

ارزیابی تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبال (مطالعه موردی: شرق استان آذربایجان شرقی)

مهدی اسدی^۱، مختار کرمی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته دکتری آب‌وهواشناسی کشاورزی، دانشگاه حکیم سبزواری

۲. استادیار هیدرواقلیم، دانشگاه حکیم سبزواری

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۵/۲۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۹/۳۰)

چکیده

ارزیابی میزان تبخیر و تعرق یکی از راه‌های جلوگیری از هدررفت آب و مدیریت منابع آب است. بنابراین، در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از الگوریتم سبال، میزان تبخیر و تعرق واقعی در شرق استان آذربایجان شرقی محاسبه شود. برای این منظور، ابتدا بر اساس دو تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ به تاریخ‌های ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ و ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ مقادیر شار تابش، شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس برآورد شد. سپس، بر اساس تفاضل به‌دست‌آمده، مقادیر شار گرمای لحظه‌ای محاسبه شد و تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته برای هر تصویر به دست آمد. در نهایت، میزان به‌دست‌آمده با مقادیر به‌دست‌آمده از روش پنمن - مانتیث مقایسه شد. همچنین، برای پردازش و تجزیه و تحلیل تصاویر از نرم‌افزار ENVI4.8 استفاده شد. نتایج بیانگر آن بود که میزان تبخیر و تعرق در روش پنمن-مانتیث و سبال در تاریخ ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ به ترتیب حدود ۶/۳۵ و ۷ میلی‌متر در روز و در تاریخ ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ به ترتیب حدود ۷/۲۵ برای پنمن-مانتیث و ۷/۹۴ میلی‌متر در روز برای سبال بوده است. در مجموع، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی سبال و تبخیر و تعرق پتانسیل پنمن-مانتیث دارای میانگین تفاضل مطلق (MAD) ۰/۶۷ میلی‌متر در روز است که بیان می‌کند بین مقادیر تخمین‌زده‌شده به‌وسیله الگوریتم سبال و روش پنمن-مانتیث تطابق خوبی وجود دارد.

کلیدواژگان: تبخیر و تعرق، سبال، پنمن-مانتیث، سنجش‌ازدور، آذربایجان شرقی.

مقدمه

در بسیاری از مناطق جهان تبخیر و تعرق بعد از بارش، دومین عامل مهم در چرخه هیدرولوژی و از عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب است و در زمینه های مختلف علوم، مانند هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل و مرتع، و مدیریت منابع آب مورد نیاز است [۱ و ۲]. همچنین، آب مهم ترین عامل محدود کننده کشاورزی در ایران است، از این رو باید به افزایش کارایی مصرف آن در تولید محصولات کشاورزی توجه ویژه ای شود [۳]. روش های مرسوم اندازه گیری تبخیر و تعرق از سطح زمین (نسبت باون، همبستگی ادی و لایسیمتر) برای کاربرد پیوسته در فاصله های مناسب در منطقه، بسیار پرهزینه و وقت گیر است. همچنین، این اندازه گیری ها نقطه ای هستند و به دلیل شرایط متغیر آب و هوایی و طبیعت پویای فرایند انتقال آب - گرما، قابل تعمیم به حوضه های بزرگ نیستند. در حال حاضر، روش های سنجش از دوری سبال [۴]، متریک [۵] و غیره راه حل مناسبی برای به دست آوردن متغیرهای مختلف در مقیاس های زمانی و مکانی مورد نیاز به منظور برآورد تبخیر و تعرق هستند [۶]. در این بین، سبال یکی از الگوریتم های پر کاربرد سنجش از دور است که تبخیر و تعرق گیاه را بر اساس تعادل لحظه ای انرژی در سطح هر پیکسل از یک تصویر ماهواره ای محاسبه می کند. تا کنون مطالعات متعددی برای بررسی کارایی روش سبال در تبخیر و تعرق واقعی در مناطق وسیع در دنیا و ایران انجام شده است که عبارت اند از: چانگ و همکاران (۲۰۱۷) به برآورد سنجش از دوری تبخیر از سطح زمین با استفاده از تصاویر لندست ۵ و مدل سبال در مناطق مرتفع و سرد در بالادست حوضه رودخانه Shule در کشور چین پرداختند. نتایج تحقیق یاد شده بیانگر آن بود که میانگین خطای برآورد شده از تبخیر و تعرق حاصل از اندازه گیری مدل سبال و دستگاه ادی کوواریانس حدود ۶/۴ درصد با میانگین مربعات خطای ۰/۵۲ میلی متر در روز است [۷]. گرسو و همکاران (۲۰۱۸) به تعیین میزان تبخیر و تعرق محصول ذرت در مزرعه، با استفاده از روش سبال پرداختند و نتایج کار خود را با روش پنمن-مانتیت فائو و مدل شبیه ساز خاک - گیاه مقایسه کردند. در پژوهش یاد شده که از تصاویر لندست ۷ استفاده شد، نتایج بیانگر

