رطوبتی برقرار می‌شد، حل معادله بیلان انرژی است. معادله توازن

لایسیمترهای طراحی شده بسته به چگونگی اندازه‌گیری تبخیر- تعرق به دو دسته تقسیم می‌شوند: لایسیمترهای وزنی که دقیق‌ترین نوع لایسیمترها هستند، تبخیر- تعرق را بر اساس تغییرات وزن اندازه‌گیری می‌کنند و لایسیمترهای زهکش‌دار که ساده‌تر بوده و اساس کار آن‌ها برآورد نیاز آبی گیاهان بر اساس بیلان آبی در حجمی محدود به حجم لایسیمتر که گیاه مدنظر در آن کاشته شده است. آب‌های ورودی به این حجم از خاک شامل P: میزان بارندگی (میلی‌متر)، I: میزان آب آبیاری (میلی‌متر) و آب‌های خروجی شامل: D: میزان آب زهکش (میلی‌متر)، Etc: میزان تبخیر- تعرق گیاه (میلی‌متر) است. اگر میزان ورودی برابر خروجی در نظر باشد و تغییرات رطوبت خاک (ΔS) پیش و بعد از آبیاری هم در نظر گرفته شود مقدار تبخیر- تعرق در هر آبیاری از رابطه‌ی زیر برآورد می‌شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

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

آبیاری یونجه کشت‌شده درون لایسیمتر، توسط ظروف مدرج ۲۰ لیتری انجام شد و در هر دو منطقه زمان آبیاری (دور آبیاری) به‌گونه‌ای تنظیم شد که رطوبت خاک درون لایسیمتر در محدوده ظرفیت زراعی قرار گیرد و به‌منظور اطمینان از آبیاری کامل و نفوذ آب تا پایین منطقه توسعه ریشه در 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 از درون لایسیمتر پس از هر آبیاری توسط ظروف

سبال، تبخیر- تفرق ۲۴ ساعته یونجه بود (رابطه ۶) تبخیر- تفرق یونجه در لایسیمتر در روز عبور ماهواره به صورت روزانه محاسبه شد تا در مقایسه آن‌ها با داده‌ای ۲۴ ساعته ماهواره، از ورود خطا جلوگیری شود.

برای اجرای الگوریتم سبال نیازمند آمارهای هواشناسی سرعت باد و دمای هوا در لحظه گذر ماهواره است که این آمار از ایستگاه هواشناسی کشاورزی مستقر در هر یک از ایستگاه‌های تحقیقاتی منطقه اجرای پروژه دریافت شد.

مطابق تعاریف و استانداردهای تعیین شده، تبخیر- تفرق به دست آمده از روش لایسیمتری برای هر گیاه زراعی در شرایط بدون تنش، در شرایط استاندارد تعریف می‌شود (نشریه فائو ۵۶)، از طرف دیگر در استفاده از ماهواره و در تعریف پیکسل سرد، همین شرایط برای گیاه در نظر گرفته می‌شود (پیکسل سرد پیکسلی است که گیاه در آن هیچ نوع تنشی نداشته باشد) از این رو برای مقایسه این دو روش و ارزیابی ماهواره در برآورد تبخیر- تفرق گیاه یونجه، چندین مزرعه یونجه در منطقه مورد مطالعه انتخاب و در هر بار عبور ماهواره، پیکسل سرد استخراج و تبخیر- تفرق آن پیکسل با تبخیر- تفرق حاصل از لایسیمتر مقایسه و ارزیابی شدند.

گام سوم: صحت‌سنجی برآورد الگوریتم سبال

به منظور مقایسه تبخیر- تفرق روزانه گیاه یونجه حاصل از پیکسل سرد توسط ماهواره و تبخیر- تفرق روزانه این گیاه که توسط رابطه بیلان آبی در لایسیمتر محاسبه شد از شاخص‌های آماری صحت‌سنجی شامل میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین اریب (MBE) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (فاقد بعد) (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده گردید (روابط ۷ تا ۱۰):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \quad (8)$$

انرژی (معادله ۳) و محاسبه مقدار شار لحظه‌ای گرمای نهان تبخیر به عنوان باقی مانده این معادله برای هر پیکسل انجام شد:

$$\lambda ET_{inst} = R_n - G - H \quad (3)$$

در این معادله λET_{inst} شار گرمای نهان تبخیر (w/m^2)، R_n میزان تابش خالص خورشیدی (w/m^2)، G شار گرمای خاک (w/m^2) و H شار گرمای محسوس (w/m^2) است. سپس با استفاده از الگوریتم سبال که متشکل از مجموعه‌ای از روابط برای حل هر یک از پارامترهای معادله ۳ است محاسبه گردید آلن و همکاران (۲۰۰۵).

پس از حل معادله بیلان انرژی مقدار لحظه‌ای تبخیر- تفرق که برابر با عمق تبخیر است به صورت زیر محاسبه شد:

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

که ET_{inst} تبخیر- تفرق لحظه‌ای (میلی متر بر ساعت)، ۳۶۰۰ تبدیل زمانی از ثانیه به ساعت و λ گرمای نهان تبخیر یا گرمای جذب شده برای تبخیر یک کیلوگرم آب است. کسر یا جزء تبخیر- تفرق مرجع ($ET_r F$) به صورت نسبت تبخیر- تفرق لحظه‌ای (ET_{inst}) برای هر پیکسل به تبخیر- تفرق مرجع محاسبه شده از داده‌های هواشناسی تعریف می‌شود:

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (5)$$

ET_r تبخیر- تفرق مرجع در زمان عبور ماهواره از نرم افزار REF-ET بر حسب میلی متر بر ساعت به دست آمد. $ET_r F$ همان ضریب گیاهی KC است که در محاسبه تبخیر- تفرق واقعی استفاده شد.

