

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی مدل AquaCrop برای برآورد عملکرد گندم با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست

علی سرداری^۱، مهدی همایی^۲، علی اکبر نوروزی^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸

چکیده

ایران دارای پهنه‌های گسترده تحت کشت است که برآورد دقیق و به‌موقع عملکرد در چنین پهنه‌هایی برای هرگونه مدیریت کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای برآورد عملکرد محصولات زراعی بر پایه مشاهدات سنجش از دور ارائه شده است. هدف اصلی این مقاله ارزیابی مدل AquaCrop برای برآورد عملکرد گندم با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای است. در این پژوهش یکی از مراحل اولیه و مهم، برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم توازن انرژی سطح زمین^۴ (SEBAL) و تصاویر ماهواره Landsat8 است. تبخیر-تعرق حاصل از تصاویر ماهواره‌ای با داده‌های تبخیر-تعرق تحت تبخیر ایستگاه هواشناسی سینوپتیک زنگان مقایسه شده و نتایج قابل قبولی در شاخص‌های آماری ($MAE^5 = 0.36$ ، $RMSE^6 = 0.45$ و $R^2 = 0.94$) به دست آمد. در ادامه از مدل رشد گیاهی AquaCrop در جهت شبیه‌سازی رشد گندم استفاده شد. مقدار شاخص‌های آماری MAE ، $RMSE$ و R^2 برای داده‌های^۷ (CC)، تعرق، تصاویر ماهواره‌ای و مدل AquaCrop به ترتیب برابر (۱۱/۰۶، ۹/۲ و ۰/۹۴ درصد) و (۰/۶۳۳، ۰/۳۵۹ و ۰/۹۵ میلی‌متر در روز) به دست آمد. نتایج حاصل از میانگین عملکرد محصول پیکسل‌های مزرعه‌ای برابر ۱/۱۸۹ تن در هکتار به دست آمد و در مقایسه با آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی با استفاده از شاخص آماری MAE ، $RMSE$ و مطالعات میدانی انجام‌شده (۱-۱/۲ تن در هکتار) در این پژوهش نشان می‌دهد که میزان برآورد عملکرد گندم در منطقه مورد مطالعه قابل قبول است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق، عملکرد گندم، AquaCrop، SEBAL

مقدمه

حفظ سطح کافی از تولید این محصولات لازم است (Marjorie Battude et al., 2016). تخمین صحیح عملکرد گیاهان در حقیقت تأثیر نهاده‌های مختلف کشاورزی بر عملکرد نهایی را نشان می‌دهد. یکی از روش‌های نوین برای تخمین عملکرد، استفاده از مدل‌های رشد گیاهان زراعی است. اگرچه پیشرفت‌های زیادی در توسعه این مدل‌ها صورت گرفته است اما واسنجی و اعتبارسنجی آن‌ها در مقیاس‌های بزرگ مستلزم برداشت نمونه‌های فراوان و عملیات میدانی زیادی است (Sadooghi et al., 2016). در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و خاک، بهره‌گیری از فناوری‌های جدید نظیر پردازش اطلاعات ماهواره‌ای، استفاده از نرم‌افزارها و سیستم‌های پشتیبانی پردازش اطلاعات، نقش بسزایی در مدیریت منابع محدود آب و خاک به عهده دارد. مدل‌های شبیه‌ساز رشد محصول در مقیاس کوچک، ابزار تحقیقاتی قدرتمندی است که در پیش‌بینی عملکرد محصول در سامانه‌های زراعی مختلف استفاده می‌شود. تولید گیاهی نتیجه ترکیب داده‌های محیطی مانند تابش خورشیدی، آب و دیگر عوامل مؤثر بر رشد گیاه است. به میزان تولید گیاهی در بازه‌ای خاص، عملکرد محصول می‌گویند که هدف کشت محصول به دست آوردن

