

کاربرد سنجش از دوری مدل توازن انرژی سطح (سبال) در برآورد تبخیر و تعرق واقعی توت‌فرنگی در یک مقیاس مزرعه‌ای در استان کردستان

دکتر پیمان محمودی^{۱*}، هیرش سلیم پور^۲، دکتر فاطمه فیروزی^۳

۱ دانشجوی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲ دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳ پژوهشگر پسا دکترا گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

p_mahmoudi@gep.usb.ac.ir

چکیده

برآورد دقیق میزان تبخیر و تعرق واقعی برای انواع مختلف محصولات زراعی و باغی دارای اهمیت ویژه‌ای در برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی آب به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. در این پژوهش، جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی محصول توت‌فرنگی در یک مقیاس مزرعه‌ای در استان کردستان از مدل توازن انرژی سطح (سبال) مبتنی بر سنجش از دور استفاده شد. برای محاسبه این مدل، از ۷ تصویر سنجنده تصویربردار عملیاتی زمین (OLI) ماهواره لندست ۸ برای یک بازه زمانی ۷ ماهه مطابق بر فصل رشد این محصول یعنی از ماه مارس (اسفند) تا ماه سپتامبر (شهریور) برای سال ۲۰۱۹ (۱۳۹۸) استفاده شد. با توجه به فقدان ابزار و ادوات اندازه‌گیری تبخیر و تعرق زمینی، از داده‌های روزانه پنج متغیر دمای حداکثر، دمای حداقل، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی ایستگاه همدید سنندج به عنوان نزدیکترین ایستگاه هواشناسی به مزرعه مورد مطالعه نیز جهت برآورد میزان تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش تجربی پنمن-مانتیش-فائو استفاده شد. این داده‌ها برای یک بازه زمانی ۷ ماهه از ماه مارس تا ماه سپتامبر ۲۰۱۹ از اداره کل هواشناسی استان کردستان دریافت شدند. در نهایت با در اختیار داشتن مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و تبخیر و تعرق پتانسیل، نیاز آبی محصول توت‌فرنگی در یک مقیاس مزرعه‌ای برای استان کردستان برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: لندست، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، دمای سطح زمین (LST)، توت‌فرنگی، استان کردستان

مقدمه

تبخیر و تعرق یکی از عوامل مهم چرخه آب و یکی از مهمترین مؤلفه‌های تعیین کننده توازن انرژی در سطح زمین است (میر یعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۳). برآورد دقیق میزان تبخیر و تعرق واقعی برای انواع مختلف محصولات زراعی و باغی دارای اهمیت ویژه‌ای در برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی آب به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. طی سال‌های اخیر روش‌های تجربی زیادی برای برآورد تبخیر و تعرق ارائه شده‌اند که هریک تابع متغیرهای اقلیمی خاصی می‌باشند. اما یکی از روش‌های جدیدی که امروزه بسیار مورد استقبال متخصصان حوزه‌های مختلف مدیریت منابع آب قرار گرفته است استفاده از فناوری‌های سنجش از دور ماهواره‌ای در برآورد میزان تبخیر و تعرق می‌باشد. سنجش از دور این قابلیت را دارد که ضمن تخمین مقدار تبخیر و تعرق، حتی توزیع فضایی آن را نیز مورد بررسی قرار دهد، چونکه تنها فناوری است که می‌تواند پارامترهای معروفی نظیر دمای سطح زمین، ضریب آلبیدو و شاخص پوشش گیاهی را به صورت منطبق یا سازگار با محیط استخراج نماید (کاستاس و نورمن، ۱۹۹۶).

یکی از الگوریتم‌هایی که جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد توجه بسیار قرار گرفته است الگوریتم سبال می‌باشد (بهمن آبادی و همکاران، ۱۳۹۷). الگوریتم سبال روشی است که بر پایه روابط تجربی و فیزیکی، میزان تبخیر و تعرق واقعی را با حداقل داده‌های زمینی برآورد می‌کند و الگوریتم آن اولین بار توسط باستیانسن و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه و در سال ۲۰۰۲ توسط آلن و همکاران اصلاح شد. مطالعات بسیاری در زمینه برآورد تبخیر و تعرق گیاهان با استفاده از مدل سبال انجام شده است که همه کارایی این مدل را در مقیاس منطقه‌ای و حوضه‌ای مورد تایید قرار داده‌اند (اسدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ صحراگرد و همکاران، ۱۳۹۹؛ ولیزاده کامران و لنگ باف، ۱۳۹۷؛ مرشدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ یعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۵).

توت‌فرنگی میوه‌ای نسبتاً جدید است که تا ۳۰۰-۲۵۰ سال قبل به این شکل امروزی وجود نداشت و در بیشتر موارد استفاده دارویی داشته است. در قرن چهاردهم در فرانسه توت‌فرنگی‌های وحشی از جنگل به زمین زراعتی منتقل و از آن به عنوان یک گیاه اهلی استفاده گردید. در جنگل‌های شمال ایران توت‌فرنگی وحشی به طور فراوان در فصل تابستان یافت

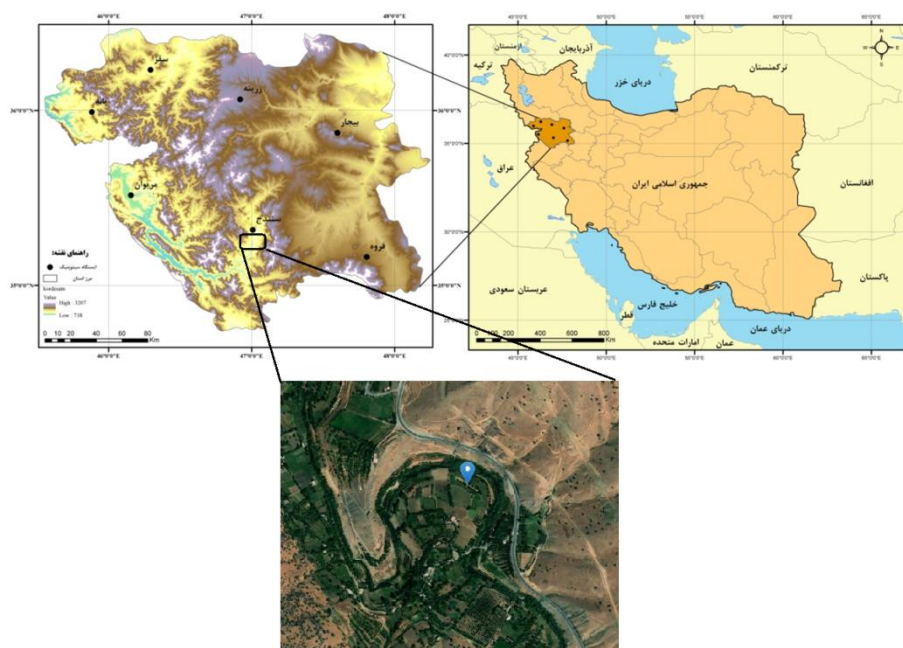
می‌شود. به نظر می‌رسد که اولین رقم اصلاح شده در زمان صدارت اتابک اعظم از فرانسه به ایران آمد و به نام اتابکی خوانده شد. در حال حاضر ایران با ۴۳۰۰ هکتار زمین زیرکشت توت فرنگی بعد از کره جنوبی و ژاپن مقام سوم تولید این محصول را در آسیا دارا می‌باشد. در این میان، استان کردستان با ۲۵۰۰ هکتار بیشترین سطح زیر کشت توت‌فرنگی کشور را در اختیار دارد و شهرستان سنندج با تولید ۶۰ درصد از توت فرنگی بیشترین میزان تولید این محصول را در سطح استان دارا می‌باشد. تولید توت‌فرنگی از جنبه‌های گوناگون از جمله ایجاد درآمد و اشتغال برای خانوارهای روستایی و نیز وجود نوسانات درآمدی کمتر نسبت به سایر محصولات نقش بسیار پررنگی در اقتصاد کشاورزی استان کردستان دارد. با این حال تولید این محصول در استان کردستان دارای معایب و مشکلاتی شده است که باعث شده است میزان تولید و عملکرد آن تا حدود زیادی کمتر از مقادیر مشابه جهانی باشد. یکی از این مشکلات، حجم بالای مصرف سموم و قارچ کش‌ها برای جلوگیری از پوسیدگی و خرابی زوهرنگام این محصول و دیگری عدم وجود برآوردهای دقیق تبخیر و تعرق واقعی جهت تخمین نیاز آبی این محصول در مقیاس مزرعه می‌باشد. لذا با توجه به اینکه تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای در خصوص برآورد تبخیر و تعرق واقعی توت فرنگی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دوری در ایران نشده است لذا در این پژوهش قصد بر این است که در یک مقیاس مزرعه‌ای میزان تبخیر و تعرق واقعی توت فرنگی با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور برآورد و بر اساس آن میزان نیاز آبی این محصول در سطح یک مزرعه برآورد گردد.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