تبخیر- تفرق لحظه‌ای برآورد شده در این الگوریتم کاربردی نیست، بنابراین مقادیر تبخیر- تفرق روزانه (ET_{24}) که مفیدتر و کاربردی‌تر از تبخیر- تفرق لحظه‌ای است بر حسب میلی متر بر روز از رابطه زیر محاسبه شد:

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_r - 24 \quad (6)$$

$ET_r - 24$ مجموع تبخیر- تفرق ۲۴ ساعته گیاه مرجع در روز عبور ماهواره است. چون خروجی نهایی الگوریتم

۱۴۸۰ میلی‌متر و میانگین سه‌ساله تبخیر- تعرق و نیاز آبیاری به ترتیب ۱۵۴۱ و ۱۳۸۳/۵ میلی‌متر نیاز برآورد شد. در طول سه سال اجرای آزمایش در شرایط بدون ابر ۳۳ عدد تصویر دریافت شد که ۱۰ فقره مربوط به سال ۱۳۹۷، ۱۱ فقره مربوط به سال ۱۳۹۸ و ۱۲ فقره مربوط به سال زراعی ۱۳۹۹ بودند؛ به عبارت دیگر تبخیر- تعرق برآورد شده یونجه توسط ماهواره (ET_{CS}) در سال ۱۳۹۷، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ در یک شرایط مشابه با لایسیمتر (ET_{CL}) به ترتیب در ۱۰، ۱۱ و ۱۲ روز دقیقاً متناظر با روزهایی که توسط لایسیمتر اندازه‌گیری شده بود، برآورد و مورد مقایسه قرار گرفتند (جداول ۲ تا ۴). نمودار این مقادیر در شکل (۳) با عرض از مبدأ نشان داده شده است.

شاخص‌های آماری صحت‌سنجی حاصل از مقایسه این دو روش برآورد تبخیر- تعرق یونجه، در جدول ۵ نشان داده شد. ضریب تبیین (R²) رابطه بین تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر و برآورد شده توسط الگوریتم سبال، ۰/۵۳ به دست آمد و نشان داد که همبستگی نسبتاً مناسبی بین این دو روش برای دستیابی به تبخیر- تعرق وجود دارد و الگوریتم سبال در شرایط مدیریتی مشابه در لایسیمتر و مزرعه مورد استفاده از نظر تاریخ کاشت، مدیریت تغذیه و آبیاری، مبارزه با آفات و بیماری‌ها و تاریخ برداشت، از همبستگی قابل قبولی برخوردار است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad (10)$$

در روابط زیر O_i و P_i به ترتیب مقدار ET اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و مقدار برآورد شده توسط ماهواره و \bar{O} میانگین حسابی داده‌های اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها است. افزون بر آن روابط مقدار برآورد شده و اندازه‌گیری شده در نمودار ۱:۱ تحلیل شدند.

نتایج و بحث

استان البرز (کرج)

در طول سه سال اجرای آزمایش، پس از اندازه‌گیری مقدار آب ورودی و خروجی در لایسیمتر، با استفاده از رابطه (۱) تبخیر- تعرق روزانه و براساس آن میانگین ۱۰ روزه تبخیر- تعرق گیاه یونجه محاسبه و مقادیر آن به تفکیک سال اجرای پروژه در جدول ۱ ارائه شد. مقدار تبخیر- تعرق و نیاز خالص آبیاری گیاه یونجه در استان البرز در طول مراحل رشد با استفاده از لایسیمتر، در مزرعه ایستگاه تحقیقاتی موسسه تحقیقات خاک و آب در سال زراعی ۱۳۹۷، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ به ترتیب ۱۵۹۹/۲، ۱۵۴۴ و

جدول ۱- میزان تبخیر- تعرق و نیاز خالص آبیاری اندازه‌گیری شده گیاه یونجه در طول مراحل رشد با استفاده از لایسیمتر در سه سال