آن بود که بین الگوریتم سبال و مدل شبیه ساز خاک - گیاه همبستگی زیادی در سال های ۲۰۱۱ (۰/۷۰۴۷) و ۲۰۱۲ (۰/۶۶۸۹) برقرار است [۸]. النمر و همکاران (۲۰۱۹) به تهیه نقشه تبخیر و تعرق روزانه و فصلی دلتای نیل با استفاده از تکنیک های سنجش از دور پرداختند. آنها بر اساس الگوریتم سبال و با استفاده از ۲۴ تصویر ماهواره لندست ۸، میزان تبخیر و تعرق را در دلتای نیل برآورد کرده و نتایج کار خود را با استفاده از روش پنمن-مانتیت فائو مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها بیانگر آن بود که روش سبال تخمین خوبی از میزان تبخیر و تعرق دلتای نیل با توزیع زمانی مکانی تبخیر و تعرق در آن حوضه دارد و میزان همبستگی آن بیش از ۰/۹۷ است [۹]. قادری و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و روش سبال در دشت عین خوش ایران، میزان تبخیر و تعرق واقعی را بررسی کرده و نتایج به دست آمده را با روش پنمن-مانتیت مقایسه کردند. بر این اساس، بیشترین میزان تبخیر و تعرق در ماه مارس اتفاق افتاده که مقدار RMSE آن با روش پنمن-مانتیت ۰/۲۲۲ میلی متر در روز است [۱۰]. در داخل کشور ایران نیز مطالعاتی با استفاده از الگوریتم سبال صورت گرفته که به شرح زیر است: زمان ثانی و همکاران (۱۳۹۶) در شهرستان حاجی آباد با استفاده از الگوریتم سبال به ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی گندم پرداختند. با مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم سبال با داده های لایسیمتر، مشخص شد که میانگین تفاضل مطلق ۰/۷ میلی متر در روز و ضریب همبستگی برابر ۰/۸۳ است. همچنین، نتایج نشان می دهد الگوریتم سبال کارایی مناسبی برای برآورد تبخیر-تعرق در منطقه مطالعه شده دارد [۱۵]. بادیه نشین و همکاران (۱۳۹۸) در دشت سیرجان به بررسی میزان تبخیر و تعرق واقعی پسته با استفاده از الگوریتم سبال پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد درخت پسته در سطوح کم شوری آب، به کم آبیاری (تا ۲۶ درصد) مقاوم است. در شوری آب بیش از ۴ هزار ($\mu \text{ mho/cm}$) تأثیر هم زمان کم آبیاری و شوری تشدید می شود و عملکرد محصول بر اثر کم آبیاری با شدت بیشتری کاهش پیدا می کند [۱۶]. اسدی و همکاران (۱۳۹۹) در نیمه شمالی استان اردبیل، میزان تبخیر و تعرق واقعی را با استفاده از الگوریتم سبال کوهستانی بر پایه گیاه نخود برآورد کرده و نتایج را با روش سبال

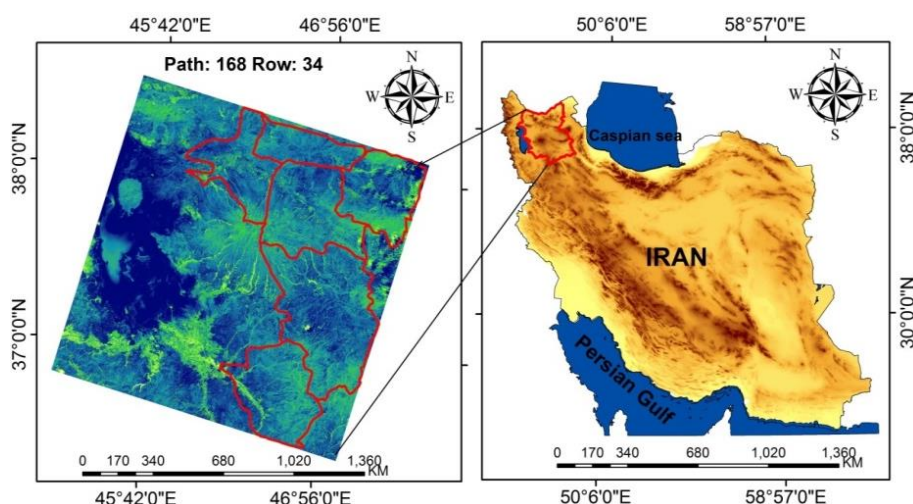
شود. در این بررسی به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و کوچک بودن مزارع در ایران، از سنجنده لندست استفاده شده است. اما رایگان بودن تصاویر سنجنده یادشده و البته، دوره تکرار روزانه آن سبب شده استفاده از تصاویر آن در مقیاس منطقه‌ای مفید و به‌صرفه باشد. بنابراین، بررسی کارایی سنجنده لندست در برآورد تبخیر و تعرق منطقه‌ای نیز طی تحقیق یادشده بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده، با مساحتی حدود ۱۵۴۸۳/۹۹۲ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی، بین مدارهای ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه عرض شمالی و ۳۸ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۲ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است (شکل ۱).

مقایسه کردند. بر این اساس، میزان نیاز آبی محصول نخود نیز به ترتیب ۷/۱۴ و ۶/۷۰ میلی‌متر در روز برای روش‌های سبال و سبال کوهستانی برآورد شد [۱۷]. اسدی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از روش سبال و متریک به مقایسه و تخمین میزان سپیدایی سطوح مختلف کاربری اراضی پرداختند. در این بررسی میزان سپیدایی مراتع بین ۰/۱۸۳ تا ۰/۲۶۶ در روش سبال و بین ۰/۲۳۷ تا ۰/۲۶۵ در روش متریک تعیین شد. در ادامه، میزان سپیدایی اراضی کشاورزی (۰/۲۴۰ بر اساس روش سبال و ۰/۲۴۷ بر اساس روش متریک) و جنگل (۰/۱۴۱ بر اساس روش سبال و ۰/۲۲۵ بر اساس روش متریک) نیز بررسی شد [۱۸]. هدف از پژوهش حاضر، برآورد تبخیر و تعرق در استان آذربایجان شرقی است. همچنین، سعی بر این است تا به منظور برآورد دقیق‌تر شارهای گرمایی سطح، شرایط توپوگرافی منطقه نیز در برآورد تبخیر و تعرق واقعی لحاظ