تغییرات آب و هوا اثرات قابل‌توجهی در تولید محصولات کشاورزی دارد و محدودیت منابع آب یکی از عوامل مهم در این مسئله محسوب می‌گردد. با توجه به رشد روزافزون جمعیت جهان، تولید محصولات کشاورزی برای اطمینان از تأمین امنیت غذایی در اولویت امور قرار می‌گیرد. فراتر از مدیریت بهتر منابع زیست‌محیطی،

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: noroozi.aa@gmail.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.5.19.7

4-Surface Energy Balance Algorithm for Land

5-Mean Absolute Error

6-Root Mean Square Error

7-Crop Canopy

به صورت مناسبی تاج پوشش، رشد وزنی زیست‌توده بخش هوایی و عملکرد دانه را برای چهار رقم ذرت در شش فصل رشد مختلف با تراکم، تاریخ کشت و نیاز تعرقی مختلف آبیاری شبیه‌سازی کرده است (Hsiao et al., 2009). هنگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ به واسنجی AquaCrop برای ذرت در سه منطقه با شرایط کاملاً متفاوت (Zaragoza) اسپانیا (در شرایط نیمه‌خشک)، Bushland نگرزاس آمریکا (باد شدید و تبخیر-تعرق بالا) و Gainesville فلوریدای آمریکا (آب و هوای بارانی) واسنجی و اعتبار یابی نمودند. نتایج مطالعه هنگ و همکاران نشان داد که این مدل قادر به تکرار شاخص‌های مختلف گیاهی در شرایط آبیاری کامل و کشت دیم است. از دیگر قابلیت‌های این مدل به بررسی سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مدیریت آبیاری می‌توان اشاره کرد (Heng et al., 2009).

مطالعه‌ای توسط اقبال و همکاران در سال ۲۰۱۴ به منظور بررسی عملکرد مدل AquaCrop برای گندم زمستانه مطالعه‌ای در دشت شمالی چین صورت گرفت. آزمایش‌های مزرعه‌ای در ایستگاه لانچنگ در سال ۲۰۰۱-۱۹۹۸ تحت کم‌آبیاری اجرا شد و مدل AquaCrop با بخشی از تیمارها، واسنجی و با دسته دیگر اعتبارسنجی شد. به‌طور کلی، در اعتبارسنجی مدل، RMSE برای عملکرد دانه ۵۸/۰ و بیوماس ۸۷/۰ (تن در هکتار) بود و نتایج نشان داد که مدل AquaCrop مدلی اطمینان‌بخش برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در دشت شمالی چین است (Iqbal et al., 2014). شمس‌نیا و پیرمردیان در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۳ با بررسی عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل AquaCrop در شرایط تغییرات و نوسانات اقلیمی در شیراز گزارش دادند که نوسانات اقلیمی بر عملکرد گندم دیم تأثیرگذار بوده و مدل AquaCrop توانسته است با دقت مطلوبی عملکرد گندم دیم را شبیه‌سازی نماید (Shamsnia and Pirmoradian, 2013).

دنته و همکاران در سال ۲۰۱۵ در کشور ایتالیا به بهبود برآورد عملکرد گندم پرداختند. در این تحقیق مدل CERES با استفاده از شاخص سطح برگ LAI^1 ماهواره‌ای گرفته شد و از سنجنده‌های ASAR و MERIS برای به‌روزرسانی استفاده گردید. مزارع گندم در سه سال ۲۰۰۱، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ پایش گردید و پارامترهای خاک و دیگر پارامترهای موردنیاز مدل اندازه‌گیری شد. در مطالعه‌ای دیگر کارایی مساوی مدل‌های STICS و AqYield برای پیش‌بینی عملکرد محصولات کشاورزی آبی در ارتباط با کمبود مجموعه داده زمینی و شرایط بدون تنش نیترا نشان داده شده است (Constantin et al., 2015). در مطالعه پادایا و همکاران در سال ۲۰۱۲ برای نظارت بر عملکرد منطقه‌ای گندم در جنوب اسپانیا از