ماه	دهه	۱۳۹۷		۱۳۹۸		۱۳۹۹	
		ETc (mm)	نیاز آبیاری (mm)	ETc (mm)	نیاز آبیاری (mm)	ETc (mm)	نیاز آبیاری (mm)
اسفند	۲	۱۵	۸/۷	۱۷	۱۰	۱۷	۶/۶
	۳	۲۱	۱۷/۱	۲۳	۷/۳	۲۱	۲۰
فروردین	۱	۲۵	۲۵	۲۵	۰	۲۵	۸/۵
	۲	۳۵	۲۷/۹	۲۸	۵/۶	۲۸	۰
	۳	۴۹	۲۱	۴۴	۳۲/۴	۴۴	۲/۷
اردیبهشت	۱	۶۵/۵	۵۳/۵	۵۵/۵	۵۵/۳	۵۰/۵	۳۴/۶
	۲	۸۱	۶۴/۸	۶۷	۶۳/۸	۶۷	۵۱/۳
	۳	۸۲/۵	۷۳/۴	۸۷/۵	۸۱/۳	۷۷/۵	۷۷/۱
خرداد	۱	۸۹	۵۷	۸۴	۸۳/۲	۸۴	۶۴/۲
	۲	۹۰	۸۴/۸	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶
	۳	۹۲	۸۹/۴	۹۲/۵	۹۲/۵	۸۷/۵	۸۷/۵
تیر	۱	۹۳	۹۳	۹۳/۵	۹۳/۵	۸۸/۵	۸۸/۵
	۲	۹۴	۹۴	۹۳	۹۳	۹۲/۵	۹۲/۵
	۳	۹۵	۹۵	۹۹	۹۹	۹۴	۹۳/۹
مرداد	۱	۹۵	۹۵	۹۱	۹۱	۹۵/۵	۹۵/۳
	۲	۹۴	۹۴	۹۲	۹۲	۹۷/۵	۹۷/۵
	۳	۹۰/۵	۹۰/۵	۹۱	۹۱	۹۱	۹۱
شهریور	۱	۹۰/۵	۹۰/۵	۸۹	۸۹	۹۹	۹۹
	۲	۸۷/۵	۸۷/۵	۷۶	۷۶	۷۶	۷۶
	۳	۷۸	۷۸	۶۶	۶۶	۶۶	۶۶
مهر	۱	۶۲/۵	۶۲/۵	۵۰/۵	۵۰/۵	۵۷/۵	۵۷/۵
	۲	۳۶/۲	۲۳/۶	۴۲	۴۲	۳۵	۳۵/۳
	۳	۳۸	۳۴/۴	۳۱/۶	۳۱/۶		
آبان	۱			۱۹/۹	۰		
جمع		۱۵۹۹/۲	۱۴۶۰/۸	۱۵۴۴	۱۳۶۲/۹	۱۴۸۰	۱۳۲۶/۹

جدول ۲- مقادیر تبخیر- تعرق (میلی‌متر) برآورد شده از طریق بهره‌گیری از لایسیمتر و الگوریتم سبال در سال ۱۳۹۷

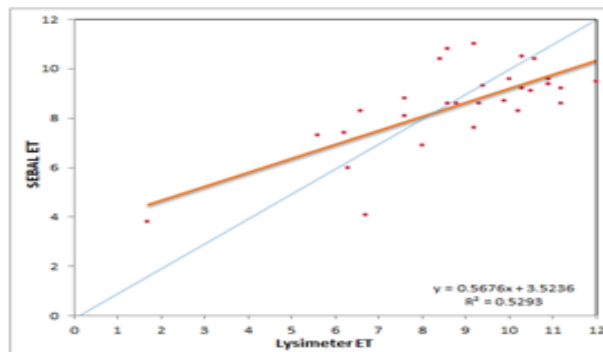
تاریخ	۹۷/۲/۱۰	۲/۱۶	۳/۴	۳/۱۱	۳/۲۷	۴/۱۲	۵/۱۳	۵/۲۹	۶/۳۱	۱۲/۱۶
ETcs	۷/۶	۱۱	۹/۴	۹/۶	۹/۵	۹/۲	۹/۶	۸/۳	۶/۹	۳/۸
ETcl	۹/۲	۹/۲	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۲	۱۱/۲	۱۰/۶	۱۰/۲	۸	۱/۷

جدول ۳- مقادیر تبخیر- تعرق (میلی‌متر) برآورد شده از طریق بهره‌گیری از لایسیمتر و الگوریتم سبال در سال ۱۳۹۸

تاریخ	۹۸/۲/۶	۲/۱۳	۲/۲۲	۲/۲۹	۹۸/۳/۱۴	۳/۳۰	۴/۱۵	۵/۱	۶/۱	۶/۱۷	۷/۲
ETcs	۷/۷	۴/۱	۸/۷	۸/۶	۸/۶	۸/۶	۱۰/۵	۹/۱	۸/۷	۸/۱	۷/۴
ETcl	۷/۶	۶/۷	۹/۸	۸/۸	۸/۶	۹/۳	۱۰/۳	۱۰/۵	۹/۹	۷/۶	۶/۲

جدول ۴- مقادیر تبخیر- تعرق (میلی‌متر) برآورد شده از طریق بهره‌گیری از لایسیمتر و الگوریتم سبال در ۱۳۹۹

تاریخ	۱/۱۵	۱/۳۱	۲/۹	۳/۱	۳/۱۶	۴/۱	۴/۱۸	۵/۳	۵/۱۹	۶/۴	۶/۱۹	۷/۵
ETcs	۷/۳	۸/۳	۸/۸	۱۰/۴	۱۰/۸	۹/۳	۹/۲	۱۰/۴	۸/۶	۹/۴	۹/۶	۶
ETcl	۵/۶	۶/۶	۷/۶	۸/۴	۸/۶	۹/۴	۱۰/۳	۱۰/۶	۱۱/۲	۱۰/۹	۱۰	۶/۳



شکل ۳- منحنی رابطه بین تبخیر- تعرق (میلی‌متر) برآورد شده توسط الگوریتم سبال و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر از شروع سال زراعی ۹۶ تا پایان سال زراعی ۹۹ در استان البرز

جدول ۵- شاخص‌های آماری صحت‌سنجی تبخیر- تعرق برآورد شده توسط الگوریتم سبال و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر از شروع سال زراعی ۹۶ تا پایان سال زراعی ۹۹ در شهرستان کرج