شکل ۱. محدوده مطالعه شده

الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین (سبال)
سنجش‌ازدور، مدت زمان زیادی است که امکان برآورد توزیع فضایی تبخیر و تعرق بر اساس داده‌های سطح زمین فراهم کرده است [۱۹-۲۱]. امروزه سنجش دور از دو رویکرد مستقیم و غیرمستقیم یا محاسباتی برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده می‌کند. در روش مستقیم از روش توازن انرژی سطح زمین [۲۲-۲۸] و در روش غیرمستقیم از ضریب گیاهی استفاده می‌شود. مبانی و اساس روش و چگونگی محاسبات آن به‌طور مفصل در منابع مختلف آمده

داده‌های بررسی شده

در پژوهش حاضر از تصاویر سنجنده لندست مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ و ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ استفاده شده که از سایت اکسپلورر^۱ دریافت شده است. داده‌های زمینی (داده‌های ساعتی دمای حداقل و حداکثر، داده‌های ساعتی سرعت باد، دمای نقطه شبنم و تابش خورشید) استفاده شده در الگوریتم سبال نیز از سازمان هواشناسی کشور دریافت شده است.

1. Earthexplorer.usgs.gov

که در آن، $R_{s\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی (W/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی (W/m^2)، α آلبیدوی سطحی و ε_a توان تشعشعی سطحی باند پهن است.

برای برآورد آلبیدوی سطحی از تصاویر ماهواره‌ای ابتدا باید رادیانس طیفی و بازتابندگی هر تصویر به‌طور جداگانه محاسبه شود (روابط ۳ و ۴).

$$L_\lambda = M_l \times Q_{cal} + A_l \quad (3)$$

که در آن: L_λ : رادیانس طیفی برای هر باند برحسب $(W/m^2 / sr / \mu m)$ ، M_l و A_l : ضرایب رادیانس برای هر باند (مستخرج از هدر فایل) و Q_{cal} : ارزش عددی باندها یا همان DN است [۳۱].

$$P\lambda = \frac{\pi * L\lambda}{ESUN \lambda * \cos \theta * dr} \quad (4)$$

که در آن: $P\lambda$ و بازتابندگی بالای اتمسفر، $ESUN\lambda$: میانگین تابش فرودی خورشید در بالای اتمسفر (مقادیر مستخرج برای تصویر لندست ۸ در جدول ۱ آمده است)، $\cos\theta$: زاویه ارتفاع خورشیدی، dr : معکوس مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید است که برای محاسبه آن از رابطه ۵ استفاده می‌شود [۳۲].

$$dr = 1 + 0.033 * \cos \left[\text{doy} \frac{2\pi}{365} \right] \quad (5)$$

که در آن: doy : روز ژولینی تصویر است.

جدول ۱. مقادیر محاسبه شده $ESUN_\lambda$ و ω_λ برای لندست ۸

مقادیر	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷
$ESUN_\lambda$	۲۰۱۹/۷	۱۸۶۱	۱۵۶۹/۳	۹۶۰/۴	۲۳۸/۸	۸۰/۵
ω_λ	۰/۳۰۳۷	۰/۲۷۹۸	۰/۲۳۶۰	۰/۱۴۴۴	۰/۰۳۵۹	۰/۰۱۲۱

آلبیدوی سطحی

بخشی از انرژی ورودی به سطح زمین به‌عنوان بازتاب سیاره‌ای یا آلبیدو نامیده می‌شود که میزان آلبیدو بر اساس روش سبال از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path-radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (6)$$

که در آن: α_{toa} : آلبیدوی بالای اتمسفر، $\alpha_{path-radiance}$: آلبیدوی معادل تابش مسیر که مقدار

است. مدل سبال، مقدار تبخیر و تعرق واقعی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمینی مورد نیاز و بر اساس رابطه توازن انرژی محاسبه می‌کند. از آنجا که تصاویر ماهواره‌ای فقط می‌توانند اطلاعاتی در زمان گذر ماهواره ارائه دهند، بنابراین مدل سبال می‌تواند مقدار شار تبخیر و تعرق لحظه‌ای را در زمان تصویربرداری برآورد کند. شار تبخیر و تعرق برای هر پیکسل تصویر، به‌صورت باقی‌مانده رابطه توازن انرژی سطح محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

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

در رابطه یادشده، λE : شار گرمای نهان (W/m^2)؛ R_n : شار تابش خالص در سطح زمین (W/m^2)؛ G : شار گرمای خاک (W/m^2) و H : شار گرمای محسوس (W/m^2) است.

مقدار R_n که شار تابش خالص در سطح زمین است، از توازن چهار شار تابشی که عبارت‌اند از: تابش طول‌موج کوتاه ورودی ($R_{s\downarrow}$) (بخشی از این انرژی تابشی توسط سطوح مختلف منعکس می‌شود) ($R_{s\uparrow}$)، تابش طول‌موج بلند ورودی از اتمسفر ($R_{L\downarrow}$) و تابش طول‌موج بلند گسیل‌شده از سطح ($R_{L\uparrow}$)، به‌صورت رابطه ۲ به دست می‌آید [۲۹ و ۳۰].

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

آن را به‌طور متوسط باستانسن [۳۳] حدود ۰/۰۳ در نظر گرفته است و τ_{sw} : ضریب شفافیت اتمسفری است که از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 * 10^{-5} * Z \quad (7)$$

که Z : ارتفاع ایستگاه مورد نظر برحسب متر است، ولی در این پژوهش به دلیل مساحت زیاد منطقه از مدل رقومی ارتفاع مربوط به ماهواره استر استفاده شد. همچنین، مقدار آلبیدوی بالای اتمسفر از رابطه ۸ محاسبه شد:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{a} (0.0038a + 0.0074 a^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (13)$$

در رابطه یادشده، T_s دمای سطحی ($^{\circ}C$)، a آلبیدوی سطحی و $NDVI$ شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی است. مقدار G با ضرب کردن نسبت یادشده در R_n به دست می‌آید. مقادیر $NDVI$ با استفاده از رابطه ۱۴ قابل استخراج است.

