



کاربرد الگوریتم سبال در تعیین حداکثر سهم روزانه گندم دیم از منابع آب سبز با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (مطالعه موردی: شهرستان اهر)

علی اشرف صدرالدینی^{۱*}، حامد سبزی دهخوارقانی^۲، امیرحسین ناظمی^۱، ابوالفضل مجنونی هریس^۳

۱. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

۲. دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۱۹ مهر ۱۳۹۸

پذیرش: ۵ فروردین ۱۳۹۹

دسترسی اینترنتی: ۲۸ فروردین ۱۳۹۹

واژه‌های کلیدی:

تبخیر و تعرق

تصاویر مودیس

الگوریتم سبال

گندم دیم

اهر

چکیده

کاربرد تکنیک‌های سنجنش از دور در برآورد مکانی و زمانی مقادیر تبخیر و تعرق جایگزینی برای اندازه‌گیری‌های میدانی است. هدف از این مطالعه، تعیین حداکثر سهم روزانه گندم دیم از منابع آب سبز در شهرستان اهر با استفاده از اجرای الگوریتم سبال بر روی تصاویر مودیس است. در این پژوهش ابتدا کارایی الگوریتم سبال در برآورد تبخیر و تعرق گندم از مقایسه نتایج آن با روش الگامن افهولدر در اراضی گندم دیم و روش فائو پنمن مانیت در اراضی گندم آبی ارزیابی شد و سپس حداکثر مقدار روزانه تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم با استفاده از الگوریتم مذکور در سطح منطقه بدست آمد. از محصولات بازتاب سطحی و دمای سطح زمین سنجنده مودیس جهت رصد تغییرات مقادیر شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده در طول دوره رشد گندم، تهیه نقشه اراضی گندم و برآورد مقادیر تبخیر و تعرق آن در سال ۱۳۸۹ در دوره خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم استفاده شد. پس از ارزیابی کارایی الگوریتم سبال در دوره مذکور، حداکثر سهم روزانه گندم دیم از منابع آب سبز در ۲۷ اردیبهشت سال ۱۳۹۸ محاسبه گردید. از مقایسه نتایج الگوریتم سبال با نتایج روش‌های محاسباتی در اراضی گندم میانگین خطای مطلق ۰/۶۱ میلی‌متر بر روز و ضریب همبستگی ۰/۹ بدست آمد. همچنین مشخص گردید که بیشترین میزان تبخیر و تعرق اراضی گندم پس از زمان به اوج رسیدن منحنی شاخص گیاهی آن می‌باشد که در این مقطع با استفاده از الگوریتم سبال حداکثر سهم روزانه گندم دیم از منابع آب سبز در سال ۱۳۹۸ حدود ۰/۹۳ میلیون مترمکعب برآورد گردید.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: sadraddini@tabrizu.ac.ir

مقدمه

با توسعه تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش‌ازدور (RS) به‌خصوص در زمینه استفاده از تصاویری با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، بخش کشاورزی جزء بخش‌هایی است که از این تکنولوژی بیشترین بهره را در راستای تدوین استراتژی‌های نوین در مدیریت دقیق متغیرهای مزرعه برده است (۳۵). از میان این متغیرها، تبخیر و تعرق نه‌تنها یکی از عوامل تعیین‌کننده در مدیریت آب کشاورزی است بلکه یکی از اجزاء مهم چرخه آب و انرژی است (۲۳) و (۳۰). اندازه‌گیری میدانی تبخیر و تعرق با روش‌هایی از قبیل برج‌های اندازه‌گیری شار گرمای اددی (Eddy Covariance Tower)، نسبت باون (Bowen Ratio)، لایسیمتر (Lysimeter) و تشت تبخیر (Pan Evaporation) انجام می‌گیرد که نیازمند سنجنده‌های دقیق باقابلیت پاسخ‌دهی بسیار سریع در سیستم‌های اندازه‌گیری شار انرژی و فرآیند نگهداری روزانه در لایسمترها است (۶). از طرفی دامنه وسیع ارائه‌شده برای ضریب تشت تبخیر توسط محققین مختلف در نقاط مختلف جهان، بیانگر این موضوع است که هر تشت تحت تأثیر عوامل محیطی و کاربری خود قرار دارد و چنین دامنه وسیعی تأکید بر ضعف کیفیت داده‌های تشت تبخیر دارد (۳۶). بنابراین روش‌های تجربی زیادی برای تخمین تبخیر و تعرق در شرایط اقلیمی و جغرافیایی مختلف با استفاده از داده‌های هواشناسی توسعه داده‌شده‌اند. از میان این روش‌ها، روش فائو پنمن مانیتث (FAO Penman-Monteith) به‌عنوان یک روش استاندارد جهت برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع بشمار می‌آید (۵ و ۱۰). لیکن تعداد زیاد پارامترهای ورودی در این روش و لزوم کیفیت بالا در فرآیند اندازه‌گیری آن‌ها، استفاده از این روش را پیچیده می‌سازد (۲۰).

با توجه به ماهیت نقطه‌ای و یا ایستگاهی روش‌های اندازه‌گیری میدانی تبخیر و تعرق و نیز دشواری‌های مربوط به تعیین ضرایب گیاهی در دوره‌های مختلف رشد و فرضیاتی مبنی بر همگن بودن برخی پارامترهای مؤثر در روش‌های محاسباتی آن، تحقیقات در زمینه برآورد تبخیر و تعرق در

دهه‌های اخیر بر توسعه تکنیک‌های سنجش‌ازدور متمرکز بوده است (۳۴).

نقشه‌های تبخیر و تعرق حاصل از فنون سنجش‌ازدور راهی برای بهبود تشخیص تنش آب زراعی، تدقیق برنامه‌ریزی برای آبیاری و کمک به مدیریت منابع محدود آب است (۴۰) و (۴۴). همچنین این نقشه‌ها در سیستم‌های پیش‌بینی خشک‌سالی و نیز مدل‌سازی منابع آبی در مقیاس حوزه آبریز نیز کاربرد گسترده‌ای یافته است (۲۴).

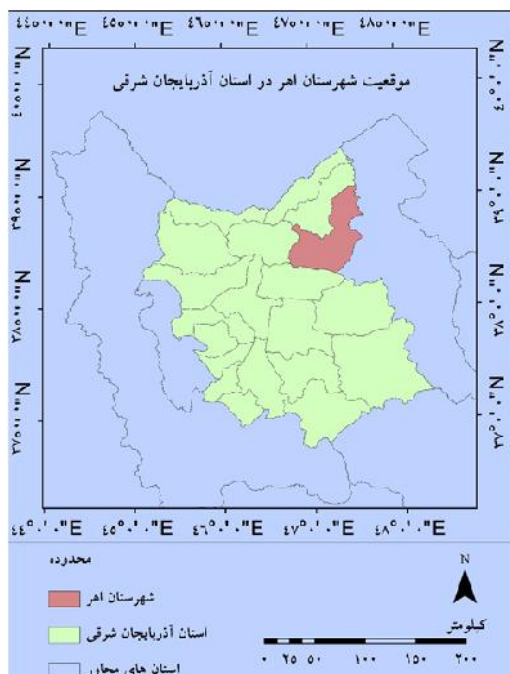
مدل‌های مذکور که اغلب با استفاده از حل معادله بیلان انرژی سطح میزان تبخیر و تعرق واقعی را برای هر پیکسل محاسبه می‌نمایند، به دو گروه تک منبعی و دو منبعی تقسیم می‌شوند. مدل‌های بیلان انرژی تک منبعی تفکیکی بین گیاه و خاک قائل نبوده و از یک رابطه کلی برای محاسبه شار گرمای محسوس استفاده می‌کنند (۴۶). این در حالی است که در مدل‌های دو منبعی شار گرمای محسوس به دو مؤلفه گیاه و خاک به‌طور مجزا تقسیم می‌گردد. از بین مدل‌های بیلان انرژی که تاکنون ارائه گردیده است، مدل شاخص بیلان انرژی ساده‌شده (Simplified Surface Energy Balance Index) (۳۹) برای اقلیم مرطوب و الگوریتم بیلان انرژی سطح برای زمین (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (۱۵) معروف به الگوریتم سبال (SEBAL) و روش پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با قدرت تفکیک بالا و کالیبراسیون درونی (Mapping ET at high Resolution with Internalized) (۱۱) معروف به الگوریتم متریک (METRIC) برای اقلیم خشک و نیمه‌خشک توصیه گردیده‌اند (۱۷). در ایران نیز تاکنون در برخی مناطق از الگوریتم سبال جهت تعیین اجزای معادله بیلان انرژی (۳ و ۴) و همچنین از تصاویر سنجنده مودیس در برآورد مؤلفه‌های تابش خورشیدی (۱) استفاده گردیده است.

مطالعات سال‌های اخیر در ارتباط با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور در زمینه برآورد تبخیر و تعرق عموماً متمرکز بر دو الگوریتم سبال و متریک (METRIC) و با اهداف مختلف پژوهشی انجام‌شده است که از آن جمله به ارزیابی یکنواختی تأمین آب در سیستم‌های بزرگ آبیاری اشاره نمود.

گیاهان کشت شده در سیستم دیم می‌گردد (۴۷) برآورد آن می‌تواند یکی دیگر از اهداف کاربرد تکنیک‌های سنجش از دور در بخش کشاورزی باشد که در این راستا طی مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۷ در کشور چین، از تصاویر سنجنده مودیس مربوط به سال ۲۰۰۸ و تکنیک‌های سنجش از دور جهت برآورد شاخص سطح پوشش گیاهی و تشعشع ورودی استفاده شد و این پارامترها به‌عنوان ورودی مدل فائو پنمن مانیتیت برای محاسبه مقدار مصرف ماهانه از منابع آب سبز ناشی تبخیر و تعرق در اراضی کشاورزی بکار رفت. مقایسه نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق از برج‌های شار گرمای اددی نشان داد که مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تبخیر و تعرق ماهانه در اراضی کشاورزی دارای ضریب همبستگی ۰/۹۶ است (۳۱). با توجه به اهمیت منابع آب سبز که عمده مصرف آن در بخش کشاورزی دیم است، هدف از این پژوهش اعمال الگوریتم سبال به‌عنوان یک تکنیک متداول در سنجش از دور بر روی تصاویر سنجنده مودیس جهت برآورد حداکثر میزان روزانه مصرف آب در کشت گندم دیم است. جهت ارزیابی صحت نتایج الگوریتم سبال در برآورد تبخیر و تعرق گندم در منطقه مورد مطالعه و به کمک تصاویر سنجنده مودیس، برای نخستین بار نتایج این الگوریتم با دو روش الگامن افهولدر (Eagleman-Affholder) و فائو پنمن مانیتیت (FAO Penman-Monteith) در اراضی گندم مقایسه گردید. از پیکسل‌هایی که روند تغییرات شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده (NDVI) در آن‌ها مشابه با روند تغییرات این شاخص در اراضی نظارت شده گندم بود، جهت تولید نقشه اراضی گندم استفاده گردید. با توجه به اینکه روش فائو پنمن مانیتیت (۱۰) مقادیر تبخیر و تعرق را با فرض عدم وجود تنش آبی وارد شده به گیاه برآورد می‌نماید، روش الگامن و آفهلدر (۷ و ۲۲) جهت ارزیابی نتایج سبال در برآورد تبخیر و تعرق گندم دیم که عموماً تحت تنش آبی است، مورد استفاده قرار گرفت که برای این کار ابتدا نقشه خاک منطقه مورد مطالعه با استفاده از ترکیب داده‌های حاصل از بررسی پروفیل‌های حفر شده در نقاط مختلف با نقشه خاک فائو تهیه گردید. با فرض اینکه تنش آبی وارده به گندم

در این راستا مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۹ میلادی با استفاده تصاویر ماهواره لندست مربوط به دو دوره کشت گیاه قهوه در منطقه‌ای از کشور برزیل انجام گرفت که در آن با استفاده از الگوریتم سبال، متوسط میزان تبخیر و تعرق گیاه قهوه در پیکسل‌های تحت آبیاری برابر ۳/۹۵ میلی‌متر بر روز با انحراف معیار ۰/۷۸ به دست آمد. نتایج حاکی از تأمین یکنواخت آب توسط سیستم آبیاری موجود در منطقه بود (۱۹). یکی دیگر از اهداف مطالعات اخیر، تلاش در راستای خودکارسازی فرآیند انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم از اراضی کشاورزی با استفاده از تبدیل معیارهای انتخاب پیکسل‌های مذکور به زبان کامپیوتر بوده است. جهت کاهش دخالت کاربر در فرآیند اجرای مدل سبال و متریک در سال ۲۰۱۷ میلادی، فرآیندی جهت خودکارسازی انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم در الگوریتم سبال و متریک در دو ایالات آمریکا مجهز به برج‌های اندازه‌گیری شار گرمای اددی، بر روی ۱۳۴ تصویر لندست استفاده گردید که نتایج مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق روزانه نشان داد، دقت مدل سبال و متریک با معیار جزر میانگین مربعات خطابه ترتیب برابر با ۰/۲۳ و ۰/۳۵ میلی‌متر بر روز است (۱۶). در همین راستا و در سال ۲۰۲۰ میلادی، طی مطالعه‌ای در کشور لبنان با استفاده از نسخه خودکار الگوریتم سبال و تعداد ۸ تصویر لندست در یک دوره کشت، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در طول فصل کشت با جزر میانگین مربعات خطا ۲۱/۳۲ میلی‌متر و ضریب همبستگی ۸۸/۴ محاسبه گردید (۳۵). اخیراً توسعه تکنیک‌های سنجش از دور توانسته است با برآورد سری زمانی تبخیر و تعرق، تغییرات این پارامتر را به‌عنوان ورودی معادله بیلان آب زیرزمینی جهت تخمین میزان کاهش در سطح آب‌های زیرزمینی وارد کند که در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۰ میلادی در حوزه آبریز در کشور لبنان مشخص گردید که این حوزه سالانه حدود ۳۳۰ میلی‌متر کاهش در سطح آب‌های زیرزمینی خود را شاهد بوده است (۲۹). تفکیک مقدار مصرف از منابع آب ذخیره‌شده باران در ناحیه ریشه که به‌عنوان منابع آب سبز شناخته می‌شود از اهمیت بسیاری برخوردار است (۲۷) و از آنجایی که منابع آب سبز در کشاورزی صرف تبخیر و تعرق

۱). ترکیب رنگی باندهای مادون قرمز، قرمز و آبی ماهواره لندست-۸ با اعمال تصحیحات هندسی و رادیومتری در شکل ۱ نشان می‌دهد که منطقه در حصار نواحی کوهستانی است و بخش کشاورزی عمدتاً واقع در نواحی مرکزی است. اقلیم غالب منطقه مورد مطالعه از نوع خشک و نیمه خشک است و طبق آخرین اطلاعات آماری منتشر شده در سال ۱۳۹۴ حاصل از نتایج تفصیلی سرشماری کشاورزی (۲) کشت زراعی غالب منطقه کشت گندم به وسعت ۳۳۸۳۹ هکتار شامل ۳۱۴۳۱ هکتار گندم دیم و ۲۴۰۸ هکتار گندم آبی است.