این عملکرد است (Ferencz et al., 2004). بنابراین لازم است از ابزاری استفاده کنیم که بتواند درک درستی از نحوه کارکرد گیاه و تخمین عملکرد محصول در نواحی بزرگ را به ما بدهد. سنجنش از دور، فناوری بسیار مفیدی است که با داشتن خصوصیات نظیر فراهم ساختن دیدی وسیع و یکپارچه از یک منطقه، قابلیت تکرارپذیری، سهولت الوصول بودن اطلاعات، دقت زیاد اطلاعات حاصل و صرفه‌جویی در زمان می‌تواند مشکلات موجود در آماده‌سازی داده‌های ورودی مدل‌های شبیه‌سازی را کاهش دهد (Ferencz et al., 2004). فناوری سنجنش از دور تغییرات دوره‌ای پدیده‌های سطح زمین و سیر تکامل محصول در تمام طول فصل کشاورزی را نشان می‌دهد و این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان به صورت پیوسته و منظم و در پهنه‌های گسترده‌تر داده‌های موردنیاز مدل را کسب کرد. مطالعات متعدد، پتانسیل بالای روش‌هایی را که بر اساس ترکیب داده سنجنش از دور با مدل‌های گیاه نیمه تجربی به‌منظور تخمین تولید محصول در نواحی بزرگ نشان می‌دهند (Hadria et al., 2009). برای نمونه از مدل‌ها می‌توان به مدل WOFOST (Diepen et al., 1989) CERES (Godwin and Jone., 1991) SVAT (Mo and Liu., 2001) SWAP (Kroes and Van Dam., 2003) اشاره کرد.

مدل AquaCrop یک مدل رشد گیاه است که توسط FAO برای رسیدگی به امنیت غذایی و ارزیابی تأثیر محیط و مدیریت بر تولید محصولات کشاورزی تهیه شده است. هنگام طراحی مدل، تعادل مطلوب بین سادگی، دقت و استحکام دنبال شده است. به‌طور کلی مدل AquaCrop به پارامترهای کمی نیاز دارد و از متغیرهای ورودی عمدتاً بصری که نیاز به روش‌های ساده برای تعیین آنهاست، استفاده می‌کند. از سوی دیگر روش محاسبه بر پایه فرایندهای بیوفیزیکی پایه و اغلب پیچیده استوار است تا تضمین‌کننده پاسخ دقیق شبیه‌سازی محصول در سیستم آب و خاک باشد. به دلیل رفتار طیفی متفاوت ماده گیاهی سبز در شرایط با و بدون تنش آبی و بازتابش متفاوت امواج الکترومغناطیسی در طول موج‌های مرئی و مادون قرمز، امکان ارزیابی‌های واقعی از میزان عملکرد و سلامت گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای فراهم است (Anup et al., 2006). مطالعات بسیاری همبستگی زیاد بین شاخص‌های گیاهی تولیدی از تصاویر ماهواره‌ای، توده سبز گیاهی و عملکرد را نشان می‌دهند و از این رو می‌توان از شاخص‌های گیاهی در برآورد عملکرد گیاهی استفاده کرد (Groten et al., 1993).

در مطالعه‌ای، شاو و همکاران در سال ۲۰۰۹ با بررسی پارامتری کردن و آزمون مدل AquaCrop روی گیاه ذرت در مزارع دیویس ایالت کالیفرنیا، بیشترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده را ۲۲ درصد در توده گیاهی و ۲۴ درصد در دانه تولیدی اعلام کردند و در نتایج نشان داد که مدل AquaCrop

1- Leaf area index

ماهواره Landsat8 استفاده گردید. تصاویر موردنیاز بر اساس تاریخ رشد گیاه گندم که به صورت دیم کشت شده است و مطابق تقویم زراعی که در مهر زمین آماده شخم و کاشت و در اواخر اردیبهشت در منطقه مورد مطالعه برداشت می شود، از سایت سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا دانلود شد. محدوده طیفی باندهای لندست ۸ از ۰/۴۳ تا ۱۲/۵ میکرومتر است.