استان کردستان با مساحت ۲۸۲۰۳ کیلومتر مربع در غرب ایران و مجاور کشور عراق بین ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار دارد که این مساحت ۷/۱ درصد از مساحت کل کشور را شامل می‌شود و از نظر وسعت رتبه ۱۶ را در کشور دارا است. از لحاظ اقلیمی و طبیعی استان کردستان منطقه‌ای کوهستانی می‌باشد که دشت‌های مرتفع و دره‌های پهن در کنار یکدیگر در این منطقه گسترده شده‌اند. اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقاط استان به حدود ۲۴۰۰ متر می‌رسد. کوه شاهو با ارتفاع ۳۳۰۰ متر بلندترین و منطقه

آلوت در بانه با ارتفاع حدود ۹۰۰ متر کم ارتفاع‌ترین نقطه استان می‌باشد که این اختلاف ارتفاع خود باعث به وجود آمدن اقلیم‌های متفاوت می‌گردد. لذا در این تحقیق یک مزرعه توت-فرنگی در نزدیکی روستای نشور از توابع شهر سنندج با عرض جغرافیایی $35/02$ و طول جغرافیایی $46/96$ درجه انتخاب گردید (شکل ۱). (نجفی، ۱۳۶۹).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

داده ها

در این پژوهش، جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی محصول توت‌فرنگی در یک مقیاس مزرعه‌ای در استان کردستان از ۷ تصویر سنجنده تصویربردار عملیاتی زمین (OLI) ماهواره لندست ۸ برای یک بازه زمانی ۷ ماهه منطبق بر فصل رشد این محصول یعنی از ماه مارس (اسفند) تا ماه سپتامبر (شهریور) برای سال ۲۰۱۹ (۱۳۹۸) استفاده شد. تمامی این تصاویر از مرکز آرشیو فعال توزیع فرایندهای سطح زمین ناسا به آدرس اینترنتی <https://earthexplorer.usgs.gov> دانلود شدند. مشخصات زمانی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این مطالعه در جدول ۱ آورده شده‌اند. بعد از اخذ تصاویر، تمامی آنها برای منطقه مورد مطالعه، موزائیک و سپس تصحیحات

رادیومتریکی و هندسی آنها انجام شد لازم به اشاره است که تمامی ۷ تصویر استفاده شده از لحاظ وضعیت آب و هوایی فاقد پوشش ابر بودند.

جدول ۱- تاریخ تصاویر سنجنده تصویربردار عملیاتی زمین (OLI) ماهواره لندست ۸ برای فصل رشد محصول توت فرنگی

تاریخ گذر ماهواره			
روز	ماه	سال	شماره تصویر
۳۰	مارس	۲۰۱۹	۱
۱۰	اسفند	۱۳۹۸	
۱۵	آوریل	۲۰۱۹	۲
۲۶	فروردین	۱۳۹۸	
۱۷	می	۲۰۱۹	۳
۲۷	اردیبهشت	۱۳۹۸	
۱۸	ژوئن	۲۰۱۹	۴
۲۸	خرداد	۱۳۹۸	
۴	ژولای	۲۰۱۹	۵
۱۳	تیر	۱۳۹۸	
۵	آگوست	۲۰۱۹	۶
۱۴	مرداد	۱۳۹۸	
۶	سپتامبر	۲۰۱۹	۷
۱۵	شهریور	۱۳۹۸	

همچنین با توجه به فقدان ابزار و ادوات اندازه گیری تبخیر و تعرق زمینی، از داده های روزانه پنج متغیر دمای حداکثر، دمای حداقل، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی ایستگاه همدید سنندج به عنوان نزدیکترین ایستگاه هواشناسی به مزرعه مورد مطالعه نیز جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش تجربی پنمن-مانتیت-فائو استفاده شد. این داده ها برای یک بازه زمانی ۷ ماه از ماه مارس تا ماه سپتامبر ۲۰۱۹ از اداره کل هواشناسی استان کردستان دریافت شد. موقعیت جغرافیایی ایستگاه همدید سنندج در شکل ۱ نشان داده شده است.

روش شناسی

بعد از دانلود تصاویر سنجده OLI ماهواره لندست از مدل توازن انرژی سطح (سبال) برای برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی و از روش تجربی پنمن-مانتیت-فائو جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد. در ذیل روش محاسبه هر دو مدل به تفکیک توضیح داده خواهند شد.

محاسبه شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)

شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) یک اندازه‌گیری غیر مستقیم از فعالیت فتوسنتزی است. دامنه این شاخص بین -۱ برای حداقل میزان و +۱ برای حداکثر میزان فعالیت فتوسنتزی است. شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N \quad (1)$$

این شاخص از یک اصل بنیادین استفاده می‌کند و آن این است که برای سطوح دارای پوشش گیاهی، طول موج‌های قرمز (RED) و مادون قرمز نزدیک (NIR) به ترتیب با جذب بالا و بازتاب پایین مشخص می‌شوند (چن و همکاران، ۲۰۰۳؛ گروئن ولد و باف، ۲۰۰۷). انعکاس کلروفیل در محدوده طول موج قرمز (RED) حدود ۲۰ درصد و در محدوده طول موج مادون قرمز نزدیک (NIR) حدود ۶۰ درصد است و تفاوت بین پاسخ‌های هر دو باند اجازه کمی سازی انرژی جذب شده توسط کلروفیل را می‌دهد، در نتیجه طبقات نشان دهنده سطوح مختلف پوشش گیاهی را فراهم می‌کند (توکر و سلرز، ۱۹۸۶).