پارامتر آماری	مقدار
R ²	۰/۵۳
MAE	۱/۲۴
MBE	-۰/۳۵
RMSE	۱/۴۶
NRMSE	۰/۱۷

مدیریت آبیاری بهره‌بردار بود ممکن است یکنواختی آبیاری مشابه لایسیمتر نباشد، به‌ویژه پیکسلی که تبخیر- تعرق آن برای مقایسه با تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر بکار برده می‌شود. از این رو رشد گیاه یونجه در این مزارع کمتر از رشد آن در لایسیمتر است. رشد بهتر از لحاظ ارتفاع و سطح برگ سبب افزایش تبخیر- تعرق می‌شود.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و برآورد شده توسط الگوریتم سبال برای ۳۳ زوج داده، ۱/۴۶ میلی‌متر در روز بود که اگر به‌صورت بدون بعد و نسبت به میانگین تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر محاسبه شود، برابر ۱۷ درصد خواهد شد. با عنایت به زیر ۱۰ درصد بودن شاخص NRMSE نشان‌دهنده دقیق بودن، ۲۰-۳۰ درصد مناسب بودن، ۳۰-۴۰ درصد متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است (خرسند و همکاران، ۱۳۹۳) از این رو مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده نشان از مناسب بودن استفاده از

علامت منفی شاخص MBE و مقدار آن نشان داد که در مجموع مقدار تبخیر- تعرق برآورد شده توسط لایسیمتر بیشتر از مقدار برآورد شده توسط ماهواره بوده است. مقدار شاخص MAE یا میانگین قدر مطلق اختلاف تبخیر- تعرق بین دو روش اندازه‌گیری، بیانگر تفاوت قابل قبول نتایج این دو روش برآورد تبخیر- تعرق یونجه در شهرستان کرج بود. دلیل بالا بودن مقدار تبخیر- تعرق در لایسیمتر، رشد بهتر گیاه یونجه در داخل لایسیمتر نسبت به مزرعه است. در هر آبیاری به دلیل زهکش شدن آب آبیاری از قسمت تحتانی لایسیمتر، تهویه هوای درون خاک آن نسبت به مزرعه بهتر انجام می‌شود و این باعث بهبود شرایط رشد گیاه یونجه در لایسیمتر می‌شود، از طرف دیگر رطوبت خاک درون لایسیمتر همواره در شرایط رطوبت ظرفیت زراعی است اما این شرایط برای مزارع یونجه استفاده شده در ماهواره به دلیل نبود زهکش مناسب ممکن است وجود نداشته باشد و گیاه یونجه در مزرعه نسبت به لایسیمتر در شرایط رطوبتی متفاوتی قرار گیرد از طرفی چون مزارع مورد استفاده در فناوری سنجش از دور، تحت

به‌وسیله لایسیمتر در جدول ۶ نشان داده شد. مقدار تبخیر- تعرق و نیاز خالص آبیاری گیاه یونجه در استان چهارمحال و بختیاری در طول مراحل رشد با استفاده از لایسیمتر، در مزرعه ایستگاه تحقیقاتی چهار تخته مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری در سال زراعی ۱۳۹۷، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ به ترتیب ۱۰۶۶/۲، ۱۱۴۱/۴ و ۱۲۲۰/۶ میلی‌متر برآورد شد.

الگوریتم سبال در برآورد تبخیر- تعرق گیاه یونجه و فاصله کم بین تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده و برآورد شده در این دو روش است.

استان چهارمحال و بختیاری (شهرکرد)

مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر- تعرق گیاه یونجه در استان چهارمحال و بختیاری از سال زراعی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۹

جدول ۶- میزان تبخیر- تعرق و نیاز خالص آبیاری اندازه‌گیری شده گیاه یونجه در طول مراحل رشد با استفاده از لایسیمتر در سه سال

ماه	دهه	۱۳۹۷		۱۳۹۸		۱۳۹۹	
		ETc (mm)	نیاز آبیاری (mm)	ETc (mm)	نیاز آبیاری (mm)	ETc (mm)	نیاز آبیاری (mm)
فروردین	۱	۷/۱	۷/۱	۱۶/۲	۱۶/۲	۲	۲
	۲	۲۲/۸	۲۰/۹	۲۴/۶	۲۴/۶	۱۳/۶	۱۳/۶
	۳	۲۵/۵	۱۷/۹	۳۷/۴	۳۲/۹	۲۸/۶	۲۴/۱
اردیبهشت	۱	۳۹/۶	۳۰/۹	۳۸/۷	۳۸/۷	۴۰/۶	۴۰/۶
	۲	۴۷/۳	۳۸/۹	۴۸/۷	۴۸/۷	۴۱/۴	۴۱/۴
	۳	۵۲/۲	۵۰/۸	۷۲/۶	۷۲/۶	۶۴/۴	۶۴/۴
خرداد	۱	۵۳/۶	۵۳/۶	۵۸/۷	۵۸/۷	۶۲/۵	۶۲/۵
	۲	۵۰/۵	۵۰/۵	۶۷/۳	۶۷/۳	۷۴/۳	۷۴/۳
	۳	۶۰	۶۰	۷۴/۸	۷۴/۸	۸۸/۶	۸۸/۶
تیر	۱	۶۵/۱	۶۵/۱	۷۴/۴	۷۴/۴	۷۰/۴	۷۰/۴
	۲	۷۷/۷	۷۷/۷	۶۹/۹	۶۹/۹	۸۰/۸	۸۰/۸
	۳	۶۲/۵	۶۲/۵	۷۸/۵	۷۸/۵	۸۳/۶	۸۳/۶
مرداد	۱	۸۰/۱	۸۰/۱	۷۱	۷۱	۷۴/۵	۷۴/۵
	۲	۷۴/۹	۷۴/۹	۶۸/۴	۶۸/۴	۷۱/۸	۷۱/۸
	۳	۷۲/۸	۷۲/۸	۷۴/۸	۷۴/۸	۸۶/۴	۸۶/۴
شهریور	۱	۶۱/۷	۶۱/۷	۶۳/۵	۶۳/۵	۶۹	۶۹
	۲	۶۳/۲	۶۳/۲	۵۳/۵	۵۳/۵	۶۰	۶۰
	۳	۵۰/۳	۵۰/۳	۵۴/۹	۵۴/۹	۶۳/۸	۶۳/۸
مهر	۱	۴۱	۴۱	۳۵/۵	۳۵/۵	۵۵	۵۵
	۲	۳۴/۶	۳۴/۶	۳۱	۳۱	۵۱/۸	۵۱/۸
	۳	۲۴	۲۴	۲۷	۲۷	۳۷/۶	۳۷/۶
جمع کل		۱۰۶۶/۲	۱۰۳۸/۲	۱۱۴۱/۴	۱۰۷۱/۹	۱۲۲۰/۶	۱۱۵۱/۱