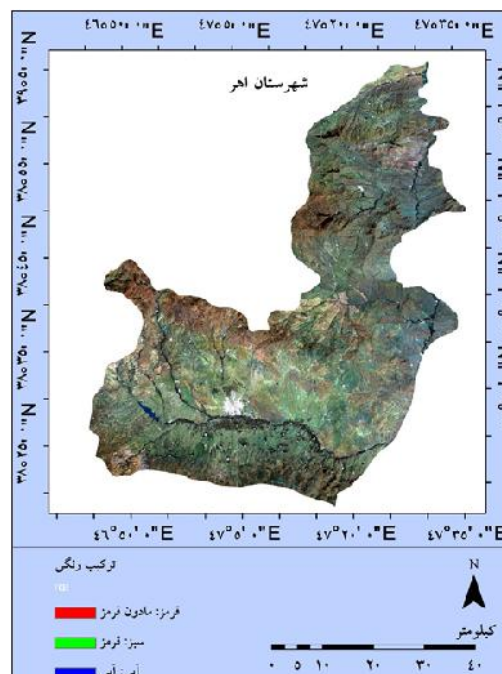


آبی به کمک عملیات آبیاری قابل توجه نیست، جهت مقایسه نتایج الگوریتم سبال در برآورد تبخیر و تعرق گندم آبی از نتایج روش فائو پنمن مانیتث بهره گرفته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده شهرستان اهر در شمال شرق استان آذربایجان شرقی است و در مختصات جغرافیایی $46^{\circ}43'$ تا $47^{\circ}37'$ طول شرقی $38^{\circ}19'$ تا $39^{\circ}06'$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه شامل شهرستان اهر واقع در استان آذربایجان شرقی. ترکیب رنگی تصویر ارائه شده برای شهرستان اهر، حاصل از باندهای مادون قرمز، قرمز و آبی ماهواره لندست-۸ مربوط به تاریخ ۵ تیرماه ۱۳۹۸ است.

شاخص گیاهی در میزان محصول نهایی گندم بسیار تعیین کننده است (۲۸). روز ژولیوسی عدد صحیحی است که نشانگر تعداد روزهای گذرانده شده از اولین روز سال در تقویم میلادی است. در این پژوهش ابتدا از اطلاعات هواشناسی و محصولات بازتاب سطحی و دمای سطح زمین سنجنده مودیس مربوط به سال ۱۳۸۹ شامل دوره آغاز خوشه رفتن، گلدهی و سپس طلایی شدن گندم جهت ارزیابی صحت

تقویم کشت گندم و دوره زمانی مورد مطالعه

طبق بررسی‌های صورت گرفته، گندم زمستانه در منطقه مورد در دهه اول مهر هر سال کاشت و در نیمه دوم خرداد سال آتی برداشت می‌گردد. مرحله خوشه رفتن تا طلایی شدن کامل گندم در منطقه مورد مطالعه حدوداً طی روزهای ۱۲۹ تا ۱۶۱ ژولیوسی اتفاق می‌افتد که در مقطعی از این دوره که میزان شاخص‌های گیاهی نزدیک به اوج خود است، بزرگی مقادیر

مقادیر بازتاب سطحی سنجنده مودیس می‌باشند برای محاسبه آبدو و شاخص‌های گیاهی و از محصول MOD11A2 شامل مقادیر دمای سطح زمین است، برای محاسبه شارهای گرمایی استفاده شد. محصولات سنجنده مودیس مورد استفاده جهت اجرای مدل سبال در این پژوهش، به شرح جدول ۱ است. این محصولات به صورت آماده و حاصل از اعمال تصحیحات مربوط به شرایط جوی بر روی تصاویر خام می‌باشند (۴۵). جهت اعمال سیستم مختصات جغرافیایی مورد نظر از محیط نرم‌افزار ENVI استفاده شد. همچنین جهت تهیه نقشه اراضی تحت کشت گندم و نیاز به رصد روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی در این اراضی، محصول بازتاب سطحی مودیس حاوی باند قرمز و مادون قرمز (MOD09Q1) در دوره زمانی طولانی‌تری استفاده گردید.

الگوریتم سبال در منطقه مورد مطالعه، استفاده شد. پس از ارزیابی نتایج الگوریتم، با استفاده از محصولات جدید سنجنده مودیس در سال ۱۳۹۸ و الگوریتم سبال، حداکثر مقدار تبخیر و تعرق گندم دیم در سال مذکور در مقطعی حساس که مصادف با زمان اوج شاخص گیاهی است، برآورد گردید. جهت محاسبه سهم گیاه گندم دیم از منابع آب سبز، میزان تبخیر و تعرق گندم در این مقطع، یعنی مابین مرحله خوشه رفتن تا گل‌دهی گندم در وسعت اراضی تحت کشت آن ضرب شد. طبق الگوریتم ارائه شده برای مدل سبال، از باندهای مرئی سنجنده‌ها جهت برآورد آبدو و شاخص‌های گیاهی و از باندهای دمایی آن‌ها به همراه شاخص‌های گیاهی محاسبه شده، جهت برآورد شارهای گرمایی استفاده می‌شود (۱۵). در این پژوهش نیز از محصولات MOD09Q1 و MOD09A1 که

جدول ۱. محصولات سنجنده مودیس مورد استفاده جهت رصد روند تغییرات میزان سبزی‌نگی گندم و نیز اجرای مدل سبال

نام محصول	تاریخ ژئولوسی تصاویر اخذ شده
محصولات ۸ روزه بازتاب سطحی، دما و گسیلمندی سنجنده مودیس، اصلاح شده برای شرایط اتمسفری:	تصاویر سال ۱۳۸۹: ۸۱، ۸۹، ۹۷، ۱۰۵، ۱۲۱، ۱۲۹، ۱۳۷، ۱۴۵، ۱۶۱، ۱۵۳، ۱۶۹، ۱۷۷، ۱۹۳، ۲۰۱، ۲۰۹، ۲۱۷، ۲۲۵، ۲۳۳، ۲۴۱، ۲۴۹، ۲۵۷ و ۲۶۵
-MOD09Q1: MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250 m SIN Grid V006	تصویر سال ۱۳۹۸: ۱۳۷
-MOD09A1: MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m SIN Grid V006	تصاویر سال ۱۳۸۹: ۱۲۹، ۱۳۷، ۱۴۵، ۱۵۳ و ۱۶۱
-MOD11A2: MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1 km SIN Grid V006	تصویر سال ۱۳۹۸: ۱۳۷

تبخیر و تعرق مرجع، گیاهی و واقعی

تبخیر و تعرق گیاهی (ET_c) میزان تبخیر و تعرقی است که توسط یک‌گونه گیاهی خاص که در پژوهش حاضر گیاه گندم است، تحت شرایط استاندارد و بهینه از نظر نمایه‌های مدیریتی آب‌و خاک انجام شده باشد (۴۲). در این شرایط تبخیر و تعرق گیاه گندم (ET_c) طبق رابطه ۱، پس از برآورد مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) به روش فائو پنمن مانیتث، از

ضرب مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) در ضرایب گیاهی (K_c) ارائه شده در دوره‌های مختلف رشد گندم، محاسبه گردید (۱۰، ۲۱ و ۲۵).

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad [1]$$

محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) با رابطه فائو پنمن مانیتث (FAO Penman-Monteith) نیاز به داده‌های تشعشع، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد دارد (۱۰). در

الگوریتم سبال مطابق فرآیند شکل ۲ و با حل معادله بیلان انرژی بر اساس رابطه ۲ محاسبه گردید (۱۳).

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad [2]$$

که در این رابطه، λET شار گرمای نهان، R_n تشعشع خالص، G شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس همگی برحسب وات بر مترمربع ($W.m^{-2}$) می‌باشند. مقادیر شار گرمای نهان بر اساس رابطه ۳ به مقادیر تبخیر و تعرق لحظه‌ای تبدیل شد (۳۴).

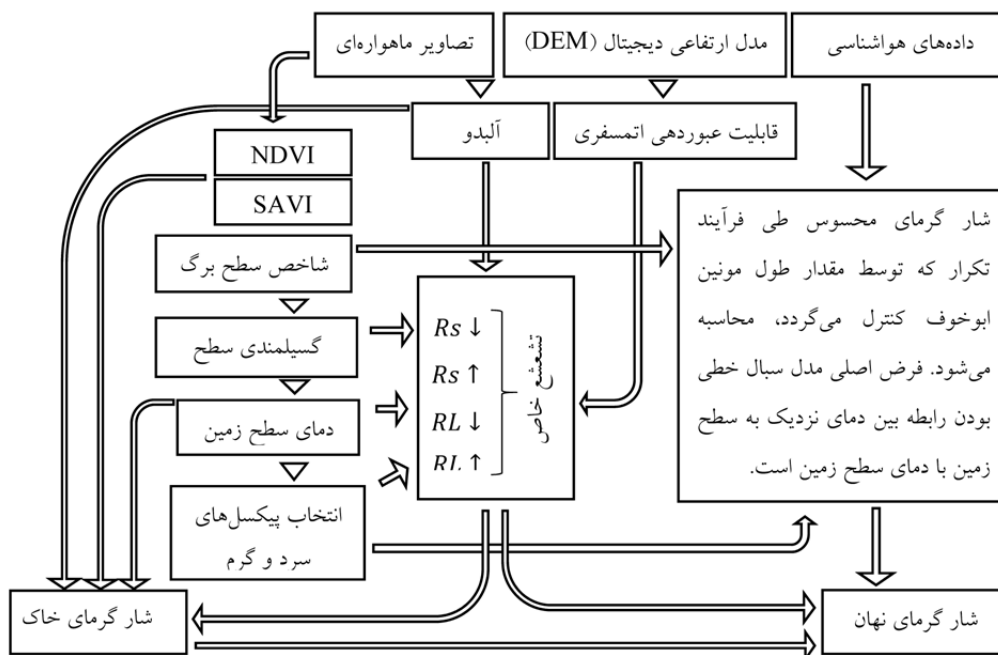
$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad [3]$$

که در این رابطه، ET_{inst} تبخیر و تعرق لحظه‌ای برحسب میلی‌متر بر ساعت ($mm.hr^{-1}$) و λ گرمای نهان تبخیر آب برحسب ژول بر کیلوگرم ($J.kg^{-1}$) است.

اقلیم خشک و نیمه‌خشک، تبخیر و تعرق گیاه گندم (ET_c) از طریق عملیات آبیاری تأمین می‌گردد. بنابراین در اراضی تحت کشت گندم آبی، عموماً برنامه‌ریزی آبیاری به‌گونه‌ای است که گیاه تحت تنش آبی قرار نگیرد که با این فرض، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گندم نزدیک به مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه‌شده برای گیاه گندم خواهد بود. لذا در اراضی تحت کشت گندم آبی، می‌توان مقادیر تبخیر و تعرق گیاه گندم را که از روش فائو پنمن ماتیت محاسبه گردیده است، با مقادیر به‌دست‌آمده از الگوریتم سبال برای تبخیر و تعرق واقعی گیاه گندم، مقایسه نمود. اما چنین مقایسه‌ای جهت ارزیابی صحت نتایج الگوریتم سبال در اراضی گندم دیم، به جهت تنش آبی وارده به سیستم کشت دیم قابل‌اطمینان نیست.

الگوریتم سبال

مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گیاه گندم (ET_a)، توسط



شکل ۲. فرآیند اجرای الگوریتم سبال (SEBAL)

در این رابطه؛ α آلبدوی سطح، $R_{s\downarrow}$ طول‌موج کوتاه ورودی، $R_{s\uparrow}$ طول‌موج بلند ورودی، $R_{L\downarrow}$ طول‌موج بلند خروجی و ϵ_0 گسیلمندی سطحی است. مقادیر آلبدو بر اساس

در فرآیند مذکور شار تشعشع خالص (R_n) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد (۴۳).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad [4]$$

در این رابطه؛ T_s دمای سطح برحسب C^0 است. مقادیر شار گرمای محسوس (H) از رابطه ۱۰ محاسبه شد (۱۳).

$$H = (\rho \times C_p \times dT) / r_{ah} \quad [10]$$

در این رابطه؛ ρ دانسیته هوا برحسب کیلوگرم بر مترمکعب (kg/cm^3)، C_p گرمای مخصوص هوا برابر ۱۰۰۴ برحسب ژول بر کیلوگرم بر درجه کلونین ($J/kg/K$)، dT اختلاف دما بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 و r_{ah} مقاومت ایرودینامیک در برابر انتقال گرما برحسب ثانیه بر متر (s/m) است. از آنجایی که برآورد دو پارامتر dT و r_{ah} در رابطه فوق مشکل است، بنابراین در مدل سبال از دو پیکسل سرد و گرم که در آن‌ها می‌توان تخمین اولیه قابل‌اعتمادی برای شار گرمای محسوس (H) پیش‌بینی کرد، استفاده می‌شود (۳۴).