مدل AquaCrop

این مدل یکی از جدیدترین مدل های گیاهی است که توسط FAO در سال ۲۰۰۷ ارائه گردیده و در عین سادگی از دقت و توانایی بالایی در شبیه سازی رشد محصول برخوردار است و یک مدل کلی عمومی و جامع است که در آن برای طیف گسترده ای از محصولات گیاهی مورد استفاده قرار می گیرد. مفاهیم و اصول اساسی مدل توسط استودتو و همکاران، ساختار و الگوریتم مدل توسط ریس و همکاران، پارامترها برای مدل از گیاه ذرت (به عنوان محصولی که در فاز اولیه طراحی مدل برای یافتن پارامترها روی آن تمرکز شده بود) توسط شاو و همکاران در سال ۲۰۰۹ گزارش شده است. مدل AquaCrop عملکرد نهایی محصول را در چهار مرحله شبیه سازی می کند که به راحتی قابل درک است.

توسعه پوشش سایه انداز گیاه (CC): پوشش سایه انداز گیاه کسری از سطح خاک است که توسط توده گیاه پوشیده شده است. مقدار آن از صفر در زمان کاشت تا حداکثر مقدار که در اواسط فصل رشد زمانی که پوشش تاج کامل رسیده باشد (۱۰۰٪) از سطح خاک با توده گیاهی پوشاندن (شود) می تواند برابر با یک باشد.

تعرق گیاه (Tr): در شرایط با آبیاری خوب و کامل، Tr طبق فرمول زیر، با ضرب کردن تبخیر-تعرق مرجع با ضریب گیاهی $K_{C_{Tr}}$ محاسبه می شود. ضریب گیاهی متناسب با CC است و از این رو در طول چرخه رشد گیاه متناسب با تغییر مقدار CC تغییر می کند.

$$Tr = K_s CC^* [K_{S_{Tr,x}} K_{C_{Tr,x}}] ETo \quad (1)$$

K_s ضریب تنش (تحت تأثیر تنش آبی و تنش شوری خاک)، $K_{S_{Tr,x}}$ ضریب تنش دمایی، $K_{C_{Tr,x}}$ تنش حاصلخیزی خاک و $K_{C_{Tr,x}}$ ضریب حداکثر تعرق گیاه است.

زیست توده سطحی (B) (Above-ground biomass):

زیست توده تولید شده طبق فرمول زیر، متناسب با مقدار تجمعی تعرق محصول است ($\sum Tr$). عامل تناسب، بهره وری آب زیست توده (WP) است. در مدل AquaCrop، WP برای تأثیر روی شرایط آب و هوایی نرمالیزه شده است که بهره وری آب زیست توده نرمال شده (WP^*) برای شرایط مختلف مکانی، فصلی و غلظت های مختلف CO_2 قابل قبول می سازد.

$$B = K_{S_{WP}} WP \times \sum \left(\frac{Tr}{ET_0} \right) \quad (2)$$

ترکیب مدل GRAMI با تصاویر ماهواره Landsat، استفاده کردند (Padilla et al., 2012). یافته های لی و همکاران در سال ۲۰۱۴ برآورد بسیار خوبی از عملکرد منطقه ای ذرت با استفاده از مدل کوپل WOFOST-HYDRUS ترکیب شده با داده با قدرت تفکیک زمانی پایین Landsat ETM+ نشان داد (Li et al., 2014). علی رغم نتایج مطلوب در مطالعات ذکر شده یک اشکال اصلی به این مطالعات وارد است که آن ها برای کالیبراسیون مدل، به زیست توده محل و داده های عملکرد محصول نیاز دارند در حالی که چنین داده ای به ندرت در نواحی بزرگ در دسترس است، یکی از دلایل آن وقت گیر بودن به دست آوردن داده است علاوه بر این حتی اگر داده ها در دسترس باشد همیشه با عدم قطعیت بسیار قوی در برآورد روبه رو است (Marjorie Battude et al., 2016).