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (14)$$

که در آن، ρ_1 انعکاس طیفی باند ۵ لندست (باند مادون قرمز نزدیک) و ρ_2 انعکاس طیفی باند ۴ لندست (باند قرمز) است. $NDVI$ شاخصی است که مقدار و شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر آن بین -۱ و +۱ تغییر می‌کند، به طوری که مقدار آن برای سطح خاک عریان صفر، برای سطوح کاملاً پوشیده از گیاه ۱ است و برای سطوح آبی و ابرها مقدار آن معمولاً کمتر از صفر است.

چنانچه مقدار $NDVI$ کمتر از صفر باشد، سطح یادشده آب تلقی شده و نسبت G/R_n برای آن برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. اگر مناطق دارای مقدار T_s کمتر از $4^{\circ}C$ و a بیشتر از ۰/۴۵ باشد، مناطق پوشیده از برف فرض می‌شوند و نسبت G/R_n برای این مناطق نیز ۰/۵ لحاظ می‌شود.

شار گرمای محسوس (H)

در روش سبال برآورد شار گرمای محسوس، ابتدا دو پیکسل آستانه انتخاب می‌شوند. یکی از این پیکسل‌ها که پیکسل سرد نامیده می‌شود، مربوط به منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه و آبیاری شده است. دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هواست و تبخیر و تعرقی معادل تبخیر و تعرق مرجع دارد. پیکسل دوم که پیکسل گرم نام دارد، زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک است. بنابراین، مقدار شار گرمای نهان تبخیر در این پیکسل صفر فرض می‌شود. در روش سبال طبق رابطه ۱ و بر اساس مقادیر تبخیر و تعرق دو پیکسل یادشده، شار گرمای محسوس در این دو پیکسل محاسبه شده و سپس، مقدار شار گرمای محسوس سایر پیکسل‌ها تخمین زده می‌شود. مقدار شار گرمای محسوس به صورت رابطه ۱۵ برآورد می‌شود.

$$\alpha_{toa} = \sum (\omega_\lambda * \rho_\lambda) \quad (8)$$

که در آن: ω_λ ضریب وزنی باندهای غیرحرارتی است و از طریق فرمول ۹ محاسبه می‌شود:

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad (9)$$

ضرایب محاسبه شده مربوط به تابش فرودی خورشید در بالای اتمسفر $ESUN_\lambda$ و ω_λ برای تصویر لندست ۸ در جدول ۲ آورده شده است.

تابش موج کوتاه ورودی ($R_{s\downarrow}$) در واقع، شار تابش خورشیدی است که به صورت تابش مستقیم و پراکنده به سطح زمین می‌رسد و مقدار آن برای زمان تصویر و شرایط آسمان صاف و بدون ابر، به صورت رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$R_{s\downarrow} = G_{SC} \times \cos\theta \times d_r \times \tau_{SW} \quad (10)$$

که در آن، G_{SC} ثابت خورشیدی ($1367W/m^2$)، $\cos\theta$ کسینوس زاویه ورودی خورشید، d_r معکوس مربع فاصله زمین تا خورشید و τ_{SW} ضریب شفافیت اتمسفر است. تابش موج بلند خروجی، شار تابش حرارتی گسیل شده از سطح زمین به اتمسفر است که فرمول آن به صورت رابطه ۱۱ است.

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_s^4 \quad (11)$$

در رابطه یادشده، ε_0 توان تشعشعی سطحی باند پهن، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$) و T_s دمای سطح زمین است.

تابش طول موج بلند ورودی، شار تابش حرارتی از اتمسفر به زمین است که با استفاده از رابطه استفان بولتزمن قابل محاسبه است (رابطه ۱۲).

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (12)$$

در رابطه یادشده ε_a توان تشعشعی اتمسفر، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$) و T_a دمای هوای نزدیک سطح (k) است.

شار گرمای خاک (G)

در روش سبال ابتدا نسبت G/R_n در نیمه روز، با استفاده از رابطه تجربی ارائه شده توسط باستیانسن به صورت رابطه ۱۳ محاسبه شد.

متخصصان قرار گرفته است [۳۵]. فرم کلی رابطه ترکیبی پنمن-مانتیت به صورت رابطه ۱۸ است:

$$ET_0 = \left[\frac{\Delta(R_n - G) + K_{time} \rho_a C_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right] / \lambda \quad (18)$$

که در آن: ET_0 : تبخیر و تعرق مرجع برحسب mmd^{-1} یا mmh^{-1} ، $(es - ea)$: تفاوت فشار بخار آب هوا با حالت اشباع (کمبود فشار بخار هوا) برحسب kpa ، es : فشار بخار آب واقعی هوا برحسب kpa ، ρ_a : چگالی میانگین هوا در فشار ثابت برحسب kgm^{-3} ، C_p : گرمای ویژه هوا برحسب $Mjkg^{-1}c^{-1}$ ، شیب رابطه دمایی فشار بخار آب اشباع برحسب $KPa^{\circ}c^{-1}$ ، γ : ثابت سایکرومتری برحسب $KPa^{\circ}c^{-1}$ ، r_s : مقاومت سطحی (حجمی) برحسب sm^{-1} ، r_a : مقاومت آئروودینامیکی برحسب sm^{-1} ، گرمای نهان بخار آب برحسب mmd^{-1} معادل $86400sd^{-1}$ و برای ET برحسب mmh^{-1} معادل $3600sh^{-1}$ است.

یافته‌ها

همان‌گونه که اشاره شد، الگوریتم سبال از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است و طی این فرایند، پارامترهایی مانند شاخص NDVI، آلبیدوی سطحی و دمای سطحی با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای محاسبه می‌شوند (شکل ۲).