روش اگلن-افهولدر

اراضی تحت کشت دیم واقع در اقلیم خشک و نیمه‌خشک معمولاً به دلیل الگوی نامنظم بارش و نیز مقادیر ناکافی آن تحت تنش آبی بوده و این تنش وارده موجب کاهش قابل‌توجه مقدار تبخیر و تعرق گیاه گندم (ET_c) گردد. در این شرایط مقایسه نتایج روش فائو پنمن مانتیث و الگوریتم سبال بدون در نظر گرفتن اثر تنش آبی وارده به مقادیر تبخیر و تعرق گیاه گندم (ET_c)، صحیح نیست. لذا در این پژوهش جهت محاسبه تبخیر و تعرق واقعی گیاه گندم (ET_a) در شرایط تنش آبی وارده تحت کشت دیم، از روش اگلن-افهولدر که نتایج آن قبلاً در شمال شرق ایران برای گندم دیم مورد تأیید قرار گرفته است (۳۶)، به شرح رابطه ۱۱ استفاده شد (۷ و ۲۲).

$$ET_a = 0.732 - 0.05ET_c + (4.97ET_c - 0.661ET_c^2) \times MR - (8.57ET_c - 1.56ET_c^2) \times MR^2 + (4.35ET_c - 0.88ET_c^2) \times MR^3 \quad [11]$$

در این رابطه؛ ET_c تبخیر و تعرق گیاه گندم بوده که از رابطه فائو پنمن مانتیث برآورد می‌گردد. MR نسبت رطوبت بوده و نشان‌دهنده میزان در دسترس بودن آب در عمقی از خاک است که بستری برای رشد ریشه‌های گیاه است. نسبت

رابطه ۵ محاسبه گردید (۱۱).

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path-radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad [5]$$

در این رابطه؛ α_{toa} آلبدوی بالای اتمسفر و $\alpha_{path-radiance}$ متوسط سهم تشعشع خورشیدی ورودی در تمام باندها است که قبل از آن‌که به زمین برسد به سمت سنجنده پراکنده می‌شود. τ_{sw} قابلیت عبوردهی تشعشع در اتمسفر است و به‌صورت خطی با کدهای ارتفاعی موجود بر روی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در ارتباط است. مقادیر تشعشع ورودی طول‌موج کوتاه (R_{sl}) از رابطه ۶ محاسبه گردید.

$$R_{sl} = G_{sc} \times \cos \theta \times d_f \times \tau_{sw} \quad [6]$$

در این رابطه، G_{sc} ثابت خورشیدی برابر ۱۳۶۷ برحسب وات بر مترمربع ($W.m^{-2}$)، $\cos \theta$ کسینوس زاویه تابش خورشیدی و d_f مربع معکوس فاصله نسبی زمین به خورشید است. مقادیر تشعشع ورودی طول‌موج بلند (R_{ll}) از رابطه ۷ محاسبه شد (۱۱).

$$R_{ll} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad [7]$$

در این رابطه، ε_a گسیلمندی اتمسفری، σ ثابت استفان بولتزمن برابر $5/67 \times 10^{-8}$ برحسب وات بر مترمربع بر درجه کلونین به توان چهار ($w/m^2/K^4$) است و T_a دمای هوای نزدیک به سطح زمین برحسب درجه کلونین (K) است. مقادیر تشعشع خروجی طول‌موج بلند ($R_{l\uparrow}$) بر اساس ۸ محاسبه گردید (۱۱).

$$R_{l\uparrow} = \varepsilon_o \times \sigma \times \tau_s^4 \quad [8]$$

در این رابطه؛ ε_o گسیلمندی سطحی و T_s دمای سطح برحسب درجه کلونین (K) است. مقادیر شار گرمای خاک از رابطه ۹ محاسبه گردید.

$$G/R_n = T_s/\alpha \times (0.0038\alpha + 0.00774\alpha^2) \times (1 - 0.98NDVI^4) \quad [9]$$

نقشه اصلاح شده خاک فائو با استفاده از ضوابط موجود در مثلث بافت خاک (۴۱) در محیط نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی بر اساس درصد شن، سیلت و رس اختصاص یافته به هر نقطه از آن طبقه بندی گردید. مقادیر متناظر حداکثر ظرفیت نگهداری آب (AWC) برای بافت های مختلف با استفاده از نرم افزار SPAW ارائه شده توسط دپارتمان کشاورزی ایالات متحده تعیین شد.

نقشه اراضی گندم دیم و آبی

جهت برآورد مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گیاه گندم (ET_a) به روش سبال و همچنین به روش آگلن-افهولدر در پیکسل های گندم، نیاز به نقشه اراضی گندم دیم و آبی است. در تهیه نقشه مذکور از روند تغییرات زمانی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده (NDVI) برای گندم دیم و گندم آبی استفاده گردید. شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده برای تصاویر مودیس از رابطه ۱۳ محاسبه شد (۳۳).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad [13]$$

در این رابطه؛ ρ_R بازتابندگی ثبت شده در باند سرخ و ρ_{NIR} بازتابندگی ثبت شده در باند نزدیک فروسرخ است. جهت تولید سری زمانی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده گندم دیم و گندم آبی، مقادیر محاسبه شده این شاخص در هر تصویر برای پیکسل های نظارت شده گندم دیم و آبی میانگین گیری شد. از ترسیم مقادیر میانگین گیری شده حاصل از هر تصویر مودیس در مقابل محور زمان، سری زمانی شاخص مذکور برای گندم دیم و آبی تهیه شد. اطلاعات مربوط به مختصات جغرافیایی نواحی نظارت شده گندم با استفاده از دستگاه GPS در سال ۱۳۸۹ در ۱۱ قطعه با متوسط مساحت ۲۰ هکتار برداشت گردیده بود. در نهایت با استفاده از تطابق سری زمانی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده هر پیکسل با سری زمانی میانگین گیری شده، پیکسل های گندم در سایر نقاط در منطقه مورد مطالعه، شناسایی شد. جهت ارزیابی صحت نقشه پهنه بندی گندم مقادیر شاخص کاپا و مقدار صحت کلی به

رطوبت از رابطه ۱۲ محاسبه می گردد و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است (۳۷).

$$MR = R/AWC \quad [12]$$

در این رابطه؛ AWC حداکثر ظرفیت نگهداری آب در خاک در ناحیه رشد ریشه و R بارش مؤثر در گام های زمانی مورد مطالعه است. زمانی که مقدار بارش مؤثر (R) از میزان حداکثر ظرفیت نگهداری آب تجاوز نماید، نسبت رطوبت (MR) برابر یک خواهد بود. اجرای روش آگلن-افهولدر به نحوی که بتوان توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی گیاه گندم (ET_a) را به دست آورد، نیاز به تهیه نقشه خاک منطقه مورد مطالعه دارد. از نقشه خصوصیات خاک منطقه، مقادیر حداکثر ظرفیت نگهداری آب برای هر پیکسل گندم دیم قرائت گردید و با استفاده از آمار بارندگی روزانه، نسبت رطوبت در هر پیکسل گندم دیم محاسبه شد. در نهایت با استفاده از رابطه ۱۱ مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گیاه گندم در هر پیکسل مربوط به سیستم کشت دیم محاسبه شد.

نقشه خاک

جهت تولید نقشه خاک منطقه مورد مطالعه، ابتدا نقشه خاک فائو (FAO) برای محدوده منطقه مورد مطالعه برش داده شد و سپس با استفاده از اطلاعات مربوط بافت که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز اندازه گیری شده بود، تدقیق گردید. اطلاعات مذکور شامل مقادیر درصد شن، رس و سیلت حاصل از تعداد ۵۸ پروفیل حفر شده به عمق متوسط ۱۲۰ سانتی متر در شبکه ای متمرکز بر قطب اصلی کشاورزی شهرستان اهر (مناطق مرکزی) است. اطلاعات اندازه گیری شده به همراه اطلاعات موجود از بافت خاک در نقشه خاک فائو وارد نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) گردید و با استفاده از تکنیک درون یابی نزدیک ترین همسایه نقشه دقیق تری از درصد شن، رس و سیلت برای منطقه مورد مطالعه تولید شد. سپس جهت مشخص نمودن پهنه های مربوط به انواع بافت خاک در منطقه مورد مطالعه،

در معادله فائو پنمن مانیتیت محاسبه گردیده است. در این پژوهش مقادیر تبخیر و تعرق اراضی گندم از محصول MOD09A1 استخراج و با مقادیر حاصل از مدل سبال مقایسه گردید.

نتایج

شکل ۳ نشان‌دهنده نقشه بافت خاک و نقشه حداکثر ظرفیت نگهداری آب (AWC) حاصل از بهبود نقشه خاک فائو با استفاده از اطلاعات ۵۸ پروفیل حفر شده در منطقه مورد مطالعه است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است مقادیر حداکثر ظرفیت نگهداری آب در خاک منطقه مورد مطالعه بین ۰/۰۸۸ تا ۰/۱۷۵ سانتی‌متر بر سانتی‌متر متغیر است و در میان ۶ کلاس خاک موجود در منطقه، محدوده بافت لوم رسی نسبت به سایر بافت‌ها از وسعت بیشتری برخوردار است.

ترتیب بر اساس رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ محاسبه گردید (۱۸).

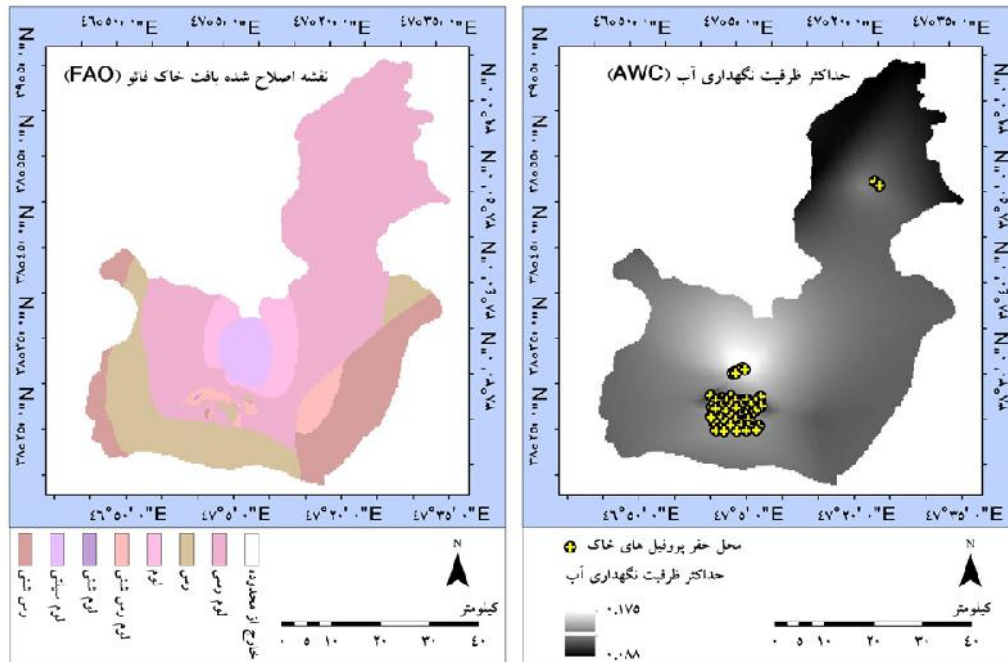
$$OA = \frac{\sum X_{ii}}{N} \quad [14]$$

$$\hat{R} = \frac{N \sum_{i=1}^I X_{ii} - \sum_{i=1}^I (X_{i+} * X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^I (X_{i+} * X_{+i})} \quad [15]$$

در این رابطه؛ OA صحت کلی، X_{ii} مجموع اعضای قطر اصلی ماتریس خطا، N کل پیکسل‌های نظارت‌شده، \hat{R} شاخص کاپا، X_{i+} مجموع سطر i ام و X_{+i} مجموع ستون i ام ماتریس خطا می‌باشند.

محصول تبخیر و تعرق سنجنده مودیس

محصول MOD09A1 سنجنده مودیس، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی را در سطح جهانی و با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متری و قدرت تفکیک زمانی ۸ روزه ارائه می‌دهد. مقادیر تبخیر و تعرق برای هر پیکسل در این محصول از واردکردن مقادیر شاخص‌های گیاهی و آلبدو حاصل از تصاویر مودیس



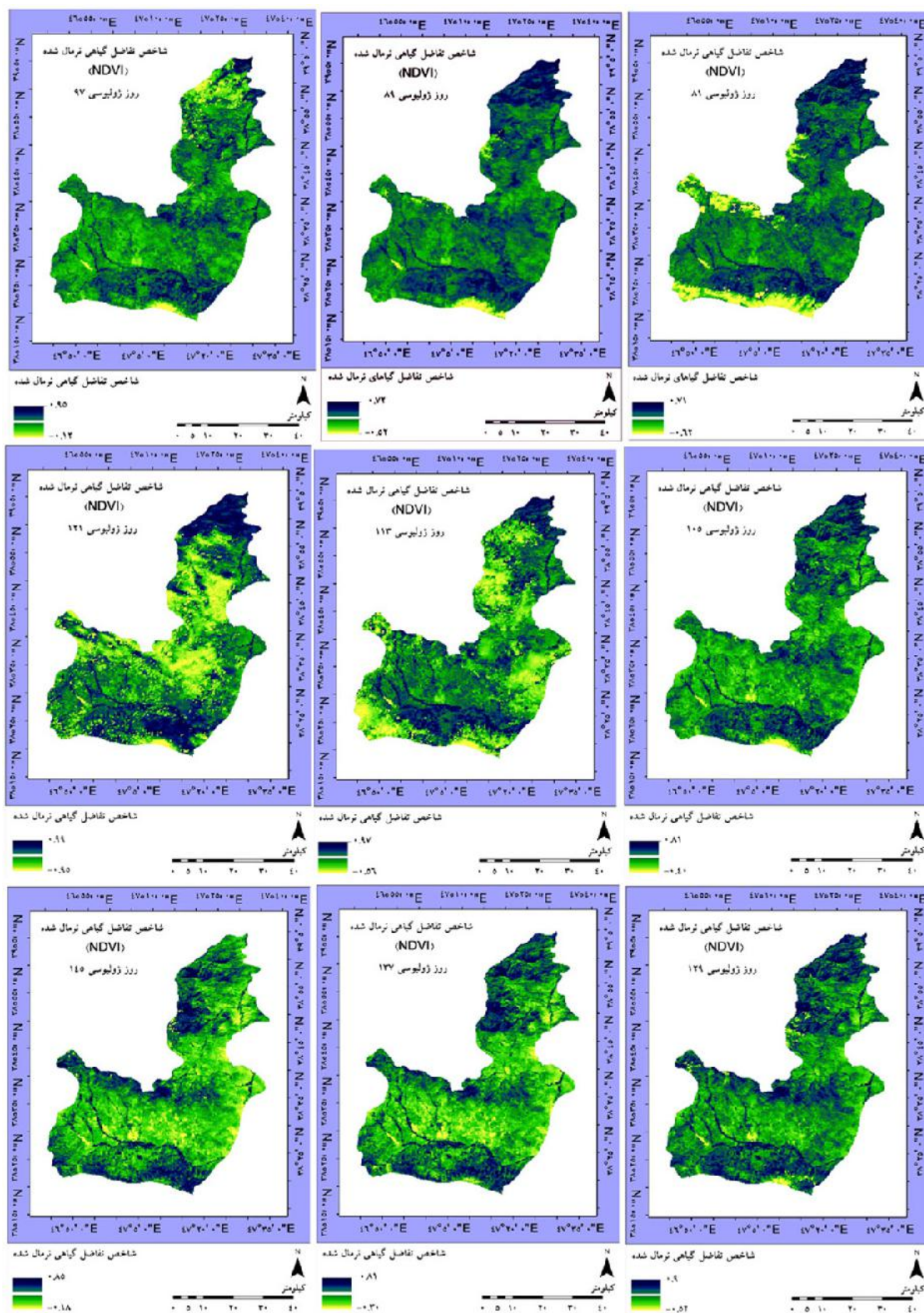
شکل ۳. پهنه‌بندی شش کلاس بافت خاک و نقشه حداکثر ظرفیت نگهداری آب در خاک منطقه مورد مطالعه حاصل از اصلاح نقشه خاک فائو با استفاده از اطلاعات تعداد ۵۸ پروفیل حفر شده در مناطق مرکزی شهرستان اهر