نیاز به اطلاعات تبخیر-تعرق در فعالیتهای کشاورزی بسیار ضروری می باشد و نحوه دستیابی و آگاهی از وضعیت تبخیر-تعرق با استفاده از ایستگاه های نقطه ای هزینه بر، زمان بر و فاقد پوشش کامل می باشد. در این تحقیق ضمن بررسی و ارزیابی مدل FAO AquaCrop برای برآورد عملکرد گندم با استفاده از تصاویر ماهواره ای، برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم توازن انرژی سطح زمین^۱ (SEBAL) و مقایسه آن با داده های تبخیر-تعرق تشت تبخیر ایستگاه هواشناسی انجام گرفته است.

مواد و روش ها

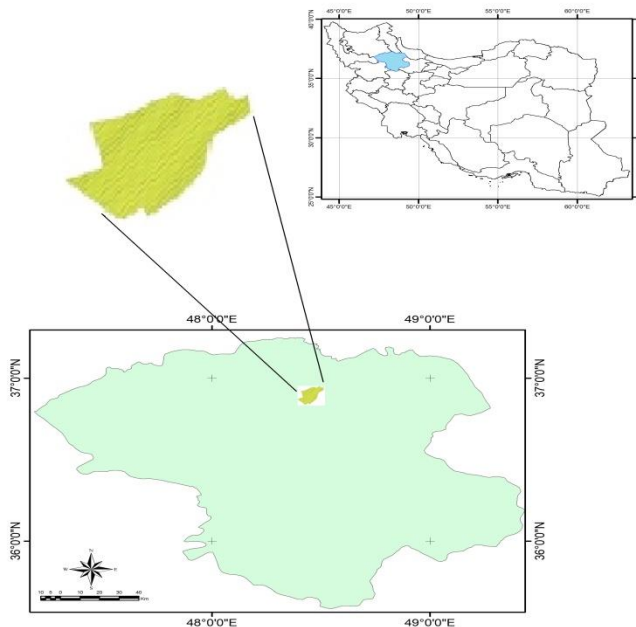
معرفی منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه آبخیز سفیدرود و زیر حوضه زنجان رود (دشت سهرین) است که در سمت شمال غربی شهر زنجان واقع گردیده است (شکل ۱). دشت سهرین شامل اراضی کشاورزی و مرتعی است از شمال به کوه های طارم و از جنوب به زنجان رود و از شرق به آبراهه های سهرین و از غرب به آبراهه های قره جریان محدود می گردد. وسعت منطقه مطالعاتی ۲۸/۶۳ کیلومترمربع است و از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه و ۵۳/۷۱ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۴۸ دقیقه و ۲۸/۳۶ ثانیه عرض شمالی و بین ۴۸ درجه و ۲۳ دقیقه و ۲۶/۳۳ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۱۷ دقیقه و ۳۱/۹۶ ثانیه طول شرقی واقع گردیده است.

داده های مورد استفاده

داده های هواشناسی از قبیل پارامترهای حداقل و حداکثر دما، داده های تشت تبخیر، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت های آفتابی به صورت روزانه و ساعتی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک زنجان تهیه شد. همچنین از تصاویر DEM سنجنده ASTER و تصاویر

1- Surface Energy Balance Algorithm for Land



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی

رشد استفاده می‌کند (GDD^1). در نیمه اول رشد (مرحله جوانه‌زنی تا پوشش کامل) پوشش گیاهی برای رسیدن به حداکثر مقدار به شکل نمایی طبق فرمول زیر افزایش می‌یابد.

$$CC = CC_0 e^{CGC.t} \quad (4)$$

در مرحله برداشت تابعی نمایی و نزولی است که در فرمول زیر به آن اشاره شده است:

$$CC = CC_x - (CC_x - CC_0) \cdot e^{-CGC.t} \quad (5)$$

CGC ضریب رشد پوشش گیاهی است.