قبل از بررسی نتایج تبخیر و تعرق، ابتدا صحت این پارامترها بررسی می‌شود. سپس، به بررسی نتایج تبخیر و تعرق به دست آمده به وسیله الگوریتم سبال پرداخته می‌شود. در مطالعه حاضر، شاخص NDVI برای تصاویر بررسی شده محاسبه شد که آمار مربوط به آن در سطح منطقه مطالعه شده در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقدار میانگین NDVI در تاریخ ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ برابر با ۰/۱۴۴ است که نسبت به تاریخ ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ مقدار بیشتری دارد و دلیل آن، وجود هم‌زمان محصولات پاییزه و بهاره و مراتع است. در مقابل، در تاریخ ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ به دلیل شروع برداشت محصولات پاییزه و از بین رفتن نسبی مراتع، میزان میانگین شاخص NDVI کاهش یافته و به مقدار ۰/۱۲۴ رسیده است.

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad (15)$$

که در آن، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($J/kg/K$)، dT اختلاف دمای هوای نزدیک سطح (K) و r_{ah} مقاومت آئروودینامیک برای انتقال گرماست (s/m).

پس از آنکه مقدار شار گرمای محسوس بر اساس شرایط جوی تصحیح شد، مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان تبخیر مطابق با فرمول ۱ برای هر پیکسل محاسبه می‌شود و سپس، با استفاده از رابطه ۱۶ مقدار لحظه‌ای تبخیر و تعرق واقعی (ET_{inst}) برآورد می‌شود:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (16)$$

λ در رابطه یاد شده گرمای نهان تبخیر (J/kg) است. همچنین، برای برآورد مقدار تبخیر و تعرق روزانه از رابطه ۱۷ استفاده می‌شود [۳۴]:

$$ET_{daily} = \frac{86400 \Lambda (R_{n24} - G_{24})}{\lambda} \quad (17)$$

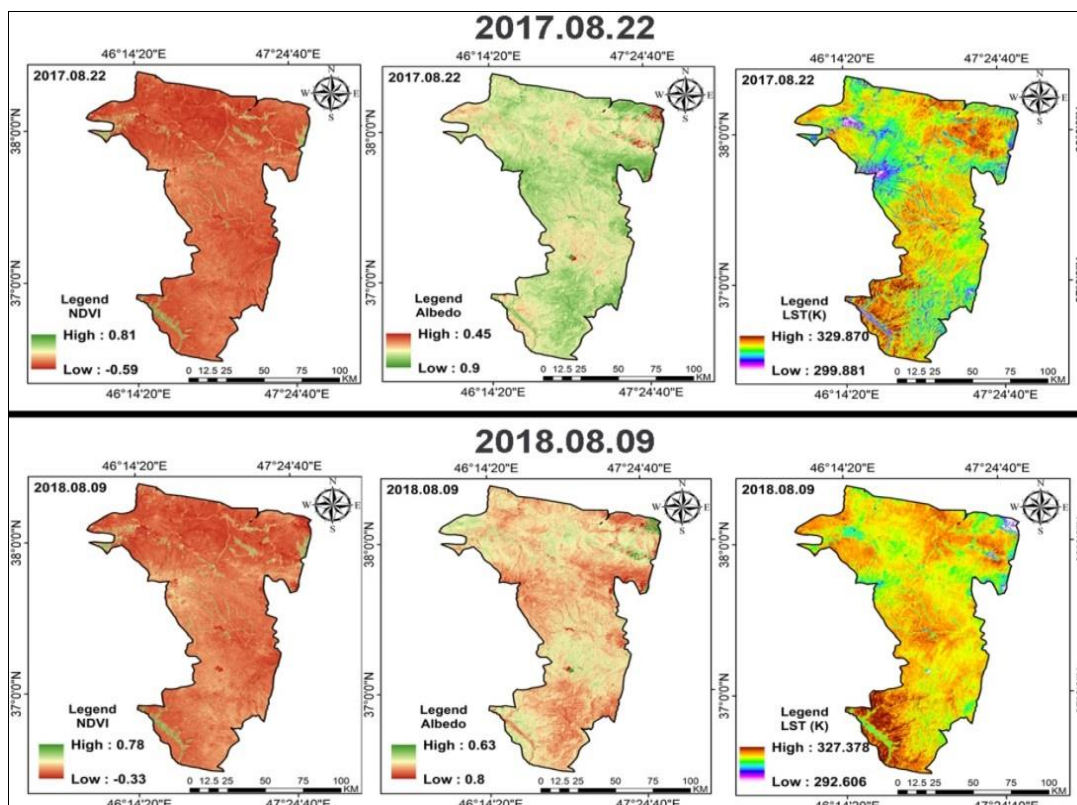
که در آن، R_{n24} تابش خالص روزانه (W/m^2)، G_{24} شار گرمای روزانه خاک (W/m^2)، و λ گرمای نهان تبخیر (J/kg) است.

تبخیر و تعرق گیاه مرجع

تبخیر و تعرق از سطح وسیعی از چمنزار کوتاه‌شده و یا یونجه‌ای که خوب آبیاری شده و کاملاً سطح زمین را پوشانده است، به عنوان تبخیر و تعرق مرجع تعریف می‌شود. در رابطه پنمن-مانتیت فائو، گیاه مرجع، چمنزار با شرایط خاص (آلبیدوی ۰/۲۳، ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و مقاومت سطحی ۰/۷۰ s/m) تعریف می‌شود. همچنین، گیاه یونجه با خصوصیات هم‌چون ارتفاع بیشتر از ۰/۳ متر و سایه‌اندازی کامل نیز گیاه مرجع نامیده می‌شود. برای محاسبه ET_0 روابط متعددی ارائه شده که از میان آنها رابطه پنمن-مانتیت توسط فائو برای بیشتر کشورهای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک از جمله ایران پیشنهاد شده است. روش پنمن-مانتیت دارای نسخه‌های متعددی است که از بین آنها روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان یکی از روش‌های معتبر برای تخمین ET_0 مورد استفاده