محاسبه دمای سطح زمین (LST)

روش پنجره مجزا (SWT) از جمله روش‌های تعیین دمای سطح زمین (LST) است که در ابتدا برای تعیین دمای سطح دریا و سپس برای محاسبه دمای سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته است. برای استفاده از این روش به دو باند طیفی در محدوده مادون قرمز حرارتی نیاز است. اصول کلی این روش بر مبنای تفاوت قابلیت انتقال اتمسفر در دو محدوده طیفی مجاور به هم در ناحیه مادون قرمز در بین طیف‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر توسعه یافته‌اند. به علت اینکه اثر اتمسفر روی طول موج‌های مختلف متفاوت است، همین عامل اختلاف، چهارچوبی را در روش پنجره مجزا ایجاد می‌کند که از آن برای محاسبه دما می‌توان استفاده نمود. ازجمله پارامترهای مؤثر در این روش تعیین میزان گسیلمندی در سطح زمین است که مقدار آن برای آب دریا یک فرض می‌شود و از این رو محاسبه دمای سطح آب دریا با استفاده از این روش با دقت زیادی صورت می‌پذیرد، ولی در برآورد دمای سطح زمین باید تغییرات گسیلمندی سطح زمین را در الگوریتم لحاظ نمود. مقدار گسیلمندی تابعی از مقدار و تراکم پوشش گیاهی است

و برای محاسبه آن باید از شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده کرد. (فرج زاده و کریمی، ۱۳۹۲).
روش پنجره مجزا (SWT) دمای سطح زمین (LST) به عنوان (Ts) بیان می‌شود:

$T_s = T_i + c_1 (T_i - T_j) + c_2 (T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 c_4 W) (1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6 W) \Delta \varepsilon$	(۲)
--	-----

که T_i و T_j دماهای روشنایی سنجنده در باندهای i و j پنجره مجزا (کلوین)، ε میانگین گسیلندگی، $\varepsilon = 0.5(\varepsilon_i + \varepsilon_j)$ ، $\Delta \varepsilon$ تفاوت گسیلندگی، $\Delta \varepsilon = (\varepsilon_i - \varepsilon_j)$ ، مقدار W مجموع بخار آب جوی (گرم در هر سانتی‌متر مربع) و $c_0 - c_6$ ضرایب الگوریتم پنجره به دست آمده از داده‌های شبیه‌سازی شده است (یونس زاده جلیلی، ۲۰۱۳).

مدل توازن انرژی سطح (سبال)

مدل سبال، مقدار تبخیر و تعرق را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های ایستگاهی زمینی مورد نیاز و بر اساس معادله توازن انرژی محاسبه می‌نماید. از آنجایی که تصاویر ماهواره‌ای تنها می‌توانند اطلاعاتی در زمان گذر ماهواره ارائه دهند لذا مدل سبال می‌تواند مقدار شار تبخیر و تعرق برای هر پیکسل تصویر را به صورت باقیمانده معادله توازن انرژی سطح محاسبه کند (ثنایی نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). معادله کلی الگوریتم توازن انرژی به صورت رابطه (۳) زیر بیان می‌شود:

$\lambda ET = R_n - G - H$	(۳)
----------------------------	-----

که در آن R_n : شار تابشی کل بر حسب (W/m^2) ، λET : مقدار شار گرمایی نهان در لحظه عبور ماهواره بر حسب (W/m^2) ، H : شار گرمایی محسوس هوا بر حسب (W/m^2) ، G : شار گرمایی خاک بر حسب (W/m^2) . شار تابشی کل، محاسبه جبری ما بین تمامی تابش‌های ورودی و بازتابش خروجی از سطح می‌باشد. شار تابشی کل برابر جمع جبری تابش طول موج کوتاه به عنوان تابعی از آلودگی سطح و تابش طول موج بلند که از تفاضل میان طول موج بلند ورودی و خروجی به دست می‌آید. میزان تابش طول موج کوتاه ورودی به زمین ۳-۰/۳ میکرومتر می‌باشد. میزان تابش طول موج بلند خروجی از سطح زمین نیز در حدود ۱۰۰-۳ میکرومتر می‌باشد. شار تابشی کل نیز با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$R_n = (1 - \alpha) (R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} + R_{S\downarrow})$	(۴)
--	-----

که در آن R_n : شار تابشی کل بر حسب (W/m^2) ، $R_{s\downarrow}$: تابش امواج کوتاه، α : آلبدوی سطح بدون دیمانسیون، $R_{L\downarrow}$: تابش امواج بلند، $R_{L\uparrow}$: بازتابش امواج بلند، ε_0 : قابلیت انتشار سطح بدون دیمانسیون.

تابش موج کوتاه ورودی بخشی از تابش خورشید است که به صورت خالص وارد سطح زمین می‌شود. این تابش مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$R_{s\downarrow} = G_{sc} \times \cos \theta \times dr \times \tau_{sw}$	(۵)
--	-----

در رابطه فوق، G_{sc} ثابت خورشیدی $(\frac{W}{m^2})$ ، $\cos \theta$ کسینوس زاویه ورودی تابش خورشید بر حسب رادیان، dr معکوس فاصله نسبی زمین و خورشید، τ_{sw} ، قابلیت انتقال اتمسفری که مطابق رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z$	(۶)
--	-----

Z ، ارتفاع از سطح دریا می‌باشد که معمولاً معادل ارتفاع ایستگاه هواشناسی در نظر گرفته می‌شود.

شار گرمایی خاک (G): شار گرمایی خاک میزان ذخیره گرمایی خاک در نتیجه گرادیان دمایی مابین سطح خاک و لایه‌های پایین‌تر خاک می‌باشد. گرادیان دمایی تابعی از پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ می‌باشد که با ممانعت از ورود نور به سطح خاک و شکل‌گیری سایه در بالای خاک لخت، نسبت گرمایی سطح خاک لخت را بیان می‌کند. از آنجایی که اطلاعات میدانی در مورد قابلیت هدایت گرمایی خاک موجود نیست جهت محاسبه شار گرمایی خاک از روابط تجربی که تابعی از شاخص پوشش گیاهی، آلبدوی سطح و دمای سطح می‌باشد استفاده می‌شود. شار گرمایی خاک با استفاده از رابطه (۷) که توسط باستیانسن (۱۹۹۵) ارائه شده است محاسبه می‌شود.