۱۳۹۷، ۱۲ فقره مربوط به سال ۱۳۹۸ و ۱۰ فقره مربوط به سال زراعی ۱۳۹۹ بودند؛ به عبارت دیگر تعداد روزهای تبخیر- تعرق برآورد شده یونجه توسط ماهواره (ETCs) در سال ۱۳۹۷، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ به ترتیب ۱۷، ۱۲ و ۱۰ روز بود که معادل آن در همین روزها از طریق لایسیمتر (ETCL) برآورد و مقایسه شدند (جدول ۷ تا ۹).

میانگین مقدار تبخیر- تعرق (ETC) و نیاز خالص آبیاری گیاه یونجه در چهارمحال و بختیاری در طول سه سال اجرای آزمایش به ترتیب ۱۱۴۳ و ۱۰۸۷ میلی‌متر بدست آمد.

در طول سه سال اجرای آزمایش در شرایط بدون ابر ۳۹ عدد تصویر دریافت شد که ۱۷ فقره مربوط به سال

برای برآورد تبخیر- تعرق با ماهواره را داشت برای این منظور استفاده شد؛ بنابراین خطای احتمالی ناشی از اثر تفاوت در مدیریت آبیاری لایسیمتر و مزرعه مورد استفاده در ماهواره در این منطقه از اجرای پروژه وجود نداشت. میانگین تبخیر- تعرق برآورد شده توسط الگوریتم سبال و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر در این منطقه به ترتیب ۶/۳ و ۶/۵ میلی‌متر بدست آمد. شاخص‌های آماری صحت-سنجی و در مقایسه دو روش تعیین تبخیر- تعرق، برای این استان در جدول ۱۰ نشان داده شدند.

مقادیر تبخیر- تعرق روزانه اندازه‌گیری و برآورد شده توسط لایسیمتر و ماهواره در روز عبور ماهواره در استان چهارمحال و بختیاری به شرح جدول ۴، ۵ و ۶ به ترتیب برای سال‌های ۱۳۹۷، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ و نمودار این مقادیر در شکل (۴) با عرض از مبدأ نشان داده شده است. بر خلاف استان البرز، در این استان لایسیمتر در مرکز مزرعه یونجه‌ای قرار داشت که برای برآورد تبخیر- تعرق توسط ماهواره استفاده شد (شکل ۱)؛ به عبارت دیگر مزرعه استفاده‌شده در روش ماهواره نقش کشت حاشیه‌ای اطراف لایسیمتر را داشت اما چون وسعت آن کفایت لازم

جدول ۷- مقادیر تبخیر- تعرق (میلی‌متر) برآورد شده از طریق بهره‌گیری از لایسیمتر و الگوریتم سبال در استان چهارمحال و بختیاری

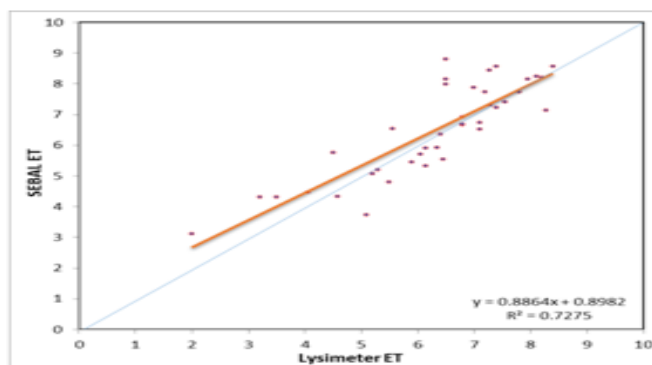
تاریخ	۳/۴	۳/۲۰	۳/۲۸	۴/۵	۴/۱۳	۴/۲۱	۴/۲۹	۵/۶	۵/۱۴	۵/۲۲	۵/۳۰	۶/۷	۶/۱۵	۶/۲۳	۶/۳۱
ET _{cs}	۵/۳	۴/۶	۷/۴	۶/۲	۸	۶/۲	۶/۴	۸/۳	۷/۶	۷/۳	۷/۳	۶/۱	۶/۵	۵/۶	۴/۵
ET _{cl}	۵/۲	۴/۳	۷/۲	۵/۹	۸/۲	۵/۳	۵/۹	۷/۱	۷/۴	۸/۴	۷/۳	۵/۷	۵/۵	۶/۵	۵/۸