است. با انجام آزمون وخطا مشخص گردید که اگر اختلاف شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده یک پیکسل در هر گام زمانی با مقدار میانگین گیری شده برای آن شاخص در اراضی نظارت شده گندم کمتر از ۱۵ درصد باشد، می تواند به عنوان پیکسل گندم منظور گردد. مقادیر صحت کلی و شاخص کاپا برای روش استفاده شده در پهنه بندی اراضی گندم به ترتیب برابر با ۸۱٪ و ۶۸٪ به دست آمد که حاکی از دقت قابل قبول آن است. همچنین سطح اراضی کشت گندم و آبی در منطقه مورد مطالعه برابر با ۳۳۵۰۰ و ۳۵۵۶ هکتار به دست آمد که با آمار حاصل از سرشماری کشاورزی شهرستان اهر به خصوص برای گندم دیم مطابقت دارد (۲).

همان طور که در شکل ۵ مشخص است نقطه اوج منحنی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده گندم در روز ۱۳۷ ژولایوسی اتفاق افتاده است که مصادف با پس از دوره خوشه روی و قبل از مرحله گل دهی گیاه گندم در منطقه مورد مطالعه است. مقدار شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده گندم در این مرحله برای گندم دیم حدود ۰/۲ کمتر از گندم آبی است. سری زمانی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده در شکل ۵ نشان می دهد که در مزارع گندم پس از برداشت محصول، مقدار این شاخص به عدد ثابتی حدود ۰/۱۵ رسیده است.

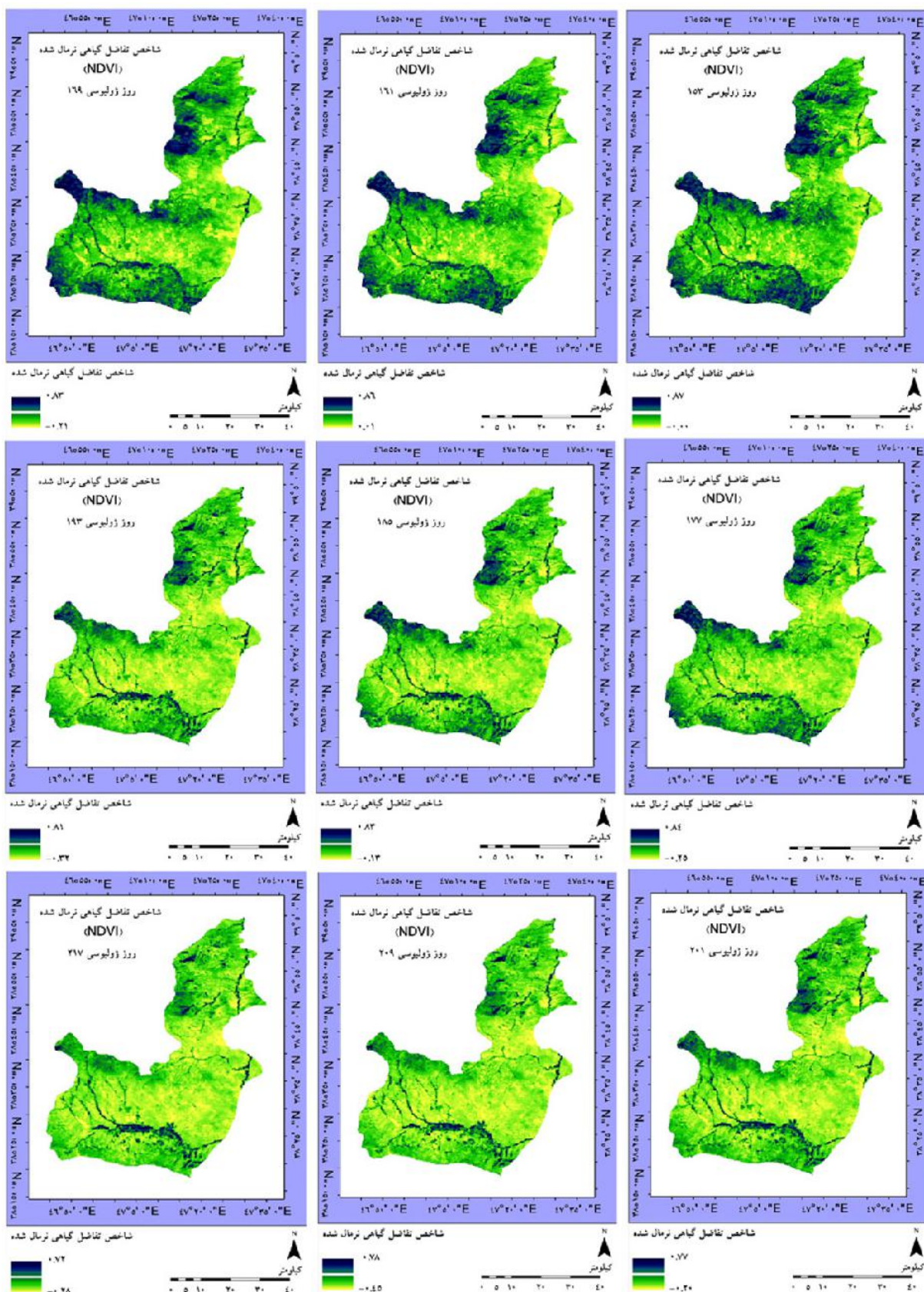
شکل ۴ نشان دهنده تغییرات شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده (NDVI) در شهرستان اهر از روز ۸۱ تا ۲۶۵ ژولایوسی در سال ۱۳۸۹ حاصل از باندهای قرمز و مادون قرمز محصول بازتاب سطحی مودیس (MOD09Q1)، است که شامل دوره پنجه زنی تا برداشت گندم و چند ماه پس از مرحله برداشت است.

همان طور که در شکل ۴ مشخص است به طور کلی در سطح منطقه مورد مطالعه مقادیر شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده در فصل بهار (۱۲ تصویر اول) است، بیشتر از فصل تابستان (۱۲ تصویر دوم) است. همان طور که از شکل ۴ مشخص است، مقادیر شاخص مذکور در مناطق حاشیه ای شامل نواحی کوهستانی با پوشش جنگلی و در رگه هایی از مناطق مرکزی شامل باغات کشاورزی در دوره مورد مطالعه همواره بیشتر از سایر نواحی بوده است. شکل ۵ نشان دهنده سری زمانی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده حاصل از میانگین گیری مقادیر شاخص مذکور برای پیکسل های نظارت شده گندم در شهرستان اهر است که در نهایت منجر به تولید نقشه تحت کشت اراضی گندم دیم و آبی با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متری گردید که این عدد برابر با رزولوشن باندهای قرمز و مادون قرمز محصول بازتاب سطحی مودیس



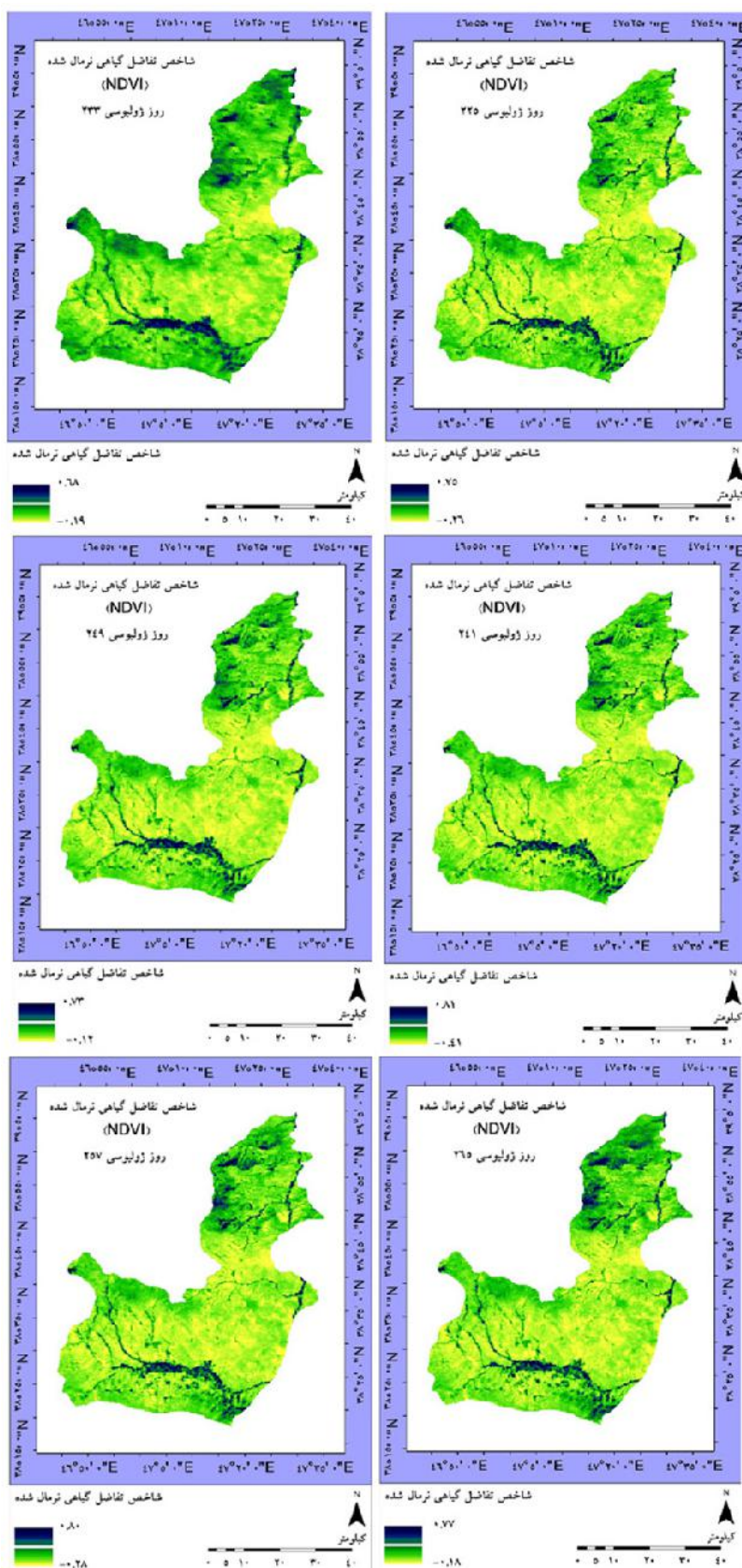
شکل ۴. تغییرات مکانی و زمانی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده (NDVI) در شهرستان اهر حاصل از باندهای قرمز و مادون قرمز

سنجده مودیس از روز ۸۱ تا ۲۶۵ ژولوسی در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹



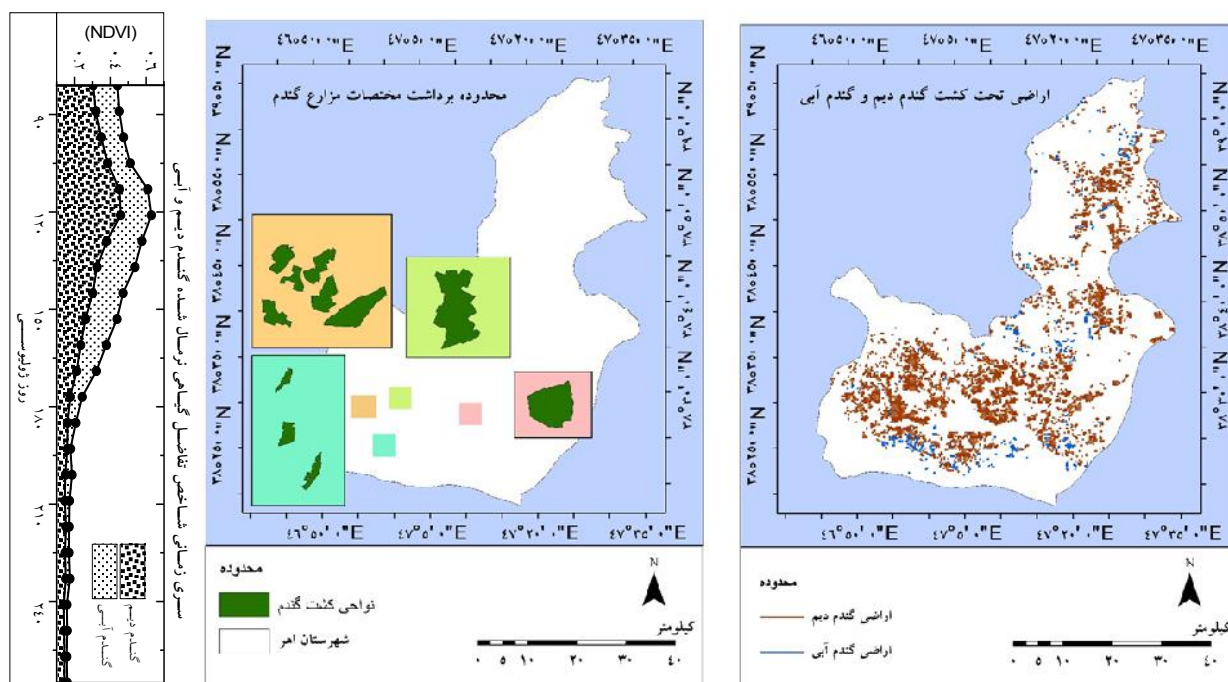
ادامه شکل ۴. تغییرات مکانی و زمانی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده (NDVI) در شه رستان اهر حاصل از باندهای قرمز و