داده‌های مدیریت شامل مدیریت زراعی که دربرگیرنده پوشش و شکل سطح خاک قبل از کشت و درجه غنی بودن خاک و کود دهی می‌باشد. مدل قادر به شبیه‌سازی بیلان مواد مغذی در خاک نمی‌باشد و فقط به صورت کلی چهار سطح حاصلخیزی خاک در نظر گرفته شده است. انتخاب هر یک از این گزینه‌ها بر پارامترهای WP، پوشش گیاهی، سرعت پیر شدن پوشش و بیوماس، تأثیر می‌گذارد. مدیریت آبیاری که شامل برنامه‌ریزی آبیاری (زمان و عمق آب) و تعیین روش آبیاری، کشت دیم، سطحی (شیاری و غرقابی)، بارانی، قطره‌ای می‌گردد. با در نظر گرفتن این گزینه‌ها مدل قادر به اعمال روش‌های مدیریتی کم‌آبیاری و آبیاری تکمیلی می‌باشد (Raes و همکاران، ۲۰۰۹).

مؤلفه خاک AquaCrop به صورت یک سیستم پراکنده در نظر گرفته می‌شود که تا ۵ لایه با بافت‌های مختلف می‌تواند داشته باشد.

عملکرد محصول (Y): مقدار زیست توده شبیه‌سازی شده تمام

محصولات فتوسنتزی را که در طول فصل رشد گیاه تولید می‌شود را ادغام می‌کند. با استفاده از شاخص برداشت (HI)، که کسری از عملکرد بیولوژیکی یا ماده خشک بالایی خاک (B) است، عملکرد محصول (Y) که در فرمول زیر نیز به آن اشاره شده است، به دست می‌آید. شاخص برداشت واقعی با تعدیل کردن در طول شبیه‌سازی و شاخص برداشت مرجع (HI_0) با تعدیل فاکتور اثرات تنش به دست می‌آید. تنش آب و دما به صورت مستقیم یک یا چند فرآیند بالایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

$$Y = H \times I_0 \times B \quad (3)$$

داده‌های ورودی به مدل AquaCrop

داده‌های اقلیم در مؤلفه Climate نرم‌افزار AquaCrop مورد بحث قرار می‌گیرد و شامل متغیرهای کلیدی هواشناسی از جمله دمای حداکثر و حداقل، بارش، تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) و میانگین سالانه غلظت CO_2 موجود در اتمسفر است. غلظت CO_2 موجود در اتمسفر به صورت ثابت با مقدار $369/46$ ppm در پیش فرض مدل در نظر گرفته می‌شود. در مدل دو مبنای زمانی برای مراحل رشد گیاه و دیگر فرایندها در نظر گرفته شده است که با توجه به داده‌های موجود و هدف کاربر، یک مبنا انتخاب می‌گردد. ۱- بر اساس تقویم معمولی ۲- بر اساس نیازهای دمایی که مدل از پارامتر درجه روز در فصل

1- Growing Degree Day

می‌باشد $(\frac{W}{m^2})$ و برای برآورد تبخیر-تعرق روزانه ماهواره از مقدار لحظه‌ای (برای یک ساعت)، از نسبت تبخیر-تعرق گیاه مرجع روزانه به ساعتی استفاده می‌گردد. به این منظور تبخیر-تعرق گیاه مرجع حاصل از روش پنمن-مانتیث-فائو در مقیاس ساعتی (میلی‌متر در ساعت) در لحظه گذر ماهواره (ET_{r-inst}) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه برحسب میلی‌متر در روز (ET_{r-24}) محاسبه می‌شود. سپس از رابطه (۹) میزان تبخیر-تعرق واقعی روزانه مدل‌های ماهواره‌ای (ET_{act-24}) برحسب میلی‌متر در روز برآورد می‌گردد (Bastiaanssen et al., 2002).