جدول ۸- مقادیر تبخیر- تعرق (میلی‌متر) برآورد شده از طریق بهره‌گیری از لایسیمتر و الگوریتم سبال در استان چهارمحال و بختیاری

تاریخ	۷/۸	۹۷/۷/۱۶	۲/۲۲	۳/۷	۳/۱۵	۳/۲۳	۳/۳۱	۴/۸	۴/۱۶	۴/۲۴	۵/۲۵	۶/۱۰	۶/۲۶	۶/۳۱	۷/۱۱
ET _{cs}	۴/۱	۳/۵	۶/۵	۶/۵	۶/۸	۶/۴	۷/۲	۸/۴	۶/۸	۷/۱	۶/۸	۵/۹	۵/۲	۵/۲	۳/۲
ET _{cl}	۴/۵	۴/۳	۸	۸/۲	۶/۷	۶/۴	۷/۷	۸/۶	۶/۷	۶/۷	۶/۹	۵/۵	۵/۱	۴/۳	۴/۳

جدول ۹- مقادیر تبخیر- تعرق (میلی‌متر) برآورد شده از طریق بهره‌گیری از لایسیمتر و الگوریتم سبال در استان چهارمحال و بختیاری

تاریخ	۲/۲۶	۳/۳	۳/۱۱	۳/۱۹	۳/۲۷	۴/۲۸	۵/۵	۶/۳۰	۷/۱۵	۸/۱
ET _{cs}	۶/۵	۷	۷/۴	۸/۱	۸/۲	۷/۸	۷/۱	۵/۵	۵/۱	۲
ET _{cl}	۸/۸	۷/۹	۸/۶	۸/۲	۸/۲	۷/۷	۶/۵	۴/۸	۳/۷	۳/۱



شکل ۴- منحنی رابطه بین تبخیر- تعرق (میلی‌متر) برآورد شده توسط الگوریتم سبال و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر از شروع سال زراعی ۹۶ تا پایان سال زراعی ۹۹ در استان چهارمحال و بختیاری

جدول ۱۰- شاخص‌های آماری صحت‌سنجی تبخیر- تعرق یونجه برآورد شده توسط الگوریتم سبال و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر از شروع سال زراعی ۹۶ تا پایان سال زراعی ۹۹ در استان چهارمحال و بختیاری

مقدار	پارامتر آماری
۰/۷۳	R ²
۰/۶۲	MAE
-۰/۱۶	MBE
۰/۸۳	RMSE
۰/۱۲	NRMSE

لایسیمتر توسط لوله زهکش نصب‌شده در قسمت تحتانی آن خارج می‌شود و این علاوه بر اینکه مانع غرقاب شدن لایسیمتر و جذب آب و املاح توسط ریشه گیاهان نمی‌شود، بلکه باعث تهویه مناسب هوای درون خاک و بهبود شرایط رشد گیاه یونجه در لایسیمتر می‌شود، در نتیجه گیاه یونجه از نظر سطح پوشش، ارتفاع، سبزی‌نگی، تراکم کاشت و شاخص سطح برگ نسبت به گیاه یونجه داخل مزرعه که شرایط ماندابی برای آن حتی تا چند روز پس از آبیاری محتمل است، بهتر شده بنابراین نور بیشتر، فتوسنتز بیشتر و در نتیجه نیاز آبی بیشتری خواهد داشت؛ اما اختلاف ناچیز این دو روش تعیین تبخیر- تعرق گیاه یونجه، بیشتر به دلیل شرایط یکسان لایسیمتر و مزرعه و جانمایی مناسب آن‌ها نسبت به یکدیگر است.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و برآورد شده توسط ماهواره برای ۳۹ زوج داده، نشان داد که پراکندگی داده‌های تبخیر- تعرق به‌دست‌آمده ماهواره در این منطقه کمتر از استان البرز است شاخص NRMSE نیز این موضوع را تأیید می‌کند چرا که مقدار آن در این منطقه نسبت به استان البرز کمتر بود (۱۲ درصد). نزدیکی لایسیمتر و مزرعه مورد استفاده اجازه ورود خطا در اثر پارامترهای هواشناسی را هم نمی‌داد در این پروژه در منطقه چهارمحال و بختیاری از ورود هر نوع عامل ایجاد خطا در برآورد تبخیر- تعرق در هر دو روش جلوگیری و با حداکثر دقت تبخیر- تعرق گیاه یونجه از طریق ماهواره و لایسیمتر تعیین شد که نتایج در این استان این موضوع را تأیید می‌کند. بر این اساس در این منطقه از کشور هم با اطمینان بیشتر