سطحی برای تصاویر بررسی شده در محدوده مطالعه شده است. همان‌گونه که در جدول ۴ نیز پیداست، بیشترین و کمترین میزان میانگین دمای سطح زمین با مقادیر ۳۱۸/۱۴۰ و ۳۱۴/۹۲۴ درجهٔ کلون به ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ و ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ است که روند آن با هوای منطقه مطابقت کامل دارد. همچنین، دلیل زیاد بودن میانگین دما را می‌توان به پراکندگی پوشش گیاهی، عدم تقارن سطوح کاربری اراضی، وجود شهرها و روستاها و در نهایت، زیاد بودن دمای ماه آگوست در سطح منطقه نسبت داد.

جدول ۳ نشان‌دهندهٔ مقادیر به دست آمده آلبیدوی سطحی در محدوده مطالعه شده است. مقادیر حداقل و حداکثر به ترتیب مربوط به خاک لخت و کوه‌ها در منطقه است که در هر دو تاریخ مورد بررسی قابل مشاهده است. میانگین آلبیدو در تصاویر مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ و ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ به ترتیب در محدوده ۰/۳۳۷ تا ۰/۳۰۳ است که در دامنهٔ قابل قبول برای مزارع کشاورزی و مراتع قرار دارد [۳۶]. همچنین، جدول ۴ نشان‌دهندهٔ مقادیر مستخرج دمای



شکل ۲. نقشهٔ پراکنش پارامترهای NDVI، آلبیدو و دمای سطحی در سال‌های بررسی شده

جدول ۲. مقادیر NDVI در محدوده مطالعه شده

تاریخ	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
۲۰۱۷/۰۸/۲۲	-۰/۵۹	۰/۸۱	۰/۱۲۴	۰/۱۰۸
۲۰۱۸/۰۸/۰۹	-۰/۳۳	۰/۷۸	۰/۱۴۴	۰/۱۱۴

جدول ۳. مقادیر آلبیدو در محدوده مطالعه شده

تاریخ	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
۲۰۱۷/۰۸/۲۲	۰/۰۹	۰/۴۵	۰/۲۳۷	۰/۰۵۱
۲۰۱۸/۰۸/۰۹	۰/۰۸	۰/۶۳	۰/۳۰۳	۰/۰۵۶

جدول ۴. مقادیر دمای سطح زمین (کلوین) در محدوده مطالعه شده

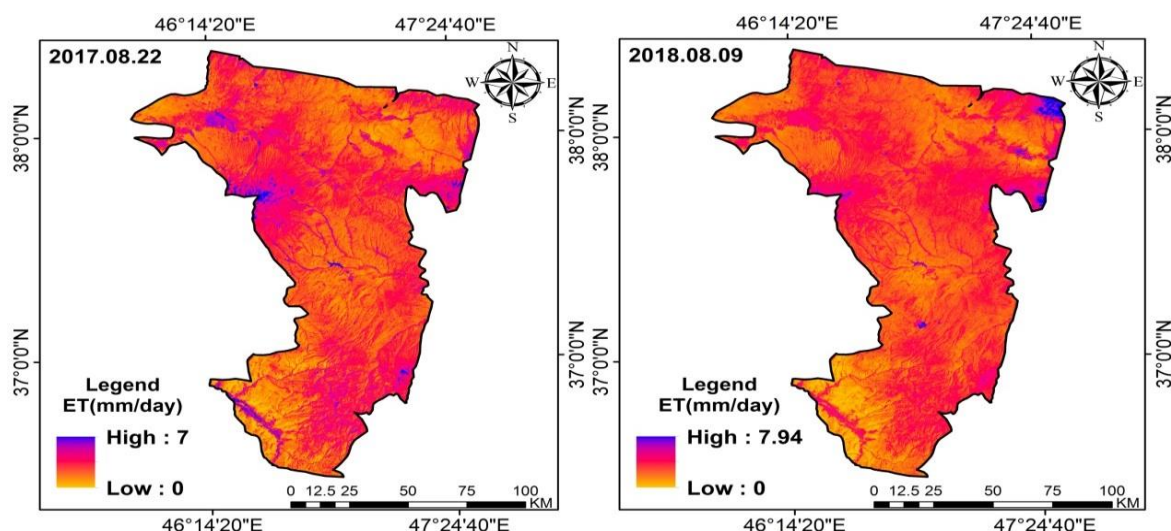
تاریخ	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
۲۰۱۷/۰۸/۲۲	۲۹۹/۸۸۱	۳۲۹/۸۷۰	۳۱۸/۱۴۰	۳/۸۲۸
۲۰۱۸/۰۸/۰۹	۲۹۲/۶۰۶	۳۲۷/۳۷۸	۳۱۴/۹۲۴	۳/۷۶۸

آن سبب افزایش میزان تبخیر و تعرق حقیقی در سطح منطقه و اختلاف بیشتر با تبخیر و تعرق پتانسیل شده است. در مجموع، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی سبال و تبخیر و تعرق پتانسیل پنمن - مانیتث دارای میانگین تفاضل مطلق (MAD) $0/67$ میلی‌متر در روز است که بیان می‌کند بین مقادیر تخمین‌زده شده به وسیله الگوریتم سبال و روش پنمن - مانیتث تطابق خوبی وجود دارد (جدول ۵). نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج کارهای راموس و همکاران [۳۷] و کیتالا و همکاران [۳۸] همخوانی دارد. در نهایت، شکل ۳ نشان دهنده پراکنش تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته در سطح منطقه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مناطق دارای پوشش گیاهی، تبخیر و تعرق بیشتری نسبت به زمین‌های بایر و شهر و روستاها اتفاق می‌افتد.