$\frac{G}{R_n} = T_s / \alpha (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4)$	(۷)
---	-----

T_s : دمای سطح بر حسب درجه سانتی‌گراد، α : آلبدوی سطح، $NDVI$: شاخص پوشش گیاهی است

شار گرمای محسوس (H): شار گرمای محسوس میزان تلفات انرژی از خاک از طریق همرفت و فرایند انتشار در نتیجه اختلاف دمایی ما بین سطح و پایین‌ترین لایه جو می‌باشد. شار گرمای محسوس با استفاده از سرعت باد، ضریب زبری و اختلاف دمای سطح و هوا مورد

محاسبه قرار می‌گیرد. شار گرمایی محسوس یک مانع اساسی در برآورد تبخیر و تعرق به شمار می‌رود چرا که مقدار ترم‌های dT و مقاومت آئروودینامیکی سطح جهت محاسبه شار گرمای محسوس مجهول می‌باشد. جهت محاسبه این مجهولات الگوریتم ابتدا شار گرمای محسوس را در پیکسل‌های خشک و تر محاسبه می‌نماید. پیکسل خشک یا گرم بایستی در ناحیه خشک و بایر انتخاب شود که تبخیر و تعرق در آن اتفاق نمی‌افتد. پیکسل تر یا سرد نیز بایستی دارای دمای سطح برابر با دمای هوا باشد. واسنجی درونی الگوریتم شار گرمای محسوس توسط الگوریتم سبال نیاز به تصحیح اتمسفری توسط مدل‌های تابشی جهت محاسبه دمای سطح و آلبدو را حذف می‌نماید. این واسنجی درونی علاوه بر این موجب کاهش اثرات خطا در تخمین ضرایب زبری و مقاومت آئروودینامیک می‌شود. با توجه به تعیین پیکسل‌های سرد و گرم رابطه خطی مابین ترم dT و دمای سطح برقرار می‌گردد. شار گرمای محسوس با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$dT/r_{ah} \times H = (P \times C_p)$	(۸)
---------------------------------------	-----

P : چگالی هوا بر حسب (Kg/m^3) ، C_p : گرمای ویژه هوا برابر 1004 (J/Kg/K) ، dT : اختلاف دما بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 بر حسب (K) ، r_{ah} : مقاومت آئروودینامیکی در برابر انتقال گرما (S/m) . شار گرمای محسوس تاییدی از گرادیان حرارتی، زبری سطح و سرعت باد است. برای محاسبه شار گرمای محسوس، اختلاف دمای نزدیک سطح زمین برای پیکسل بایستی مشخص شود. الگوریتم سبال dT را برای هر پیکسل با فرض رابطه خطی بین dT و T محاسبه می‌کند.

$dT = b + aT_s$	(۹)
-----------------	-----

در این معادله a و b ثابت‌هایی هستند که با توجه به پیکسل‌های سرد و گرم محاسبه میشوند. بدین منظور دو پیکسل آستانه انتخاب می‌شوند. یکی از این پیکسل‌ها که پیکسل سرد نامیده می‌شود، مربوط به منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه و خوب آبیاری شده است که دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هواست و تبخیر تعرقی معادل تبخیر- تعرق مرجع دارد. دارا بودن بیشترین شاخص پوشش گیاهی $NDVI$ ، کمترین آلبدو و دمای سطحی از ویژگی‌های پیکسل سرد محسوب می‌شود. پیکسل دوم که پیکسل گرم نامیده می‌شود، زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک می‌باشد. فرض به کار رفته در مورد پیکسل گرم این

است که هیچ گرمای نهانی را منتشر نمی‌کند. به عبارتی دیگر مقدار تبخیر و تعرق آن نزدیک به صفر است

شار گرمای نهان: شار گرمای نهان از تفاضل جبری معادله توازن انرژی محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه شار گرمای نهان جز تبخیری تعیین می‌گردد. با استفاده از جز تبخیری در هر پیکسل میزان تبخیر و تعرق در ۲۴ ساعت مورد محاسبه قرار می‌گیرد. تبخیر و تعرق لحظه‌ای با استفاده از رابطه ۱۰ به دست می‌آید.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (10)$$

که در آن: ET مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای برحسب (mm/hr)، λ : شار گرمای نهان و یا میزان گرمایی که در تبخیر یک کیلوگرم آب جذب می‌شود برحسب (J/Kg).
کسر تبخیر- تعرق مرجع به صورت نسبت تبخیر- تعرق لحظه‌ای محاسبه شده برای هر پیکسل به تبخیر- تعرق محاسبه شده توسط داده‌های هواشناسی تعریف می‌شود.

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (11)$$

نسبت تبخیر لحظه‌ای بیان کننده نسبتی از مقدار واقعی نیاز تبخیر سطح است در هنگامی که شرایط رطوبتی هوا با شرایط زمین در حالت توازن باشد. مقدار ET_r ، تبخیر- تعرق با استفاده از داده‌های هواشناسی در زمان عبور ماهواره است. مقادیر $ET_r F$ در محدوده صفر تا یک تغییر میکنند. در یک پیکسل کاملاً خشک، هر دو مقدار $ET_r F$ و ET برابر صفر هستند. از آنجا که مقادیر تبخیر روزانه نسبت به مقادیر لحظه‌ای پرکاربردتر است، مقادیر لحظه‌ای بدست آمده توسط سبال در زمان گذر ماهواره، بایستی به مقادیر روزانه تبدیل شوند. در نهایت مقدار ET_{24} مطابق رابطه زیر محاسبه میشود.

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r-24} \quad (12)$$

ET ، ET_{24} بیست و چهار ساعته تجمعی در روز تصویر ماهواره‌ای است.

روش پنمن- مانتیث-فائو

تبخیر و تعرق از یک سطح مرجع که با کمبود آب مواجه نیست تبخیر و تعرق گیاه مرجع نامیده می‌شود. سطح مرجع عبارت است از یک گیاه مرجع چمن با ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطح ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتاب ۰/۲۳. این سطح مشابه یک سطح وسیع چمن سبزرنگ، خوب آبیاری شده با ارتفاع یکنواخت، با رشد فعال و سایه‌اندازی کامل می‌باشد (آلن و همکاران،

۲۰۱۲). در روش پنمن مانیتیت گیاه مرجع یک گیاه فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتی متر که ضریب بازتاب تابش در آن ۲۳ درصد و مقاومت روزنه‌های آن در مقابل تعرق ۷۰ می‌باشد. معادله پنمن-مانیتیت-فائو به صورت رابطه ۱۳ خلاصه می‌شود:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[890/(T+273)]U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (13)$$

که در آن ET_0 : تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day)، R_n : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJm^{-2}d^{-1}$)، T : متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، U_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms^{-1})، $e_a - e_d$: کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (KPa)، Δ : شیب منحنی فشار بخار ($KPaC^{-1}$)، γ : ضریب سایکرومتری ($KPaC^{-1}$)، G : شار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2}d^{-1}$) می‌باشد (میریعیقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۳).