همان‌طور که در جدول شماره ۱۰ مشاهده می‌شود، ضریب تبیین (R²) بین مقادیر تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و برآورد شده توسط الگوریتم سبال در این منطقه از کشور ۰/۷۳ است که بیانگر همبستگی خوبی بین دو روش برآورد تبخیر- تعرق است. مقدار بالای این شاخص آماری در این استان نسبت به استان البرز نشان داد که مدیریت آبیاری یکسان لایسیمتر و مزرعه استفاده شد برای گرفتن تصویر ماهواره‌ای، (هر دو در یکجا و با هم آبیاری می‌شدند) نقش زیادی در صحت انجام کار دارد و بخش زیادی از خطاهای ایجاد شده در اثر فاصله بین دو مکان اندازه‌گیری و یکسان نبودن مدیریت آبیاری یونجه در لایسیمتر و مزرعه است. علامت منفی MBE و مقدار آن نشان داد که در مجموع مقدار تبخیر- تعرق برآورد شده توسط لایسیمتر بیشتر از مقدار برآورد شده توسط الگوریتم سبال است اما این مقدار در مقایسه با استان البرز کمتر است. مقدار شاخص MAE بیانگر تفاوت بسیار اندک نتایج این دو روش برآورد تبخیر- تعرق یونجه در شهرستان شهرکرد بود. تفاوت مقدار MAE و MBE در این استان نشان داد که در برخی از تصاویر، مقدار تبخیر- تعرق برآورد شده توسط ماهواره بیشتر از تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر است و در برخی از تصاویر برعکس. بیشتر بودن تبخیر- تعرق برآورد شده نسبت به اندازه‌گیری شده در طول سه سال از روند مشخصی پیروی نکرد. اختلاف میانگین تبخیر- تعرق یونجه در لایسیمتر با میانگین تبخیر- تعرق به‌دست‌آمده از ماهواره بسیار کم بود (حدود ۰/۳ میلی‌متر). این اختلاف جزئی را می‌توان به رشد بهتر گیاه یونجه در داخل لایسیمتر نسبت به مزرعه به دلیل تهویه هوای بهتر دانست چون در هر آبیاری، زه‌آب آبیاری داخل

لایسیمتر بود و نشان داد که شرایط رشد گیاه در لایسیمتر با مزرعه اطراف متفاوت است و رشد گیاه در درون لایسیمتر به دلیل نبود هیچ نوع تنش و وجود تهویه مناسب بهتر انجام شده در نتیجه مقدار تعرق در آن بیشتر است؛ بنابراین بخشی از اختلاف تبخیر- تعرق در این دو روش، مربوط به اختلاف رشد گیاه در بستر کشت در طول دوره رشد گیاه یونجه بود.

در استان البرز و چهارمحال و بختیاری برآورد تبخیر- تعرق یونجه توسط الگوریتم سبال قابل قبول بوده و با توجه به مزایایی که استفاده از ماهواره مثل پوشش سطح وسیع مزرع، سریع و ارزان بودن، نیاز به حداقل داده‌های میدانی دارد استفاده از این فناوری برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی گیاه یونجه توصیه می‌شود.

برآورد تبخیر- تعرق یونجه توسط الگوریتم سبال قابل قبول است.

نتیجه‌گیری

مقدار میانگین تبخیر- تعرق و نیاز آبی گیاه یونجه در استان چهارمحال و بختیاری کمتر از مقدار میانگین تبخیر- تعرق و نیاز آبی گیاه یونجه در استان البرز بود و نشان داد در مناطق مختلف به دلیل تغییر عوامل اقلیمی مقادیر تبخیر- تعرق و نیاز آبی گیاه یونجه متفاوت است و باید برای هر منطقه به صورت جداگانه تعیین شود. مقدار تبخیر- تعرق برآورد شده توسط الگوریتم سبال در هر دو استان کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده آن توسط دستگاه

فهرست منابع

۱. آمارنامه کشاورزی. ۱۳۹۹. وزارت جهاد کشاورزی.
۲. بانسوله، ب. ف.، کریمی، ع. ر. و حصادی، ه. ۱۳۹۵. برآورد تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبس و تصاویر لندست در ماهیدشت. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۳۰. شماره ۳. ص. ۷۱۶-۷۰۶.
۳. جوانشیر ز.، ولیزاده کامران خ.، رسولی ع. ا. و رستم‌زاده ه. ۱۴۰۰. بررسی عملکرد مدل سبال کوهستانی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی مطالعه موردی: شهرستان‌های شرق دریاچه ارومیه. جغرافیا و برنامه‌ریزی. شماره ۷۵. صفحات ۹۱-۱۰۰.
۴. خرسند، ا.، وردی‌نژاد، و. ر. و شهیدی، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم، رطوبت و شوری نیمرخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم‌آبی. مدیریت آب و آبیاری. دوره ۴. شماره ۱. ص. ۸۹-۱۰۴.
۵. راد، م. ه.، میرحسینی، س. ر.، م. مشکوه، م. ع. و سلطانی، م. ۱۳۸۷. بررسی تأثیر رطوبت خاک بر چگونگی توسعه ریشه گیاه تاغ. فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران. جلد ۱۶. شماره ۱. صفحه ۱۱۲-۱۱۳.
۶. زمانی‌ثانی، ا.، خورانی، ا.، صادقی لاری، ع. و سدیدی ج. ۱۳۹۶. ارزیابی برآورد تبخیر- تعرق گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال (مطالعه موردی: ایستگاه تحقیقات کشاورزی شهرستان حاجی‌آباد). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. دوره ۴۹ شماره ۴. صفحات ۶۸۱-۶۶۷.
۷. سهیلی‌فر، ز.، میرلطیفی، س. م.، ناصری، ع. ع. و عصار، م. ۱۳۹۲. برآورد تبخیر - تعرق واقعی نیشکر با استفاده از داده‌های سنجنش از دور در اراضی کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان. نشریه دانش آب و خاک. جلد ۲۳ شماره ۱ صفحه‌های ۱۵۱ تا ۱۶۳.