مادون قرمز سنجنده مودیس از روز ۸۱ تا ۲۶۵ ژولایوسی در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹



ادامه شکل ۴. تغییرات مکانی و زمانی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده (NDVI) در شهرستان اهر حاصل از باندهای قرمز و

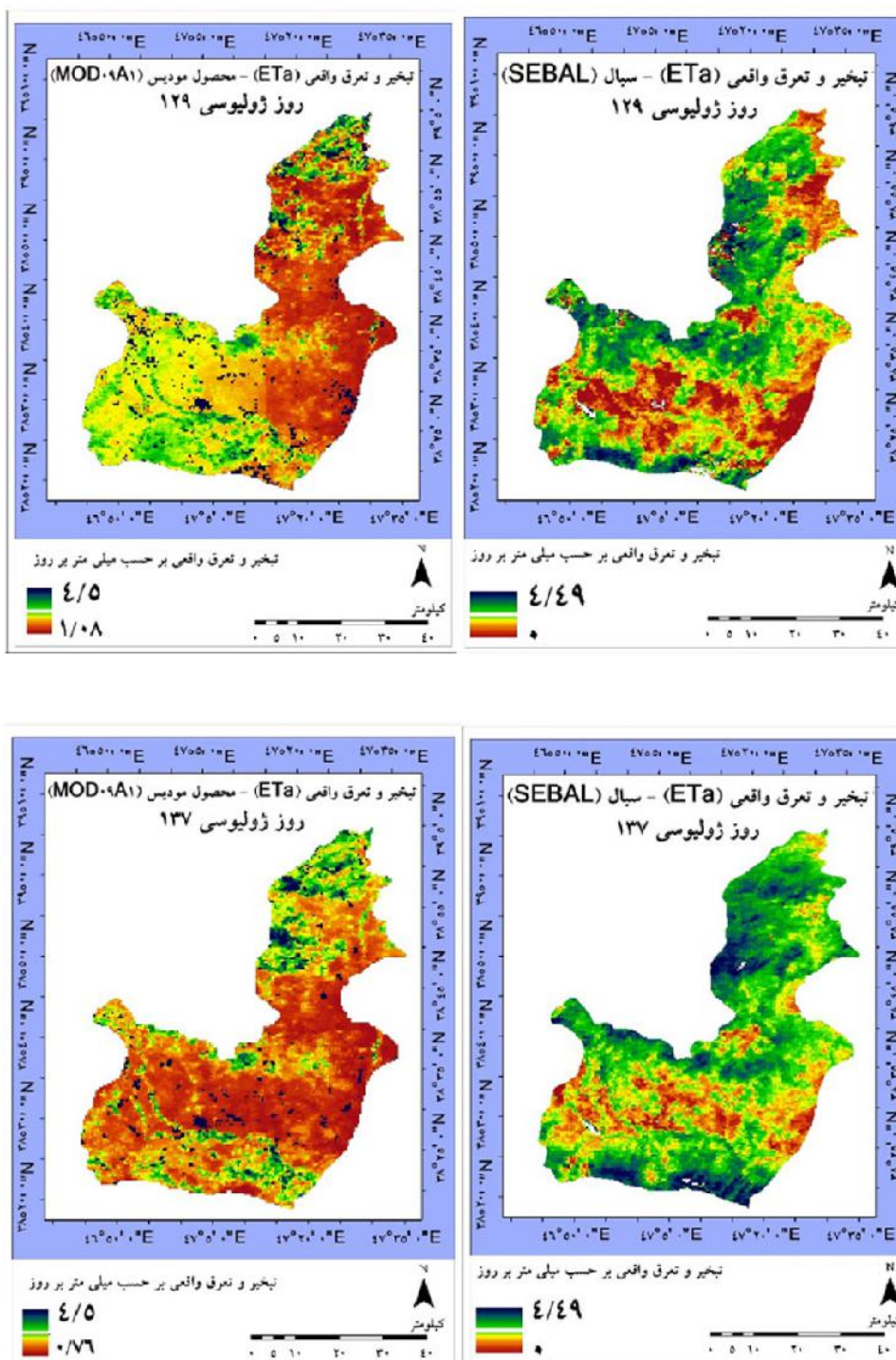
مادون قرمز سنجنده مودیس از روز ۸۱ تا ۲۶۵ ژوئیه در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹



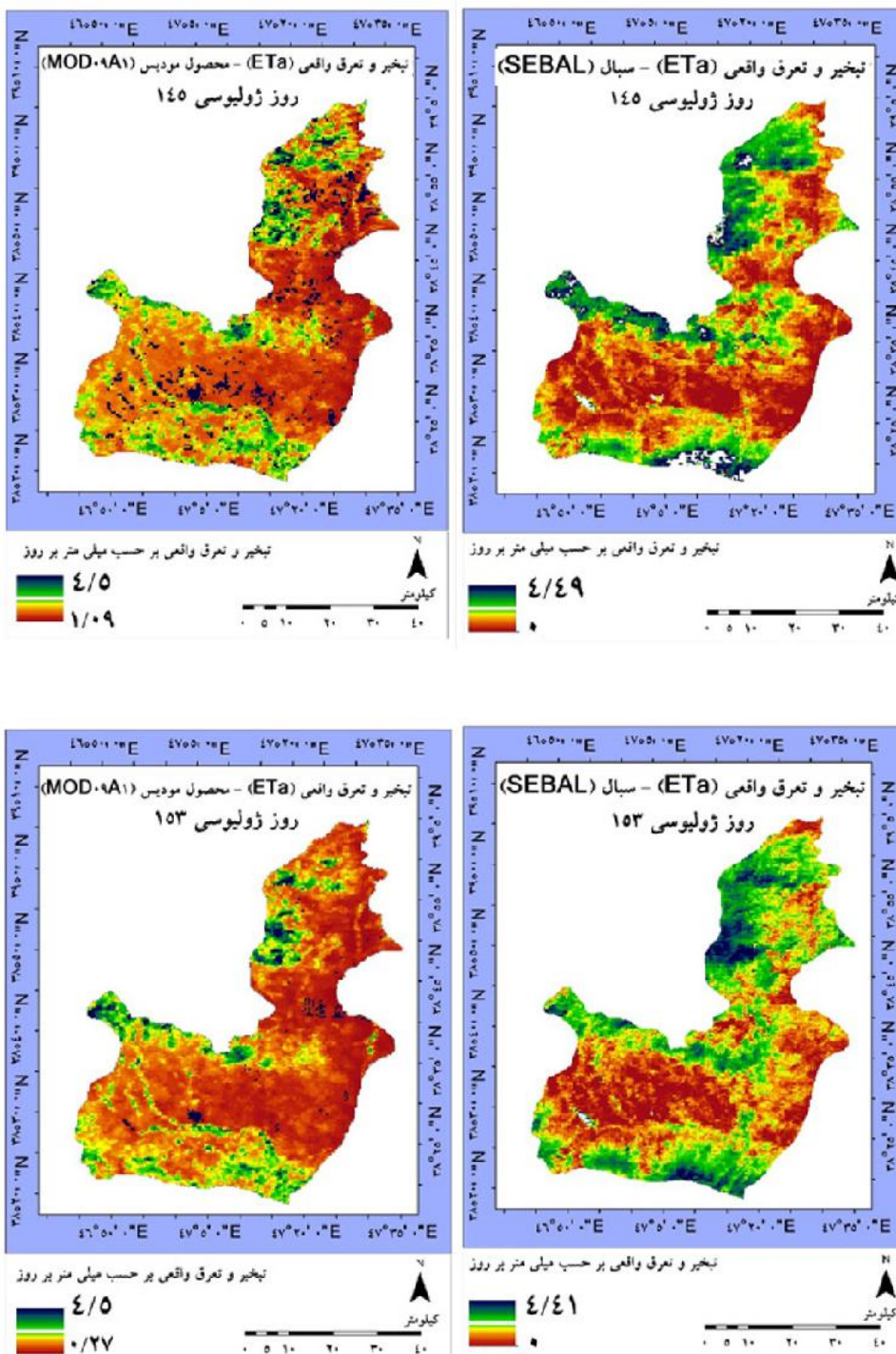
شکل ۵. پیکسل‌های نظارت شده توسط دستگاه GPS از سطح مزارع گندم در شهرستان اهر و سری زمانی شاخص تفاضل گیاهی (NDVI) شده گندم دیم و آبی حاصل از آن‌ها به همراه نقشه نهایی تولید شده از اراضی تحت کشت گندم دیم و آبی با استفاده از باندهای قرمز و مادون قرمز سنجنده مودیس در سال ۱۳۸۹

سبال و محصول MOD16A2 نشان داد که مقادیر تبخیر و تعرق در طول دوره زمانی مطالعه شده در مناطق کوهستانی با پوشش جنگلی واقع در حاشیه محدوده شهرستان بیشتر از سایر نواحی است. عمده اختلاف مشهود در نقشه‌های مذکور مربوط به تاریخ روز ژوئیه ۱۳۷ است که در این تاریخ، مقادیر تبخیر و تعرق تخمین زده شده توسط الگوریتم سبال به طور میانگین به میزان ۱/۲۸ میلی‌متر بر روز بیشتر از میانگین به دست آمده از محصول MOD16A2 مودیس است.

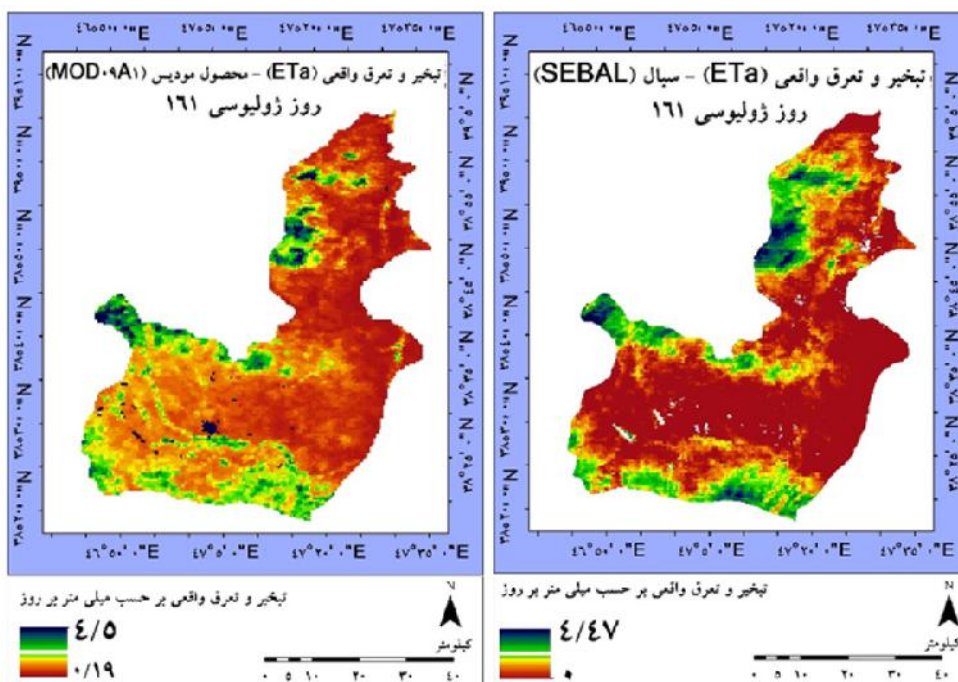
شکل ۶ نشان‌دهنده نقشه‌های تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) در سطح شهرستان اهر حاصل از الگوریتم سبال و محصول MOD16A2 مودیس در یک دوره زمانی ۳۲ روزه از روز ژوئیه ۱۲۹ تا روز ۱۶۱ (۱۹ اردیبهشت تا ۲۰ خرداد) در سال ۱۳۸۹ است که این دوره زمانی مراحل خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم را در منطقه مورد مطالعه تحت پوشش قرار می‌دهد. نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم



شکل ۶. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی (ETa) در سطح شهرستان اهر حاصل از الگوریتم سبال و محصول MOD16A2 مودیس از روز ۱۲۹ ژوئیه‌سی تا روز ۱۶۱ (دوره خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم) و در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹



ادامه شکل ۶. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی (ETa) در سطح شهرستان اهر حاصل از الگوریتم سبال و محصول MOD16A2 مودیس از روز ۱۲۹ تا روز ۱۶۱ (دوره خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم) و در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹



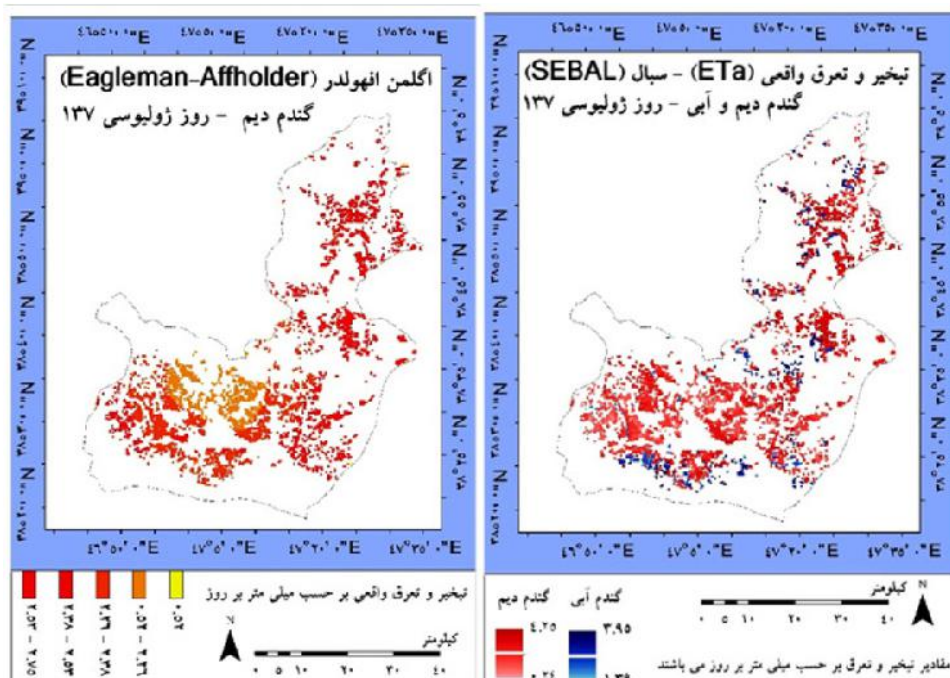
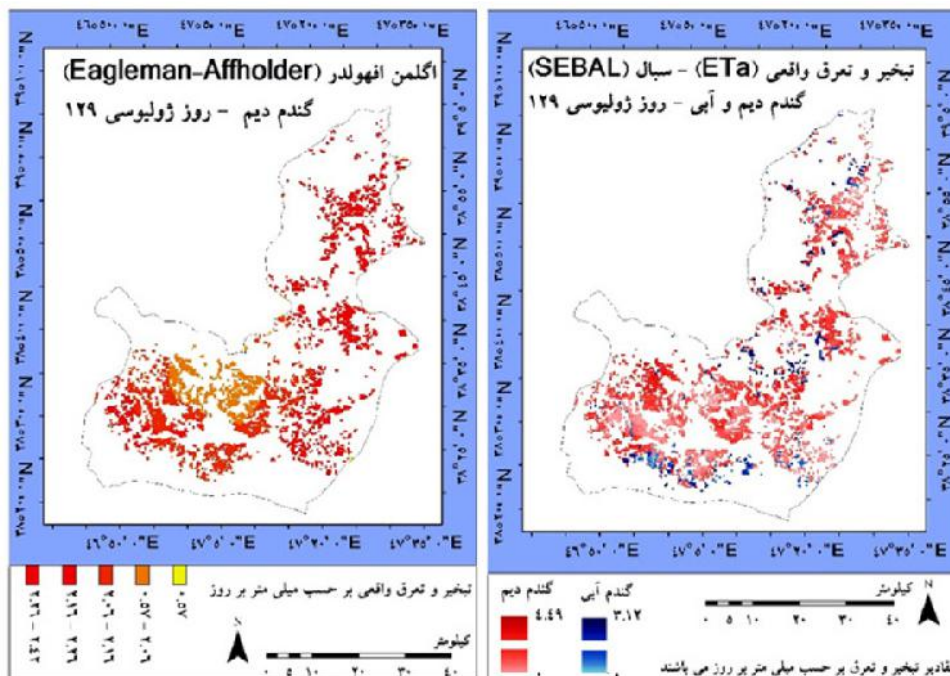
ادامه شکل ۶. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) در سطح شهرستان اهر حاصل از الگوریتم سبال و محصول MOD16A2 مودیس از روز ۱۲۹ ژوئیه ۱۳۸۹ تا روز ۱۶ ژوئیه ۱۳۸۹ (دوره خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم) و در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹

مقادیر میانگین تبخیر و تعرق واقعی در اراضی گندم دیم و آبی ارائه شده در نمودار شکل ۸ نشان می‌دهد که روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم و گندم آبی حاصل از الگوریتم سبال در مقایسه با روند مذکور به دست آمده از محصول MOD16A2، تشابه بیشتری با روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم حاصل از روش آگلن-افهولدر و روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی گندم آبی حاصل از روش فائو پنمن مانیتث دارد. با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۸، تشابه نتایج الگوریتم سبال با نتایج روش فائو پنمن مانیتث در صورت مقایسه این دو روش در ده درصد مزارع گندم آبی با بیشترین مقدار تبخیر و تعرق واقعی افزایش قابل توجهی یافته است. چنین مقایسه‌ای نسبت به مقایسه مقادیر میانگین تبخیر و تعرق در تمامی مزارع گندم آبی منطقی‌تر است چراکه مقادیر ارائه شده توسط روش فائو پنمن مانیتث، برای شرایط عدم وجود تنش‌های محدودکننده مقدار تبخیر و تعرق است که وقوع چنین شرایطی در ده درصد مزارع گندم آبی با بیشترین مقدار تبخیر و تعرق واقعی محتمل‌تر است. همان‌طور که در

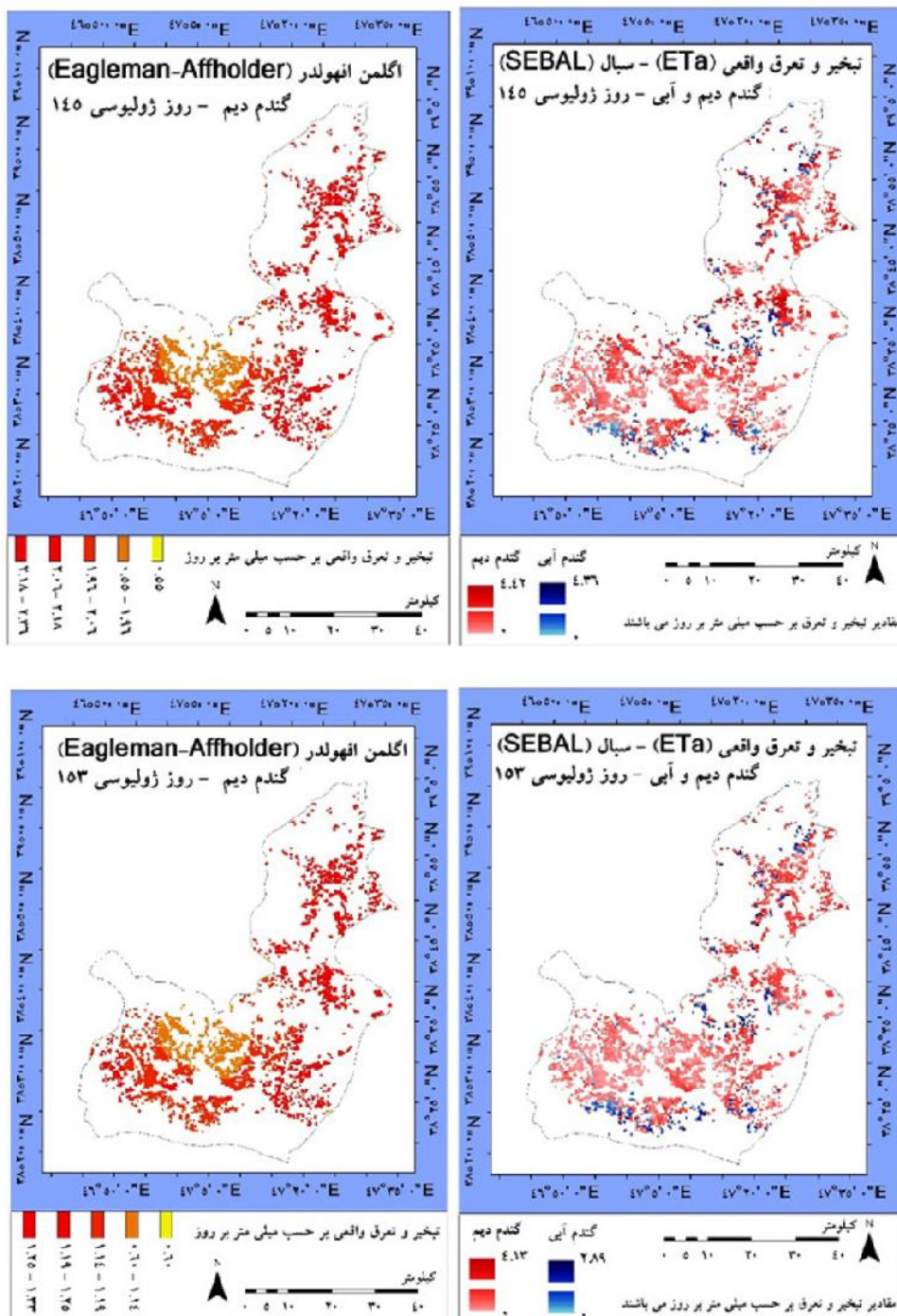
شکل ۷ نشان‌دهنده نقشه‌های توزیع مکانی و زمانی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در اراضی گندم دیم و آبی حاصل از الگوریتم سبال به همراه نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی در اراضی گندم دیم حاصل از روش آگلن-افهولدر در دوره زمانی روزهای ژوئیه ۱۲۹ تا ۱۶۱ مقارن با مراحل خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم در سال ۱۳۸۹ است. روند تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در اراضی گندم دیم و گندم آبی حاصل از الگوریتم سبال و اراضی گندم دیم حاصل روش آگلن-افهولدر، نشان می‌دهد که این مقادیر در روز ژوئیه ۱۳۷ که مصادف با نقطه اوج منحنی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده است، نسبت به سایر روزها بیشتر است. لذا در مورد گندم دیم، این دوره حساس از نظر منابع آب سبز نیز حائز اهمیت است چراکه گندم در این مقطع به بیشترین میزان از منابع آب سبز جهت انجام فرآیند تبخیر و تعرق نیازمند است. بازه تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم در نقشه‌های حاصل از الگوریتم سبال بیشتر از بازه تغییرات در نقشه‌های حاصل روش آگلن-افهولدر است.

مقادیر حاصل از روش‌های محاسباتی آگلن-افهولدر و روش فائو پنمن مانیتث مقدار ضریب همبستگی ۰/۹ به دست آمد.

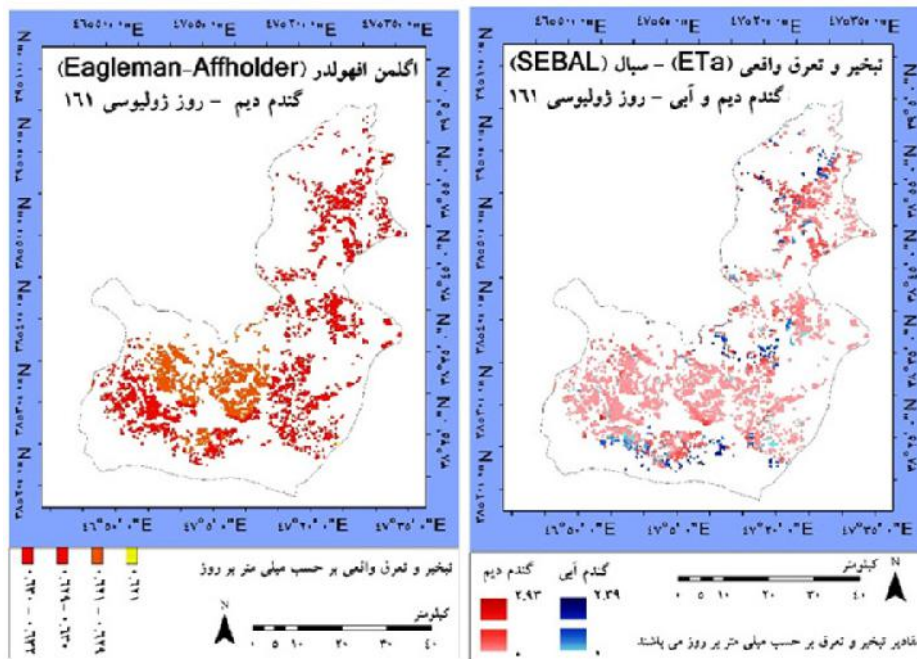
شکل ۹ نشان داده‌شده است، از ترسیم مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم و گندم آبی حاصل از الگوریتم سبال در مقابل



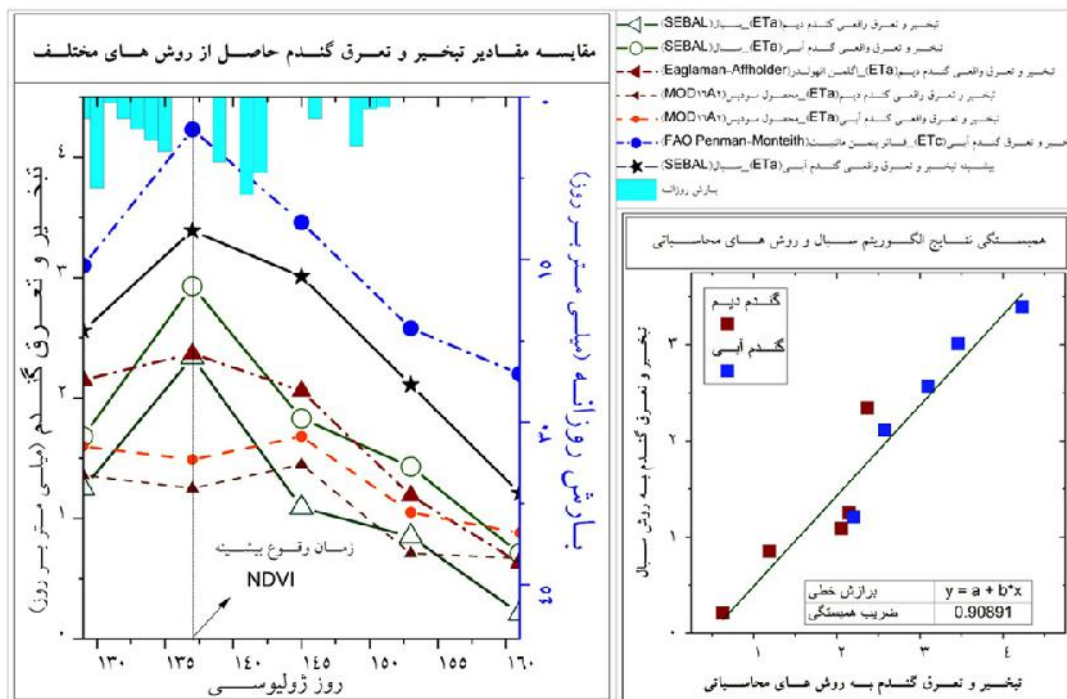
شکل ۷. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در سطح مزارع گندم دیم و گندم آبی شهرستان اهر حاصل از الگوریتم سبال و روش آگلن-افهولدر از روز ژوئیسوی ۱۲۹ تا روز ژوئیسوی ۱۶۱ (دوره خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم) و در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹



ادامه شکل ۷. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در سطح مزارع گندم دیم و گندم آبی شهرستان اهر حاصل از الگوریتم سیال و روش اگلن-افهولدر از روز ۱۲۹ تا روز ۱۶۱ (دوره خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم) و در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹



شکل ۷. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در سطح مزارع گندم دیم و گندم آبی شهرستان اهر حاصل از الگوریتم سبال و روش اگلنم-افهلدر از روز ژولیوسی ۱۲۹ تا روز ژولیوسی ۱۶۱ (دوره خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم) و در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹



شکل ۸. نمودارهای مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در اراضی گندم دیم و آبی حاصل نتایج الگوریتم سبال، محصول MOD16A2 مودیس و روش اگلنم-افهلدر در شهرستان اهر از روز ژولیوسی ۱۲۹ تا روز ژولیوسی ۱۶۱ (دوره خوشه رفتن تا طلایی شدن گندم) و در بازه‌های ۸ روزه در سال ۱۳۸۹

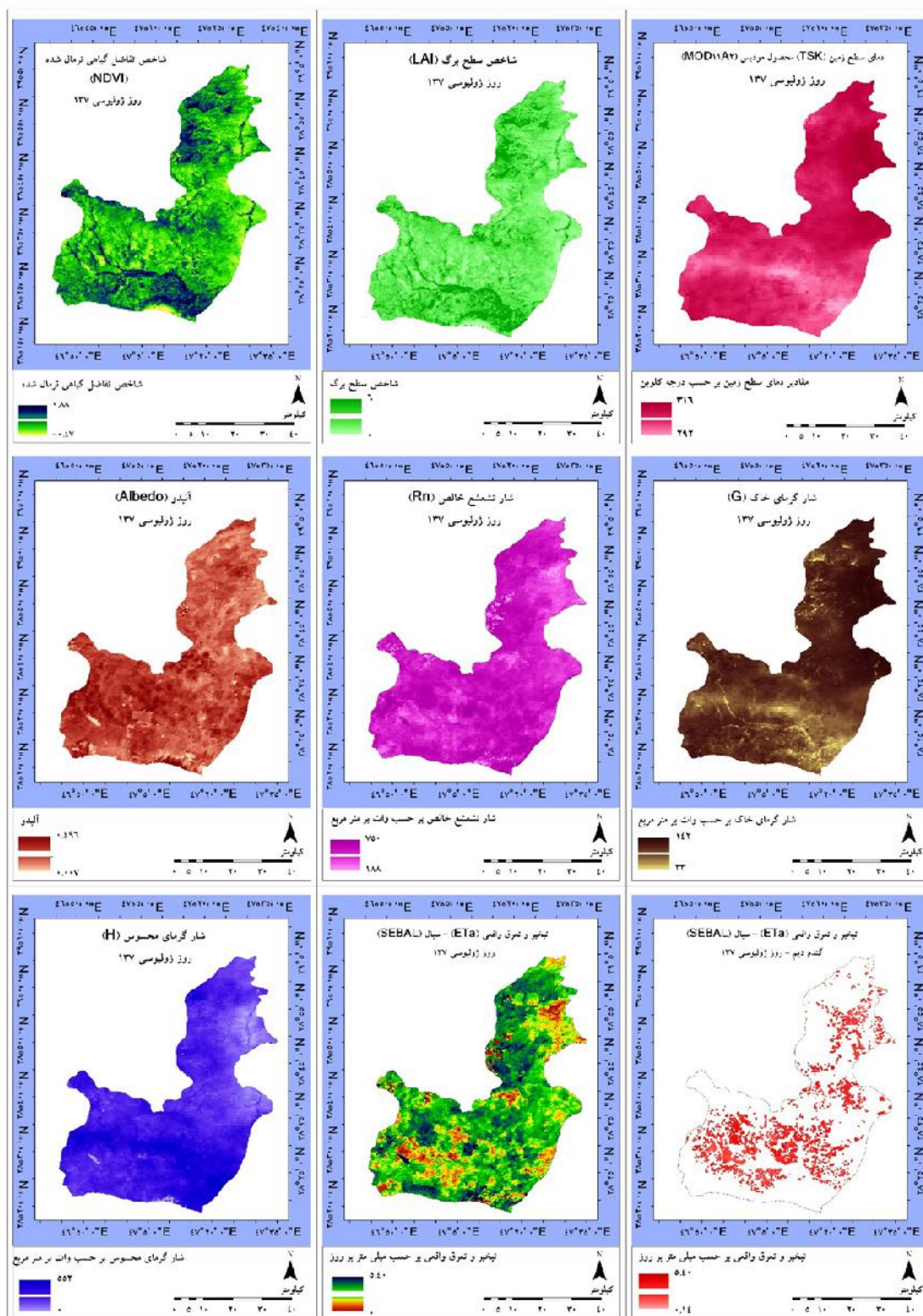
مقادیر بارش ثبت شده در ایستگاه هواشناسی شهرستان اهر به طور یکنواخت به اراضی گندم دیم در سطح این شهرستان اعمال شده است و در صورت داشتن اطلاعات توزیع مکانی بارندگی در سطح شهرستان این روش قادر خواهد بود توزیع دقیق تری از پراکندگی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم را ارائه نماید.

پس از کسب اطمینان از کارایی الگوریتم سبال در برآورد حداکثر میزان تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم که در برهه زمانی خوشه رفتن تا گل دهی گیاه گندم اتفاق می افتد و مصادف با نقطه اوج منحنی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده گندم است، از این الگوریتم جهت برآورد توزیع مکانی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم در روز ۱۳۷ ژولایوسی جهت محاسبه حداکثر میزان تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم و متعاقباً حداکثر سهم گندم دیم از منابع آب سبز شهرستان اهر استفاده گردید. شکل ۹ علاوه بر نمایش نقشه توزیع مکانی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در سطح شهرستان اهر که برای روز ۱۳۷ ژولایوسی مصادف با ۲۷ اردیبهشت سال ۱۳۹۸ تهیه شده است، نشان دهنده لایه های مختلف برآورد شده برای پارامترهای مختلف در فرآیند حل معادله بیلان انرژی توسط الگوریتم سبال و نقشه توزیع مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در سطح اراضی گندم دیم است. با توجه به اینکه الگوی کشت در اراضی آبی با توجه به در دست رس بودن منبع آب جهت انجام عملیات آبیاری هر ساله می تواند دستخوش تغییرات بسیاری باشد، لذا نقشه اراضی گندم آبی می بایست هر ساله بر اساس اراضی نظارت شده به روزرسانی گردد. لیکن با توجه به اینکه امکان تغییر الگوی کشت در اراضی دیم کمتر از اراضی آبی است، با فرض آنکه تغییرات اساسی در سطح اراضی شهرستان اهر رخ نداده باشد، حداکثر سهم روزانه گندم دیم از منابع آب سبز شهرستان اهر از ضرب مقدار متوسط تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم حاصل از الگوریتم سبال در روز ۱۳۷ ژولایوسی سال ۱۳۹۸ (۲/۸ میلی متر بر روز) در مساحت اراضی آن (۳۳۵۰۰ هکتار) در حدود ۰/۹۳ میلیون مترمکعب محاسبه گردید.

جدول ۲ مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات را در نقشه های تبخیر و تعرق واقعی تولید شده توسط الگوریتم سبال و محصول MOD16A2 مودیس برای گندم دیم و آبی در سال ۱۳۸۹ نشان می دهد. همچنین مقادیر مذکور برای نقشه های تولید شده توسط روش اگلن-افهولدر در اراضی دیم نیز ارائه گردیده است. مقادیر خطای مطلق از مقایسه مقدار میانگین تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سبال و محصول MOD16A2 مودیس با روش اگلن-افهولدر برای گندم دیم و با روش فائو پنمن مانیتث برای گندم آبی محاسبه گردیده است. مقادیر جدول ۲ نشان می دهد که الگوریتم سبال توانسته است مقدار حداکثر تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم را در روز ژولایوسی ۱۳۷ به خوبی و با خطای مطلق ۰/۰۳ میلی متر بر روز در مقایسه با روش اگلن-افهولدر برآورد نماید. خطای مطلق الگوریتم سبال در برآورد حداکثر تبخیر و تعرق واقعی گندم آبی در این روز در مقایسه با روش فائو پنمن مانیتث برابر ۰/۸۴ میلی متر بر روز به دست آمد. این در حالی است که محصول MOD16A2 مودیس در این روز با مقادیر خطای مطلق ۱/۱۲ و ۲/۷۴ به ترتیب برای گندم دیم و گندم آبی نتایج خوبی را ارائه نداده است. از میانگین گیری مقادیر خطای مطلق الگوریتم سبال محاسبه شده برای گندم دیم و آبی در دوره زمانی مورد مطالعه، مقدار مذکور برابر ۰/۶۱ میلی متر در روز به دست آمد. پایین بودن ضریب تغییرات الگوریتم سبال در مقایسه با محصول MOD16A2 مودیس در روز ژولایوسی ۱۳۷ حاکی از یکنواختی بیشتر مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در اراضی گندم است که این یکنواختی در روز مذکور به جهت حداکثر بودن ظرفیت تبخیر و تعرق منطقی است. در سایر روزها ضریب تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم سبال بیشتر از مقادیر به دست آمده از محصول MOD16A2 مودیس بوده است که حاکی از توانایی الگوریتم سبال در تشخیص بهتر تفاوت های مکانی مؤثر در میزان تبخیر و تعرق در مزارع گندم دارد. علت پایین بودن ضریب تغییرات در مقادیر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از روش اگلن-افهولدر را می توان به این واقعیت نسبت داد که در اجرای این روش

جدول ۲. میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در اراضی گندم شهرستان اهر حاصل از الگوریتم سبال و محصول MOD16A2 مودیس و خطای مطلق آن‌ها در مقایسه با روش آگلن-افهولدر برای گندم دیم و فائو پنمن ماتیتث برای گندم آبی در سال ۱۳۸۹

روز	روش	میانگین (μ)		انحراف معیار (σ)		خطای مطلق		ضریب تغییرات (CV)
		دیم	آبی	دیم	آبی	دیم	آبی	
۱۲۹	تمام مزارع	۱/۲۵	۱/۶۸	۰/۷۵	۰/۶۸	۰/۹۰	۰/۸۸	٪۴۰
	۱۰٪ مزارع با بیشترین ET_a	-	۲/۵۶	-	۰/۱۳	-	۰/۵۴	٪۵
	محصول مودیس	۱/۳۶	۱/۵۱	۰/۶۱	۰/۵۰	۰/۷۹	۱/۵۹	٪۳۳
۱۳۷	تمام مزارع	۲/۳۴	۲/۹۳	۰/۵۰	۰/۴۱	۰/۰۳	۱/۳	٪۱۴
	۱۰٪ مزارع با بیشترین ET_a	-	۳/۳۹	-	۰/۱۲	-	۰/۸۴	٪۳
	محصول مودیس	۱/۲۵	۱/۴۹	۰/۶۳	۰/۴۵	۱/۱۲	۲/۷۴	٪۳۰
۱۴۵	تمام مزارع	۰/۹۳	۱/۷۳	۰/۷۱	۰/۸۵	۱/۱۳	۱/۷۳	٪۷۶
	۱۰٪ مزارع با بیشترین ET_a	-	۳/۰۱	-	۰/۳۸	-	۰/۴۵	٪۱۲
	محصول مودیس	۱/۴۵	۱/۶۸	۰/۷۹	۰/۴۲	۰/۶۱	۱/۷۸	٪۵۴
۱۵۳	تمام مزارع	۰/۸۵	۱/۴۳	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۳۴	۱/۱۵	٪۶۹
	۱۰٪ مزارع با بیشترین ET_a	-	۲/۱۱	-	۰/۰۶	-	۰/۴۷	٪۲
	محصول مودیس	۰/۷۱	۱/۰۵	۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۴۸	۱/۵۳	٪۶۰
۱۶۱	تمام مزارع	۰/۲۱	۰/۷۱	۰/۳۳	۰/۵۳	۰/۴۲	۱/۴۹	٪۱۰۰
	۱۰٪ مزارع با بیشترین ET_a	-	۱/۲۱	-	۰/۱۸	-	۰/۹۹	٪۱۴
	محصول مودیس	۰/۶۷	۰/۸۸	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۰۴	۱/۳۲	٪۳۲
	آگلن-افهولدر	۰/۶۳	-	۰	-	-	-	۰



شکل ۹. نقشه توزیع مکانی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در سطح شهرستان اهر و در سطح اراضی گندم دیم آن در روز ۱۳۷ ژوئیه سال ۱۳۹۸ (۲۷ اردیبهشت سال ۱۳۹۸) به همراه لایه‌های مختلف استفاده‌شده در فرآیند حل معادله بیلان انرژی توسط الگوریتم سبال

بحث و نتیجه گیری

هم‌راستا با سایر پژوهش‌های صورت گرفته در نقاط مختلف جهان که نتایج به دست آمده برای مقادیر تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) را با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست، نوا و مودیس در مقیاس منطقه‌ای رضایت‌بخش ارزیابی نموده‌اند (۸، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۲۶، ۳۵ و ۳۶)، در این پژوهش نیز کاربرد الگوریتم سبال بر روی تصاویر مودیس در برآورد مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم و گندم آبی مناسب ارزیابی شد. به طوری که میانگین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گندم دیم حاصل از الگوریتم سبال در زمان اوج تبخیر و تعرق (روز ۱۳۷ ژولایوس) با میانگین حاصل از روش اگلن-افهولدر نزدیک به صفر بود. همچنین مقایسه مقادیر میانگین حاصل از الگوریتم سبال و روش فائو پنمن مانیتث در اراضی گندم آبی و در روز مذکور کمتر از ۲۰ درصد بود. معمول‌ترین روش برای صحت‌سنجی مدل‌های بیلان انرژی استفاده از نتایج برج‌های اندازه‌گیری شار گرمای اددی بوده است (۳۲)، لیکن با توجه عدم وجود چنین تجهیزاتی در منطقه مورد مطالعه، مقایسه نتایج الگوریتم سبال با نتایج روش‌های محاسباتی به‌خصوص با روش اگلن-افهولدر در این پژوهش برای نخستین بار مورد بررسی قرار گرفت.