برآورد نیاز آبی

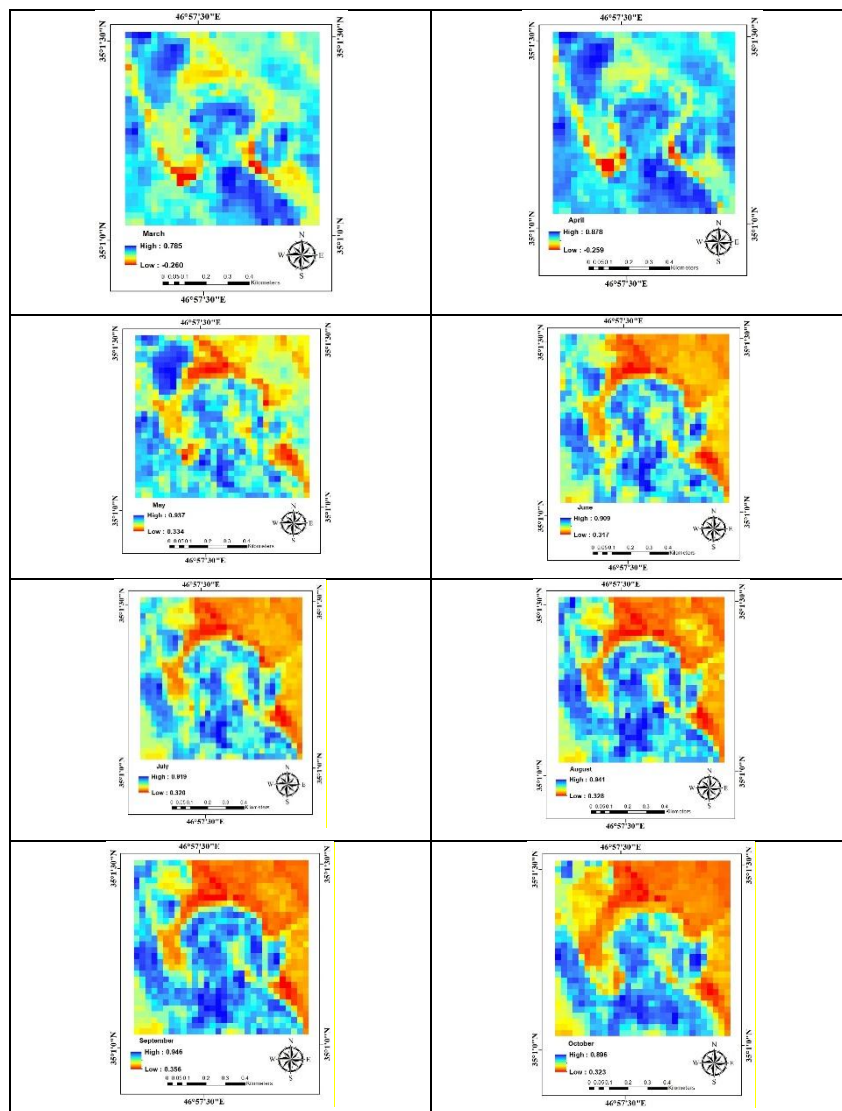
در نهایت با استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل ضریب گیاهی محصول توت-فرنگی منطقه مورد مطالعه که از بیشترین محصولات منطقه می‌باشد مورد محاسبه قرار خواهد گرفت. ضریب گیاهی که از تقسیم تبخیر و تعرق واقعی گیاه بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع به دست می‌آید نیز یک مقدار ثابت نبوده و در طول فصل رشد گیاه تغییر می‌کند (کردوانی، ۱۳۸۱).

$$kc = \frac{ET_c}{ET_p} \quad (14)$$

به علت نبودن داده‌های لایسیمتری از روش فائو-پنمن-مانیتیت برای کار استفاده شد.

نتایج و بحث

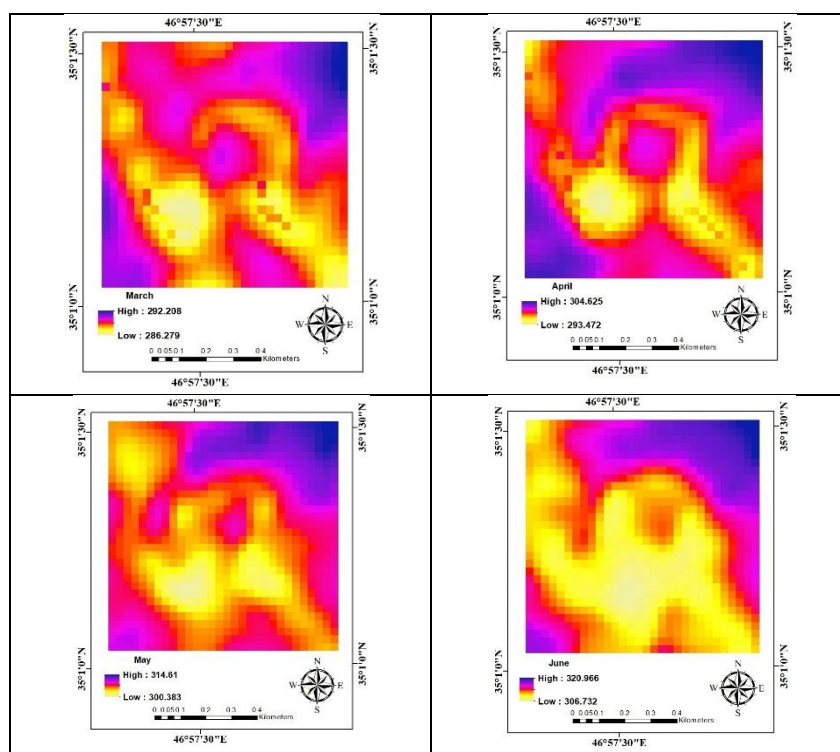
نقشه‌های تغییرات پوشش گیاهی مزرعه توت فرنگی در نزدیکی روستای نشور واقع در شهرستان سنندج در مقیاس ماهانه برای سال آبی ۲۰۱۹ تهیه شدند (شکل ۲). در این تصاویر به روشنی تغییرات پوشش گیاهی نشان داده شده است. بیشترین تراکم پوشش گیاهی محاسبه شده در نقشه‌های استخراج شده برای ماه سپتامبر و کمترین تراکم برای ماه مارس می‌باشد. شکل (۲). در مراحل بعدی از این نقشه‌ها برای محاسبه تبخیر و تعرق استفاده خواهند شد.