بعد از اطمینان نسبی از روند نتایج به دست آمده از پارامترهای مؤثر بر میزان تبخیر و تعرق، نتایج به دست آمده برای تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سبال، با مقادیر به دست آمده از فرمول پنمن - مانیتث مقایسه شد. دلیل این مقایسه این بود که با توجه به اینکه در سطح منطقه وسیله اندازه‌گیری تبخیر و تعرق وجود نداشت، در این مطالعه برای ارزیابی مدل سبال در سطح منطقه، نتایج این مدل (حداکثر مقدار تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال) با مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه محاسبه شده با فرمول پنمن - مانیتث مقایسه شد. نتایج بیانگر این است که بیشترین تفاوت بین این مقادیر مربوط به روز ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ با $10/24$ درصد است که دلیل آن را می‌توان به بیشتر بودن تراکم پوشش گیاهی در این روز نسبت به روز دیگر دانست و در نتیجه

جدول ۵. مقادیر تبخیر و تعرق به دست آمده در منطقه مطالعه شده بر اساس روش‌های سبال و پنمن

تاریخ تصویر	پنمن (mm.day-1)	سبال (mm.day-1)	تفاضل مطلق (mm.day-1)	تفاضل نسبی (%)	میانگین تفاضل مطلق (mm.day-1)
۲۰۱۷/۰۸/۲۲	۶/۳۵	۷	۰/۶۵	۱۰/۲۴	۰/۶۷
۲۰۱۸/۰۸/۰۹	۷/۲۵	۷/۹۴	۰/۶۹	۹/۵۲	



شکل ۳. تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته در محدوده مطالعه شده در سال‌های بررسی شده

نتیجه‌گیری

الگوریتم سبال رابطه کامل بیلان انرژی را به‌منظور محاسبه تبخیر و تعرق واقعی گیاه، حل می‌کند و پارامترهای محاسبه‌شده در آن مانند دمای سطحی، NDVI در محدوده خاصی تعریف شده‌اند و قابل قبول هستند. محاسبات نشان داد نتایج حاصل با محدوده‌های قابل قبولی که در منابع و آمارهای موجود اعلام شده، مطابقت داشته است و این الگوریتم را مورد تأیید قرار می‌دهد.

نتایج بیانگر آن بود که مقدار میانگین NDVI در تاریخ ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ برابر با ۰/۱۴۴ است که نسبت به تاریخ ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ مقدار بیشتری دارد و دلیل آن وجود هم‌زمان محصولات پاییزه و بهاره و مراتع است. همچنین، مقادیر حداقل و حداکثر آلبیدو به ترتیب مربوط به خاک لخت و کوه‌ها در منطقه است که در هر دو تاریخ بررسی شده قابل مشاهده است. میانگین آلبیدو در تصاویر مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ و ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ به ترتیب در محدوده ۰/۲۳۷ تا ۰/۳۰۳ است که در دامنه قابل قبول برای مزارع کشاورزی و مراتع قرار دارد و با نتایج پژوهش دیسنی و همکاران که به بررسی آلبیدو در بالای مکان کشاورزی پرداخته بودند، همخوانی دارد. با بررسی دمای سطح زمین، مشخص شد که بیشترین کمترین میزان میانگین دمای سطح زمین با مقادیر ۳۱۸/۱۴۰ و ۳۱۴/۹۲۴ درجه کلوین به ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ و ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ است که روند آن با هوای منطقه مطابقت کامل دارد. همچنین، دلیل زیاد بودن میانگین دما را می‌توان به پراکندگی پوشش گیاهی، عدم تقارن سطوح کاربری اراضی، وجود شهرها و روستاها و در نهایت زیاد بودن دمای ماه آگوست در سطح منطقه نسبت داد. در مجموع، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی سبال و تبخیر و تعرق پتانسیل پنمن - مانتیت در تاریخ ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ به ترتیب حدود ۶/۳۵ و ۷ میلی‌متر در روز و در تاریخ ۲۰۱۸/۰۸/۰۹ به ترتیب حدود ۷/۲۵ برای پنمن - مانتیت و ۷/۹۴ میلی‌متر در روز برای سبال بوده است. همچنین، مقدار میانگین تفاضل مطلق (MAD) ۰/۶۷ میلی‌متر در روز است که بیان می‌کند مقادیر تخمین‌زده‌شده به وسیله الگوریتم سبال و روش پنمن - مانتیت تطابق خوبی وجود دارد.

منابع

- [1]. Gao Y, Long D, Li Z. Estimation of daily evapotranspiration from remotely sensed data under complex terrain over the upper Chao river basin in north China. *International Journal of Remote Sensing*. 2008; 29(11): 3295-3315.
- [2]. Omidvar J, Noori S, Davar K, Sanaei-Nejad H, Farid hosseini A. Estimation of actual evapotranspiration based on satellite images using two algorithms SEBAL and Metric, *Journal irrigation engineering and water*. 2013; 3(12): 11-22 [Persian].
- [3]. Hejazizadeh Z, bazmi N, Rahimi A, Toulabi Nejad M, Bosak A. Modeling of spatio-temporal of albedo over Iran. *Researches in Geographical Sciences*. 2017; 17 (47): 1-17.
- [4]. Bastiaanssen WGM, Menenti M, Feddes RA, Holtslag AAM. Remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1 Formulation. *Journal of hydrology*. 1998; 212: 198-212.
- [5]. Allen RG, Tasumi M, Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) model. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 2007; 133(4): 380-394.
- [6]. Disney M, Lewis P, Thackrah G, Quaife T, Barnsley M. Comparison of MODIS broadband albedo over an agricultural site with ground measurements and values derived from Earth observation data at a range of spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*. 2004; 25(23): 5297-5317.
- [7]. Chang Y, Ding Y, Zhao Q, Zhang S. Remote estimation of terrestrial evapotranspiration by Landsat 5 TM and the SEBAL model in cold and high-altitude regions: a case study of the upper reach of the Shule River Basin, China. *hydrological processes*. 2017; 31(3): 514-524.
- [8]. Grosso C, Manoli G, Martello M, Chemin YH, Pons DH, Teatini P, Piccoli I, Morari F. Mapping maize evapotranspiration at field scale using SEBAL: A comparison with the FAO method and soil-plant model simulations. *Remote Sensing*. 2018; 10(9): 1452.
- [9]. Elnmer A, Khadr M, Kanae S, Tawfik A. Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. *Agricultural Water Management*. 2019; 213: 682-692.
- [10]. Ghaderi A, Dasineh M, Shokri M, Abraham J. Estimation of Actual Evapotranspiration Using the Remote Sensing Method and SEBAL Algorithm: A Case Study in Ein Khosh Plain, Iran. *Hydrology*. 2020; 7(2): 36.