مقایسه نقشه برآورد مقادیر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سبال و محصول MOD16A2 مودیس در سطح شهرستان اهر نشان داد که اختلاف قابل‌توجهی بین این دو به‌خصوص در روز ۱۳۷ ژولایوس وجود دارد. بررسی دقیق‌تر نتایج ارائه شده توسط این دو روش در روز ۱۳۷ ژولایوس که مصادف با نقطه اوج شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده گندم است، نشان داد که میانگین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده توسط محصول MOD16A2 مودیس در مقایسه با روش اگلن-افهولدر برای گندم دیم و روش فائو پنمن مانیتث برای گندم آبی بیش از ۴۰ درصد است و به‌طور کلی این محصول حداکثر مقدار نیاز آبی گندم را کمتر از هر سه روش دیگر برآورد نموده است. عدم دقت قابل‌اتکا در نتایج محصول MOD16A2 مودیس در مطالعه‌ای که در جنوب آفریقا

انجام گرفته بود نیز به اثبات رسیده است به طوری که در آن پژوهش استفاده از محصول MOD16A2 تنها برای رصد روند تغییرات تبخیر و تعرق در مقیاس جهانی توصیه گردیده است (۳۸).

در این پژوهش روند تغییرات سری زمانی شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده در مراحل رشد گندم با روند تغییرات شاخص‌های گیاهی گندم در کشور چین که در تحقیقی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس بررسی شده بود، مطابقت داشت (۲۸). اوج منحنی شاخص‌های گیاهی در هر دو پژوهش در زمانی مابین دو مرحله خوشه رفتن تا گل‌دهی گندم اتفاق افتاد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که کاربرد الگوریتم SEBAL با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS در دوره اوج منحنی شاخص گیاهی که مطابق با زمان اوج نیاز آبی گندم نیز است، روشی مناسب و سریع جهت تعیین حداکثر سهم زراعت گندم دیم از منابع آب سبز در مقیاس شهرستان اهر است که این موضوع می‌تواند در تهیه اطلاعات مورد نیاز برنامه ریزان عرصه مدیریت منابع آب حائز اهمیت باشد.

منابع مورد استفاده

- تازیک، الف، ع. رضایی، ع. آبکار، س. ک. علوی‌پناه، ز. جهانتاب و ع. ر. رحمتی. ۱۳۹۴. برآورد تابش کل لحظه‌ای طول‌موج کوتاه خورشید با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس (مطالعه موردی: مناطق مرکزی ایران). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۷(۱): ۳۰-۱۷.
- ذوقی، ف. ۱۳۹۴. نتایج تفصیلی سرشماری کشاورزی سال ۱۳۹۳ استان آذربایجان شرقی. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی، ۷۱ صفحه.
- عظیمی، ع.، ک. رنگزن، م. کابلی‌زاده و م. خرمیان. ۱۳۹۴. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش‌ازدور، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مقایسه نتایج آن با روش پنمن-مانیتث-فائو در باغات مرکبات شمال خوزستان. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۴): ۷۵-۶۱.
- کریمی فیروزجایی، م و م. کیاورز مقدم. ۱۳۹۵. بررسی ارتباط

- Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213: 198-212. doi:[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4).
16. Bhattarai N, Quackenbush LJ, Im J, Shaw SB. 2017. A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sensing of Environment*, 196: 178-192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.009>.
 17. Bhattarai N, Shaw SB, Quackenbush LJ, Im J, Niraula R. 2016. 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*, 49: 75-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.01.010>.
 18. Congalton RG. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1): 35-46.
 19. Costa JdO, Coelho RD, Wolff W, José JV, Folegatti MV, Ferraz SFdB. 2019. Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm. *Scientia Agricola*, 76(2): 93-101. doi:<https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0158>.
 20. Cruz-Blanco M, Lorite IJ, Santos C. 2014. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 131: 135-145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.017>.
 21. Doorenbos J, Pruitt W. 1977. Guidelines for prediction of crop water requirements. *FAO irrigation and drainage paper*, 24. 51 pp.
 22. Eagleman JR. 1971. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agricultural Meteorology*, 8: 385-394. doi:[https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90124-5](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90124-5).
 23. Feng Y, Cui N, Gong D, Zhang Q, Zhao L. 2017. Evaluation of random forests and generalized regression neural networks for daily reference evapotranspiration modelling. *Agricultural Water Management*, 193: 163-173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.003>.
 24. French AN, Hunsaker DJ, Thorp KR. 2015. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sensing of Environment*, 158: 281-294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.003>.
 25. Frere M, Popov G. 1979. *Agrometeorological crop monitoring and forecasting*. FAO, Rome, Italy, <http://eprints.icrisat.ac.in/id/eprint/13138>.
 26. Hamid SH, Mohamed AA, Mohamed YA. 2011. Towards a performance-oriented management for large-scale irrigation systems: case study, Rahad
- بین دما، شار تابش خالص با خصوصیات بیوفیزیکی و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷(۴): ۷۹-۹۶.
۵. کمالی، غ. ع.، آ. محمدیان، ع. کشاورز، ا. علیزاده، ا. ح. حمزه نوری، م. وظیفه دوست و م. دهقانی. ۱۳۸۷. نیاز آبی گیاهان در ایران. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، چاپ دوم، مشهد، ۲۲۸ صفحه.
 6. Abtew W, Melesse A. 2012. *Evaporation and Evapotranspiration: Measurements and Estimations*. Springer Netherlands, 206 pp.
 7. Affholder F. 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research*, 52(1): 79-93. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(96\)03453-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(96)03453-3).
 8. Ahmad M-D, Biggs T, Turrall H, Scott CA. 2006. Application of SEBAL approach and MODIS time-series to map vegetation water use patterns in the data scarce Krishna river basin of India. *Water Science and Technology*, 53(10): 83-90. doi:<https://doi.org/10.2166/wst.2006.301>.
 9. Allen RG, Morse A, Tasumi M. 2003. Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. In: *Proc. ICID Int. Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions*. pp 1-13.
 10. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 300(9): D05109. 50 pp.
 11. Allen RG, Tasumi M, Trezza R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4): 380-394. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437).
 12. Bastiaanssen W, Noordman E, Pelgrum H, Davids G, Allen R. 2005. SEBAL for spatially distributed ET under actual management and growing conditions. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1): 85-93.
 13. Bastiaanssen WG, Ahmad MuD, Chemin Y. 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resources Research*, 38(12): 91-99. doi:<https://doi.org/10.1029/2001WR000386>.
 14. Bastiaanssen WGM, Bos MG. 1999. *Irrigation Performance Indicators Based on Remotely Sensed Data: a Review of Literature*. *Irrigation and Drainage Systems*, 13(4): 291-311. doi:10.1023/A:1006355315251.
 15. Bastiaanssen WGM, Menenti M, Feddes RA, Holtslag AAM. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1.

- scheme, Sudan. *Irrigation and drainage*, 60(1): 20-34. doi:<https://doi.org/10.1002/ird.546>.
27. Hoekstra AY. 2019. Green-blue water accounting in a soil water balance. *Advances in Water Resources*, 129: 112-117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.05.012>.
 28. Huang J, Tian L, Liang S, Ma H, Becker-Reshef I, Huang Y, Su W, Zhang X, Zhu D, Wu W. 2015. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 204: 106-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.001>.
 29. Jaafar HH, Ahmad FA. 2020. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sensing of Environment*, 238: 111034. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.033>.
 30. Leng P, Li ZL, Duan SB, Tang R, Gao MF. 2017. A method for deriving all-sky evapotranspiration from the synergistic use of remotely sensed images and meteorological data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(24): 13,263-213,277. doi:<https://doi.org/10.1002/2017JD027880>.
 31. Li F, Cao R, Zhao Y, Mu D, Fu C, Ping F. 2017. Remote sensing Penman-Monteith model to estimate catchment evapotranspiration considering the vegetation diversity. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(1): 111-121. doi:[10.1007/s00704-015-1628-2](https://doi.org/10.1007/s00704-015-1628-2).
 32. Maltese A, Awada H, Capodici F, Ciruolo G, La Loggia G, Rallo G. 2018. On the use of the eddy covariance latent heat flux and sap flow transpiration for the validation of a surface energy balance model. *Remote Sensing*, 10(2): 195. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10020195>.
 33. Matsushita B, Yang W, Chen J, Onda Y, Qiu G. 2007. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11): 2636-2651. doi:<https://doi.org/10.3390/s7112636>.
 34. McShane RR, Driscoll KP, Sando R. 2017. A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents. *Scientific Investigations Report 2017-5087* Reston, VA: US Geological Survey 19 p. doi:<https://doi.org/10.3133/sir20175087>.
 35. Mhawej M, Caiserman A, Nasrallah A, Dawi A, Bachour R, Faour G. 2020. Automated evapotranspiration retrieval model with missing soil-related datasets: The proposal of SEBAL. *Agricultural Water Management*, 229: 105938. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105938>.
 36. Mhawej M, Elias G, Nasrallah A, Faour G. 2020. Dynamic calibration for better SEBAL ET estimations: Validations and recommendations. *Agricultural Water Management*, 230: 105955. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105955>.
 37. Mousavi-Baygi M, Bannayan M, Ashraf B, AsadiOskuei E. 2016. Assessment of climatic indices limiting rainfed wheat yield. *Ecological Indicators*, 62: 298-305. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.007>.
 38. Ramoelo A, Majozi N, Mathieu R, Jovanovic N, Nickless A, Dzikiti S. 2014. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African savanna, South Africa. *Remote Sensing*, 6(8): 7406-7423. doi:<https://doi.org/10.3390/rs6087406>.
 39. Roerink GJ, Su Z, Menenti M. 2000. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2): 147-157. doi:[https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(99\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00128-8).
 40. Santos C, Lorite IJ, Tasumi M, Allen RG, Fereres E. 2010. Performance assessment of an irrigation scheme using indicators determined with remote sensing techniques. *Irrigation Science*, 28(6): 461-477. doi:[10.1007/s00271-010-0207-7](https://doi.org/10.1007/s00271-010-0207-7).
 41. Shirazi MA, Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48(1): 142-147. doi:<https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800010026x>.
 42. Sultan B, Bella-Medjo M, Berg A, Quirion P, Janicot S. 2010. Multi-scales and multi-sites analyses of the role of rainfall in cotton yields in West Africa. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 30(1): 58-71. doi:<https://doi.org/10.1002/joc.1872>.
 43. Teixeira AHdC, Bastiaanssen WGM, Ahmad MD, Bos MG. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3): 462-476. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.016>.
 44. Van Dam JC, Singh R, Bessembinder JJE, Leffelaar PA, Bastiaanssen WGM, Jhorar RK, Kroes JG, Droogers P. 2006. Assessing Options to Increase Water Productivity in Irrigated River Basins Using Remote Sensing and Modelling Tools. *International Journal of Water Resources Development*, 22(1): 115-133. doi:[10.1080/07900620500405734](https://doi.org/10.1080/07900620500405734).
 45. Vermote EF, Kotchenova S. 2008. Atmospheric

- correction for the monitoring of land surfaces. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D23). doi:<https://doi.org/10.1029/2007JD009662>.
46. Xia T, Kustas WP, Anderson MC, Alfieri JG, Gao F, McKee L, Prueger JH, Geli HM, Neale CM, Sanchez L. 2016. Mapping evapotranspiration with high-resolution aircraft imagery over vineyards using one-and two-source modeling schemes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1): 1523–1545. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-20-1523-2016>.
47. Zhang Y, Zhang J-H, Tian Q, Liu Z-H, Zhang H-L. 2018. Virtual water trade of agricultural products: A new perspective to explore the Belt and Road. *Science of The Total Environment*, 622-623: 988-996. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.35>.



Application of SEBAL algorithm in estimating maximum daily demand of rain-fed wheat from green water resources using MODIS images (Case study: Ahar county)

A. A. Sadraddini^{1*}, H. Sabzchi Dehkharghani², A. H. Nazemi¹, A. Majnooni Heris³

1. Prof. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

2. PhD Student of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

3. Assoc. Prof. Department Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 October 2019

Accepted 24 March 2019

Available online 16 April 2020

Keywords:

Evapotranspiration

MODIS images

SEBAL algorithm

Rain-fed wheat

Ahar

ABSTRACT

Remote sensing techniques have been applied to estimate the spatiotemporal distribution of evapotranspiration as an alternative for field measuring methods. The objective of this study is to estimate the maximum daily demand of rain-fed wheat from green water resources in Ahar county using the SEBAL algorithm and MODIS images. First, the results from the SEBAL algorithm were evaluated by comparing them to the results from the Eagleman-Affholder method in rain-fed wheat fields and to the results from Fao-Penman- Monteith method in irrigated wheat fields and then the wheat maximum daily evapotranspiration values were calculated in the study area. MODIS surface reflectance and land surface temperature images were used to monitor the variation of normalized difference vegetation index during the wheat growth period, to map wheat areas and to estimate wheat evapotranspiration during the wheat booting stage until the wheat yellowing stage in 2010. After evaluating the SEBAL algorithm during the mentioned period, the maximum daily demand of rain-fed wheat from green water resources was estimated on the 17th of July 2019. By comparing the wheat evapotranspiration values from SEBAL and from computational methods, the average absolute error and correlation were calculated as 0.61 mm/day and 0.9 respectively. It was also found that the wheat highest evapotranspiration occurred after the vegetation index curve had reached its peak. In this time, the wheat maximum daily water demand from the green water resources throughout the county in 2019 was estimated almost equal to 0.93 million cubic meters.

* Corresponding author e-mail address: sadraddini@tabrizu.ac.ir