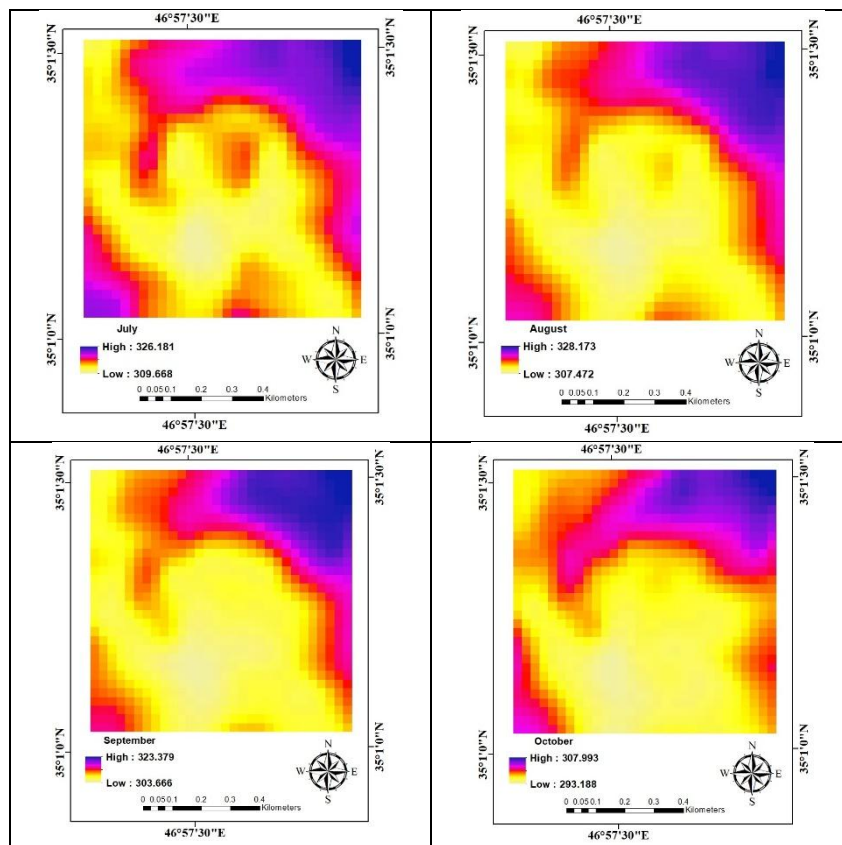


شکل ۲- تصاویر پویایی پوشش گیاهی مستخرج از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ برای ماه های مارس تا سپتامبر در یک مقیاس ماهانه برای سال ۱۳۹۸

با توجه به مقادیر LST بدست آمده در منطقه، کمترین میزان دمای سطح زمین در ماه مارس ۱۹/۰۵ درجه سانتیگراد و بیشترین آن در ماه اگوست ۵۵/۰۲ درجه سانتیگراد بوده است (شکل ۳). همچنین توزیع میانگین ماهانه LST در این مزرعه نشان می‌دهد قسمتهایی که دارای تراکم پوشش گیاهی بیشتری هستند نسبت به سایر مناطق دارای دمای به مراتب

پایین‌تری می‌باشند. چونکه میکروکلیمای بالای سطح خاک در زیر تاج پوشش گیاهی (اکوکلیما) تحت تأثیر نوع گیاه بوده و ممکن است با آب‌وهوای اطراف چتر پوشش گیاهی متفاوت باشد. چون وجود پوشش گیاهی جریان هوا را کاهش داده و در سطح خاک سایه می‌اندازد. در مقابل مناطق شهری، بایر و کویری دمای بالاتری دارند، این موضوع نیز ناشی از وجود سطوح آسفالت، ساختمان‌سازی، بایر و لخت بودن خاک می‌باشد بطوری‌که در مناطق گرم و خشک از صد واحد انرژی خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد ۷۵ درصد آن جذب خاک می‌شود و تنها ۲۰ درصد آن منعکس خواهد شد (جعفری، ۱۳۸۷).

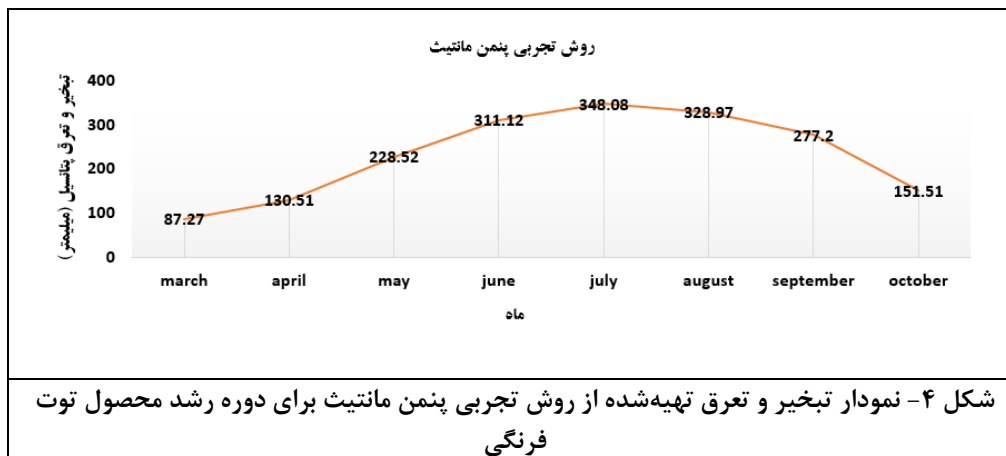




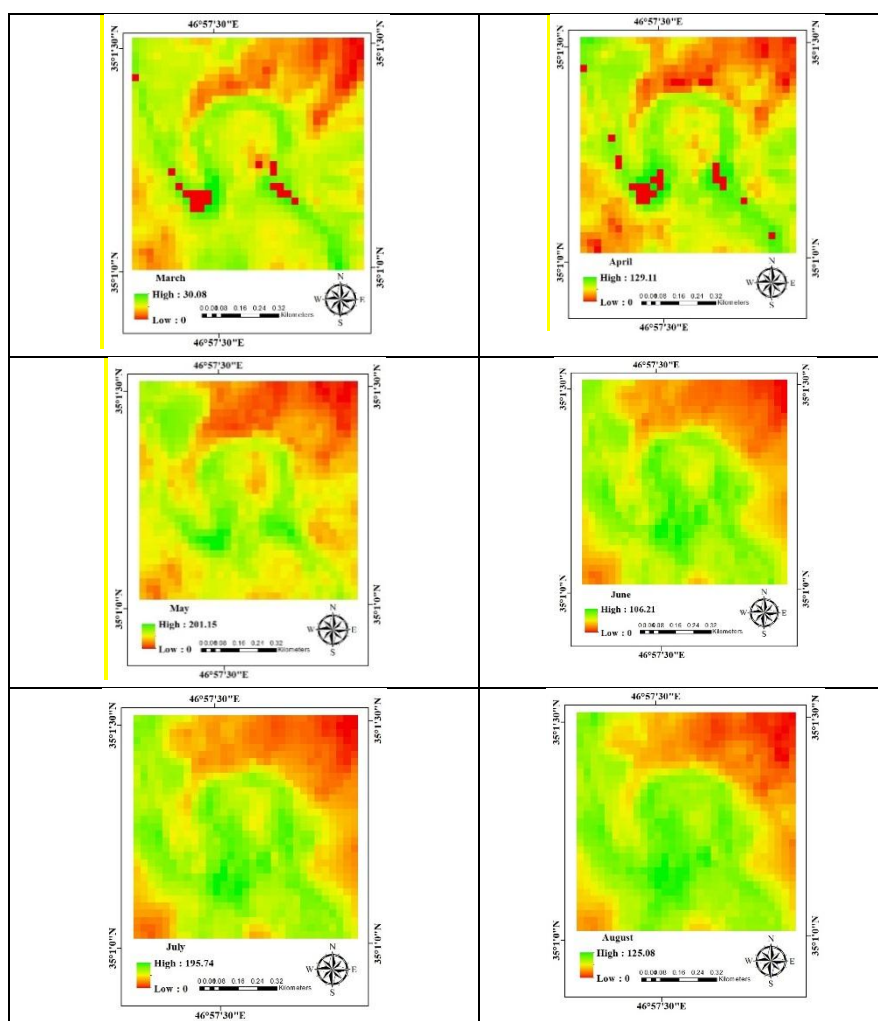
شکل ۳- تصاویر LST مستخرج از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ برای ماه های مارس تا سپتامبر در یک مقیاس ماهانه برای سال ۱۳۹۸