- [11]. Bhattarai N, Shaw SB, Quackenbush LJ, Im J, Niraula R. Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016; 49: 75-86.
- [12]. Mahmoud SH, Alazba AA. 2016. A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016; 124: 269-283.
- [13]. Singh RK, Irmak A, Irmak S, Martin DL. Application of SEBAL model for mapping evapotranspiration and estimating surface energy fluxes in south-central Nebraska. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2008; 134(3): 273-285.
- [14]. Zhang SW, Lei YP, Li HJ, Wang Z. Temporal-spatial variation in crop evapotranspiration in Hebei Plain, China. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2010; 8(2): 672-677.
- [15]. Zamansani, E., khorani, A., Sadeghi-e-lari, A., Sadidi, J. Evaluation of evapotranspiration of wheat using SEBAL algorithm (Case study: Agricultural Research Station of Haji Abad). *Physical Geography Research Quarterly*, 2017; 49(4): 667-681.
- [16]. Badiehneshin, A., Parsinejad, M., Noory, H. Evaluation of the different levels of water supply in pistachio gardens using SEBAL algorithm (The case study of Sirjan Plain). *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 2019; 9(1): 67-86.
- [17]. Asadi M, Valizadeh khamran K, Baaghdeh M, Adab H. Comparison and Estimation of Surface Albedo of Various Levels of Land use by SEBAL and METRIC Methods. *Researches in Geographical Sciences*. 2021; 20 (59): 157-171.
- [18]. Asadi, M., Valizadeh Kamran, K., Baaghdeh, M., Adab, H. Estimation of Actual Evapotranspiration by Mountain SEBAL Algorithm Based on Pea Plants (Case Study: Semi-Northern Half of Ardabil Province). 2020; 6(22): 67-85.
- [19]. Choudhury FJ, Idso SB, Reginato RJ. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1987; 39(4): 283-297.
- [20]. Jackson RD. Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. *International Society for Optics and Photonics*. 1984; 475: 81-96.
- [21]. Park AB, Colwell RN, Meyers VF. Resource survey by satellite; science fiction coming true. *Yearbook of Agriculture*; 1968.
- [22]. Brown KW, Rosenberg NJ. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agronomy Journal*. 1973; 65(3): 341-347.
- [23]. Brown KW. Calculations of evapotranspiration from crop surface temperature. In *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*. 1974; 1: 199-209.
- [24]. Heilman JL, Kanemasu ET, Rosenberg NJ, Blad BL. Thermal scanner measurements of canopy temperatures to estimate evapotranspiration. *Remote Sensing Environ*. 1976; 5: 137-145.
- [25]. Idso SB, Schmugge TJ, Jackson RD, Reginato RJ. The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of the soil water status. *Journal of Geophysical Research*. 1975; 80(21): 3044-3049.
- [26]. Jackson RD, Reginato RJ, Idso SB. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water resources research*. 1977; 13(3): 651-656.
- [27]. Kanemasu ET, Stone LR, Powers WL. Evapotranspiration model tested for soybeans and sorghum. *Agronomy Journal*. 1977; 68(4): 569-572.
- [28]. Verma SB, Rosenberg NJ, Blad BL, Baradas MW. Resistance-energy Balance Method for Predicting Evapotranspiration: Determination of Boundary Layer Resistance and Evaluation of Error Effects 1. *Agronomy Journal*. 1976; 68(5):776-82.
- [29]. Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. FAO, Rome; 1998.
- [30]. Jackson RD, Pinter PJ, Reginato RJ. Net radiation calculated from remote multispectral and ground station meteorological data. *Agricultural and forest Meteorology*. 1985; 35(1-4): 153-164.
- [31]. Bastiaanssen WGM, Pelgrum H, Wang J, Ma Y, Moreno JF, Roerink GJ, vanderwal T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. *Journal of Hydrology*. 1998; 212: 213-229.
- [32]. Duffie JA, Beckman WA, Blair N. *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons; 2020.

- [33]. Bastiaanssen WGM. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*. 2000; 229: 87-100.
- [34]. Yang Y, Shang S, Jiang L. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2012; 164:112-22.
- [35]. Karami M, Asadi M. Estimates and Zoning of reference evapotranspiration by FAO-Penman-Monteith (Case Study: North West of Iran). *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*. 2016; 2(1): 210-216.
- [36]. Horiguchi I. *Agricultural Meteorology*. Buneidou, Tokyo, Japan; 1992.
- [37]. Ramos JG, Cratchley CR, Kay JA, Casterad MA, Martinez-cob A, Dominguez, R. 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*. 2009; 96: 638-652.
- [38]. Kiptala JK, Mohamed Y, Mul ML, Zaag P. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. *Water resources research*. 2013; 49(12): 8495-8510.