۸. صانع، م.، کوچکزاده، م. و شریفی، ف. ۱۳۹۹. ارزیابی الگوریتم سبال جهت برآورد تبخیر- تعرق واقعی در منطقه وردیج. مجله آبیاری و زهکشی ایران. دوره ۱۴. شماره ۱. صفحه ۱۳۵-۱۲۵.
۹. غلامی سفیدکوهی، م.، و میرلطیفی، س.، و 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)، ۲۲۲-۲۳۱.
۱۰. کریمی، ع.، ب. فرهادی بانسوله. ه. حصادی. ۱۳۹۱. برآورد تبخیر- تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۴، جلد ۶، ص. ۳۶۴-۳۵۳.
۱۱. مرشدی، ع. طباطبایی، س. ح. و مهدی، ن. ۱۳۹۵. صحت سنجی برآورد تبخیر و تعرق از مدل‌های سبال و هارگریوز- سامانی با استفاده از داده‌های لایسیمتر. مجله آب و خاک. شماره ۲ دوره ۳۰.
۱۲. ملک‌پور م.، بابازاده ح.، کاوه ف. و ابراهیمی پاک ن. ع. ۱۳۹۵. برآورد تبخیر- تعرق واقعی و بهره‌وری آب گندم با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌های لندست ۵ در دشت قزوین. پژوهش آب در کشاورزی. دوره ۳۰/۴. شماره ۴. ۵۸۲-۵۶۹.
۱۳. نوری ح. و فرامرزی. ۱۳۹۶. بررسی تبخیر- تعرق در کاربری‌های مختلف اراضی مناطق کوهستانی با استفاده از الگوریتم سبال و ترکیب تصاویر ماهواره‌های MODIS و Landsat8. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. دوره ۲۸. شماره ۲. صفحات ۵۶-۳۹.
14. Allen RG, Tasumi M, and Trezza R, 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) Model." J. Irrig. Drain. Eng., 133- 4- 380-394.
15. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements, irrigation and drain, paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp
16. Allen RG, Tasumi M, Trezza R, Bastiaanssen W, Morse T, Kramber W, and Wright J, 2005. METRIC: High Resolution Satellite Quantification of Evapotranspiration. Part Two – Energy Balance, University of Idaho, Kimberly, Idaho.
17. Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 300 p.
18. Almhab A, and Busu I, 2008. Estimation of evapotranspiration with modified SEBAL model using Landsat-TM and NOAA-AVHRR images in aride mountains area. Proceedings of second Asia International Conference on Modelling & Simulation, 13-15 may, Kuala Lumpur, 350-355.
19. Bala A, Rawat KS, Misra AK, Srivastava A, 2015a. Assessment and validation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and Lysimeter data of IARI agricultural farm, India. Geocarto International, DOI.10.1080/10106049.2015.1076062
20. Bastiaanssen WGM, Ahmad MD, and Chemin Y, 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. Water Resource Research. 38(12): 1-9.
21. Bastiaanssen, WGM, Menenti M, Feddes RA and Holtslag AAM, 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. J. Hydrol., 212-213, 198-212.
22. Bastiaanssen, WGM, Noordman EJM, Pelgrum H, Davids G, Thoreson BP, and Allen RG, 2005. "SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field condition". J. Irrig. Drain. Eng., 131(1):85-93.

23. George P, Prasanna HG, Prasad PVV, Terry AH, Scott AS, Christopher MUN, 2013. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08, *Advances in Water Resources*. Volume 59, page 157-168.
24. Mokhtari MH, 2005. *Agricultural Drought Impact Assessment Using Remote Sensing: A Case study Borkhar district –Iran*. M.sc Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands
25. Rawat K, Bala SA, Singh SK, and Pal RK, 2017. Quantification of Wheat Crop Evapotranspiration and Mapping: A Case Study from Bhiwani District of Haryana, India. *Agricultural Water Management* 187: 200–209.

Evaluation of Remote Sensing Technology in Estimation of Evapotranspiration of Alfalfa Using Evapotranspiration Data Estimated by Lysimeter in Alborz and Chaharmahal and Bakhtiari Provinces

H. Jafari¹ and A. Morshedi

Assistant Prof., Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization, Karaj, Iran.
jafari52_h@yahoo.com

Assistant Prof., Agricultural and Natural Resources Research Center, Chahar Mahal and Bakhtiari Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization, Shahrekord, Iran.

alimorshedi2000@gmail.com

Received: October 2021 and Accepted: August 2022

Abstract

Estimation of crop water requirement and evapotranspiration by lysimeter is costly and time-consuming and could not be applied to larger field scale. Remote sensing technology can overcome this limitation. The goal of this research was to estimate alfalfa actual evapotranspiration using satellite imagery and compare it with the in-situ measurement by lysimeter. The study was carried out from 2017 to 2020 in the agricultural lands of Alborz and Charmahal and Bakhtiari provinces employing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) method. Lysimeter has been implemented under standard conditions. The cold pixels of each satellite image were extracted to estimate net alfalfa crop water requirement. In-situ net crop water requirement for Alborz and Charmahal and Bakhtiari provinces were obtained as 1383 and 1087 mm, respectively. The coefficients of determination (R^2) were 73% and 76%, respectively, for the two studied provinces. The statistical analysis showed that there were small deviations from the mean values. The standard evapotranspiration measurements using lysimeter were higher than the satellite estimations. This technique can be useful for the estimation of crop water consumption since it is simple, cheap, fast, and can be used for large areas.

Keywords: SEBAL algorithm, Drainage type lysimeter, Alfalfa water requirement

¹ - Corresponding author: Soil and Water Research Institute, Irrigation and Soil Physics Department.