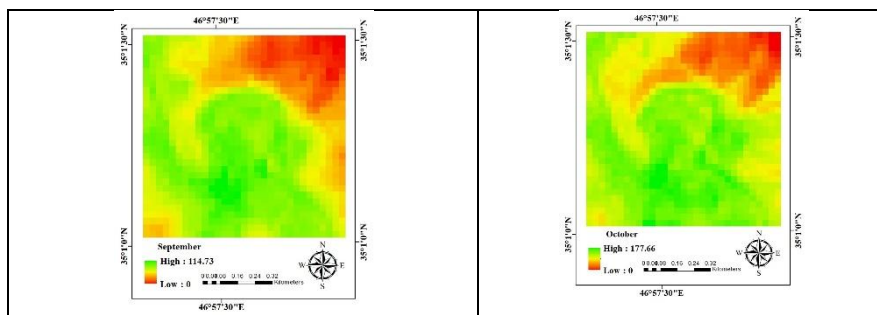
در این تحقیق جهت تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل و نیاز آبی محصول توت‌فرنگی، علاوه بر استفاده از داده‌های ماهواره‌ای از داده‌های ایستگاه هواشناسی سنندج نیز استفاده شد. در این تحقیق نیاز آبی محصول توت‌فرنگی با روش فائو پنمن مونتیث (FPM) که توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO) به عنوان روش استاندارد معرفی شده، محاسبه شد. به طور کلی با توجه به نمودار تهیه شده از نتایج تبخیر و تعرق پتانسیل محصول توت‌فرنگی با استفاده از روش تجربی فائو پنمن مانتیث برای سال آبی ۱۳۹۸، روند تغییرات تبخیر و تعرق به خوبی قابل مشاهده می‌باشد که کمترین میزان تبخیر و تعرق در ماه مارس و بیشترین میزان تبخیر و تعرق در ماه جولای محاسبه شده است. به طور کلی با نزدیک شدن به فصل گرم تبخیر و تعرق افزایشی می‌باشد به عنوان نمونه ماه ژوئن ۳۱۱، جولای ۳۴۸ و ماه آگوست

۳۲۸/۹۷ میلی متر می باشد و با نزدیک شدن به فصل سرد تبخیر و تعرق کاهشی می باشد که در ماه سپتامبر ۲۲۷، اکتبر ۱۵۱/۵۱ و ماه مارس ۸۷/۲۷ میلی متر نشان داده شده است (شکل ۵).



نتایج تبخیر و تعرق به دست آمده با استفاده از روش سبال مستخرج از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در تاریخ‌های مورد نظر در شکل ۵ ارائه شده است. در این تصاویر دامنه تغییرات درون سالانه تبخیر و تعرق در ماه‌های مختلف به خوبی نشان داده شده است. تغییرات مکانی به علت تنوع در کاربری اراضی، نوع محصول و تاریخ شروع رشد و پایان فصل رشد می باشد. در مقابل تغییرات زمانی تبخیر و تعرق تحت تأثیر تغییرات دمای هوا و میزان تراکم تاج پوشش گیاهی می باشد. روند درون سالانه میزان ET در مزرعه توت فرنگی، در دو ماه‌های سرد سال تبخیر کاهشی می باشد و با نزدیک شدن به فصل بهار و تابستان به دلیل افزایش دما و آبیاری محصولات میزان تبخیر و تعرق بیشتر می شود. تنها نکته قابل توجه در اینجا کاهش تبخیر و تعرق در ماه ژوئن نسبت به ماه‌های دیگر است که می توان دلیل آن را برداشت محصول در این ماه دانست. همانطور که در نقشه‌های شکل ۵ قابل مشاهده است، نتایج پایش تبخیر و تعرق در مزرعه توت فرنگی به کمک روش سبال به این صورت است که کمترین میزان تبخیر و تعرق در ماه مارس به میزان ۳۰/۰۸ میلی متر و حداکثر میزان ET در ماه می ۲۰۱/۱۵ میلی متر در ماه را نشان می دهد. در فصل گرم میزان ET به ترتیب ژوئن ۱۰۶، جولای ۱۹۶ و ماه آگوست ۱۲۵ میلی متر می باشد و در فصل سرد میزان تبخیر و تعرق در ماه سپتامبر ۱۱۵، اکتبر ۱۷۸ و ماه مارس ۳۰/۰۸ میلی متر نشان داده شده است.





شکل ۵- تصاویر تبخیر و تعرق مستخرج از روش سبال برای ماه های مارس تا سپتامبر

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می شود نیاز آبی محصول توت فرنگی برای سال آبی ۱۳۹۸ محاسبه شد. با مشاهده جدول ۱ می توان مشاهده کرد که ماه مارس و ژوئن با میزان ۰/۳۴ کم ترین و ماه اکتبر با میزان ۱/۱۷ بیشترین نیاز آبی را دارا می باشد و در ادامه، نیاز آبی توت فرنگی در ماه های جولای ۰/۵۶، آگوست ۰/۳۸، سپتامبر ۰/۴۱ و اکتبر ۱/۱۷ محاسبه شد.

نیاز آبی (میلی متر)	انتخاب یک پیکسل در هر تصویر	ماه
۰/۳۴	۰/۰۵	مارس
۰/۹۸	۰/۷۳	آوریل
۰/۸۸	۰/۵۷	می
۰/۳۴	۰/۰۵	ژوئن
۰/۵۶	۰/۲۸	ژولای
۰/۳۸	۰/۱۸	آگوست
۰/۴۱	۰/۱۷	سپتامبر
۱/۱۷	۰/۸۷	اکتبر

نتیجه گیری و پیشنهادها

توت فرنگی به دلیل سیستم ریشه کم عمق خود، هم تحمل کمی در برابر تنش خشکی و هم به شرایط غرقابی بسیار حساس است، بنابراین مدیریت آبیاری توت فرنگی از اهمیت زیادی برخوردار است به طوری که با مدیریت بهینه آبیاری همراه با تغذیه متعادل، افزایش قابل ملاحظه عملکرد اتفاق خواهد افتاد. با توجه به اهمیت اقتصادی محصول توت فرنگی، تعیین و گزارش نیاز آبی مربوط به آن برای کردستان و همچنین سطح کشور می تواند جهت جلوگیری از هدر رفت آب اطلاعات مفیدی را در اختیار برنامه ریزان و

کشاورزان منطقه قرار دهد. در همین راستا در این مطالعه اقدام به بررسی نیاز آبی این محصول در سال آبی ۲۰۱۹ در سنندج گردید. معمولاً برای تخمین دقیق مقدار آب مورد نیاز گیاهان، به داده‌ها و پارامترهای متعدد هواشناسی نیاز است. ولی این داده‌ها همیشه به طور جامع و کامل در دسترس نیستند. برای حل این مشکل می‌توان از مدل‌هایی با داده‌های کمتر استفاده کرد که همان نتایج را ارائه کند. در این راستا در مطالعه حاضر از اطلاعات پارامترهای مختلف ایستگاه هواشناسی و داده‌های ماهواره‌ای جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل استفاده شده تا نیاز آبی محصول توت‌فرنگی در منطقه اندازه‌گیری شود. روش کار به این صورت بود که ابتدا تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال به کمک تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ محاسبه گردید. در مرحله بعد با استفاده از معادله پنمن-مانتیث تبخیر و تعرق پتانسیل نیز محاسبه شد و در نهایت با استفاده از نتایج تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل نیاز آبی محصول توت‌فرنگی برآورد گردید که نتایج آن در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد. نتایج کلی به این صورت است که کم‌ترین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه مارس و بیشترین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه جولای محاسبه شد. در ماه‌های سرد روند درون سالانه میزان ET در این مزرعه توت‌فرنگی از طریق الگوریتم سبال، کاهشی نشان داده شد که با نزدیک شدن به فصل بهار و تابستان به دلیل افزایش دما و آبیاری محصولات در منطقه، میزان تبخیر و تعرق روند افزایشی به خود گرفته است. به طور کلی کمترین میزان تبخیر و تعرق در این مزرعه در ماه مارس و حداکثر میزان ET در ماه می بود.

منابع

۱. اسدی، مهدی، خلیل ولیزاده کامران، محمد باعقیده و حامد ادب (۱۳۹۹). مقایسه و تخمین سپیدایی سطوح مختلف کاربری اراضی با استفاده از روش سبال و متریک. فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، پیاپی ۵۹، صص ۱۷۱-۱۵۷.
۲. بهمن آبادی، بهاره، عباس کاویانی، پیمان دانشکار آراسته، رستا نظری (۱۳۹۷). برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های تک منبعی و دو منبعی در دشت قزوین. مجله پژوهش آب در کشاورزی، سال سی و دوم، شماره ۲، صص ۲۴۶-۲۲۷.

۳. ثنایی نژاد، سید حسین، نوری، سمیرا، هاشمی نیا، سید مجید. (۱۳۹۰). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره ای در منطقه مشهد. نشریه آب و خاک، شماره ۳، صص ۵۴۷-۵۴۰.
۴. جعفری، محمد. (۱۳۸۷). احیای مناطق خشک و بیابانی، انتشارات دانشگاه تهران.
۵. صحراگرد، ستاره، عبدعلی ناصری، محمد الباجی، مصطفی کابلی زاده (۱۳۹۹). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم توازن انرژی سطحی سبال و تصاویر تلفیق شده ی ماهواره ای لندست ۸ و سنتینل ۲ (مطالعه موردی: کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان). مجله آبیاری و زهکشی ایران، سال چهاردهم، شماره ۱، صص ۱۶۷-۱۵۶.
۶. فرج زاده، منوچهر، کریمی، نعمت الله. (۱۳۹۲). مبانی هواشناسی ماهواره ای. انتشارات سمت.
۷. کردوانی، پرویز (۱۳۸۱). منابع و مسائل آب در ایران. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
۸. مرشدی، علی، مهدی نادری، سید حسن طباطبایی، جهانگرد محمدی (۱۳۹۶). برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه ای به کمک داده های سنجنش از دور در دشت شهرکرد (ب) مقایسه نتایج مدل های SEBAL و METRIC نسبت به برخی مدل های ریاضی تبخیر و تعرق. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال بیست و یکم، شماره ۳، صص ۱۳-۱.
۹. میر یعقوب زاده، میرحسین، کریم سلیمانی، محمود حبیب نژاد روشن، کاکا شاهی، کریم عباسپور و سمیرا اخوان (۱۳۹۳). تعیین و ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده های سنجنش از دور. مطالعه موردی حوزه آبخیز تمر، گلستان. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، شماره ۱۵، صص ۱۰۲-۸۹.
۱۰. نجفی، یدالله (۱۳۶۹). جغرافیای عمومی استان کردستان. انتشارات امیرکبیر، تهران، ایران.
۱۱. ولیزاده کامران، خلیل و مریم لنگ باف (۱۳۹۷). برآورد تبخیر- تعرق واقعی ذرت با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره ای و مدل سبال در منطقه خوزستان. نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، شماره ۶۵، صص ۲۳۳-۲۲۰.
۱۲. یعقوب زاده، مصطفی، زهرا ایزدپناه، سعید برومند نسب، حسام سید کابلی (۱۳۹۵). مقایسه الگوریتم سبال با مدل SWAP و روش های محاسباتی جهت تعیین تبخیر و تعرق. فصلنامه علوم و مهندسی آبیاری، سال سی و نهم، شماره ۳، صص ۴۹-۳۹.

13. Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., Bastiaanssen, W.(2002). SEBAL (Surface energy balance algorithms for land). Adv. Training Users Manual.
14. 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 climate. PhD. Thesis, Wageningen University, Netherlands, 286pp.
15. Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslang, A.A. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) Formulation. Journal of Hydrology, 212-213, 198-212.
16. Chen P.Y., Srinivasan R., Fedosejevs G., Kiriya J.R., (2003), Evaluating different NDVI composite techniques using NOAA-14 AVHRR data, International Journal of Remote Sensing, 24, 3403- 3412.
17. Groeneveld D.P., Baugh W.M., (2007), Correcting satellite data to detect vegetation signal for eco-hydrologic analyses, Journal of Hydrology, 344, 135–145.
18. Kustas, W.P., and Norman, J.M. 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. J. Sci. Hydrol. 41: 495-516.
19. Tucker C.J., Sellers P.J., (1986), Satellite remote sensing of primary vegetation,. International Journal of Remote Sensing, 7, 1395–1416.
20. Youneszadeh Jalili, S. (2013). The effect of land use on land surface temperature in the Netherlands. Lund University, 180pp.

The application of remote sensing of the surface energy balance model (SEBAL) in estimating the actual evapotranspiration of strawberry in a farm scale in Kurdistan province.

Peyman Mahmoudi^{1}, Hiresht Salimpour², Fatemeh Firoozi³*

1- Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

3- Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Department of Remote Sensing and Geographical Information System (GIS), Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

* p_mahmoudi@gep.usb.ac.ir

Abstract

Accurate calculation of the actual evapotranspiration for types of crops and agricultural products assumes significant importance in the planning and optimization of water in arid and semi-arid regions. This research uses the remote-sensing-based surface energy balance algorithm for land (SEBAL) model to calculate the actual evapotranspiration of the product of strawberries on a farm scale in the province of Kurdistan. To calculate the model, seven imager pictures of the Operational Land Imager (OLI) of Landsat 8 Satellite for a seven-month interval of the product growth, i.e., from March to September (2019) were used. Because there were no instruments to measure terrestrial evapotranspiration, daily data of five variables of maximum temperature, minimum temperature, wind velocity, relative humidity, and sun hours of the Sanandaj's synoptic station as the closest meteorological station were studied to measure the potential evapotranspiration using the FAO-Penman-Monteith experimental method. These data pertain to a seven-month interval from March to September of 2019, received from the Kurdistan Meteorology Bureau. In the end, using values of actual evapotranspiration and potential evapotranspiration, the water requirement of the product of strawberry on a farm scale in the province was calculated.

Keywords: Sanandaj, FAO- Penman-Monteith, Landsat, actual evapotranspiration, potential evapotranspiration