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \left(\frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \right) \quad (9)$$

با استفاده از آماره‌های RMSE و MAE ارزیابی و اعتبار سنجی مدل، تصاویر و داده‌های میدانی به کمک فرمول‌های زیر انجام گرفت:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i|}{n} \quad (10)$$

نتایج و بحث

نقشه‌های شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی $(NDVI^1)$ و تبخیر-تعرق واقعی روزانه در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است. هرچه سطح زمین گرم‌تر باشد مقدار تابش بیشتری در محدوده طول‌موج بلند از خود گسیل می‌کند. بنابراین با افزایش دمای سطح زمین، تابش موج بلند خروجی افزایش یافته و تابش خالص خورشیدی کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع تبخیر-تعرق واقعی روزانه، طیف وسیعی از مقادیر را با توجه به پوشش منطقه مورد مطالعه شامل اراضی کشاورزی و بایر را نشان می‌دهد (شکل ۲). با مقایسه شکل‌های مربوط به توزیع مکانی تبخیر-تعرق واقعی، پوشش گیاهی و دمای سطحی مشاهده می‌شود که نواحی دارای شاخص پوشش گیاهی بالا (با دمای سطحی پایین) نسبت به نواحی که دارای شاخص پوشش گیاهی پایین (با دمای سطحی بالا) از میزان تبخیر-تعرق کمتری برخوردارند. در قسمت‌های جنوبی و غربی کمترین میزان تبخیر-تعرق و پوشش گیاهی و بالاترین دما مشاهده می‌شود. با توجه به نقشه‌های توزیع دمای سطحی و شاخص پوشش گیاهی، رابطه معکوس بین این دو مشاهده می‌شود.

برای ارزیابی دقت مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده با مدل SEBAL از داده‌های تشت تبخیر ایستگاه هواشناسی سینوپتیک زنجان استفاده شد؛ فرمول (۱۰) که در آن E_{pan} تبخیر تشت، K_c ضریب گیاهی، K_p ضریب تشت و ET_a تبخیر-تعرق واقعی است. برای برآورد K_p از رابطه ارائه شده توسط نشریه شماره ۵۶ فائو برای تشت تبخیر کلاس A مستقر در محیط خشک استفاده شد.

مدل همه کلاس‌های بافتی موجود در مثلث بافت USDA را شامل می‌شود. همچنین می‌توان ترکیب بافتی موردنظر را به مدل وارد کرد. برای هر کلاس بافتی خاک، مدل تعدادی از خصوصیات هیدرولیکی را دارا می‌باشد. خصوصیات هیدرولیکی شامل ضریب زهکشی (T)، هدایت هیدرولیکی اشباع (Ksat) و مقدار رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع، ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی است.

رابطه LAI و CC

در AquaCrop توسعه شاخ و برگ گیاه از طریق پوشش سایه‌انداز (CC) بیان می‌شود نه از شاخص سطح برگ (LAI). به همین منظور باید ابتدا تصاویر LAI تولیدی را به CC تبدیل کنیم. LAI و CC دو حالت برای پوشش گیاهی هستند و در مدل‌های کشت محصول و تجزیه و تحلیل فرآیندهای اکولوژیکی به همدیگر مرتبط هستند. رابطه بین این دو متغیر وابسته به نوع گیاه یا محصول است. در این مطالعه از رابطه تجربی تهیه شده توسط نیلسین و همکاران که در رابطه (۶) آمده است، در سال ۲۰۱۲ برای گندم زمستانه با $R^2 = 0/957$ استفاده شد.

$$CC = 94/00 * [1 - \exp(-0/43 * LAI)]^{0/52} \quad (6)$$

مقادیر CC به دست آمده با استفاده از رابطه ارائه شده در کتاب مرجع AquaCrop، با استفاده از مطالعات انجام شده توسط ویالوبوس و فررس در سال ۱۹۹۰ اصلاح شد. فرمول محاسبه CC اصلاح شده (CC^*) به صورت زیر است (Villalobos and Fereres, 1990).

$$CC^* = 1.72 CC - CC^2 + 0.30CC^3 \quad (7)$$

الگوریتم توازن انرژی برای سطح زمین (SEBAL)

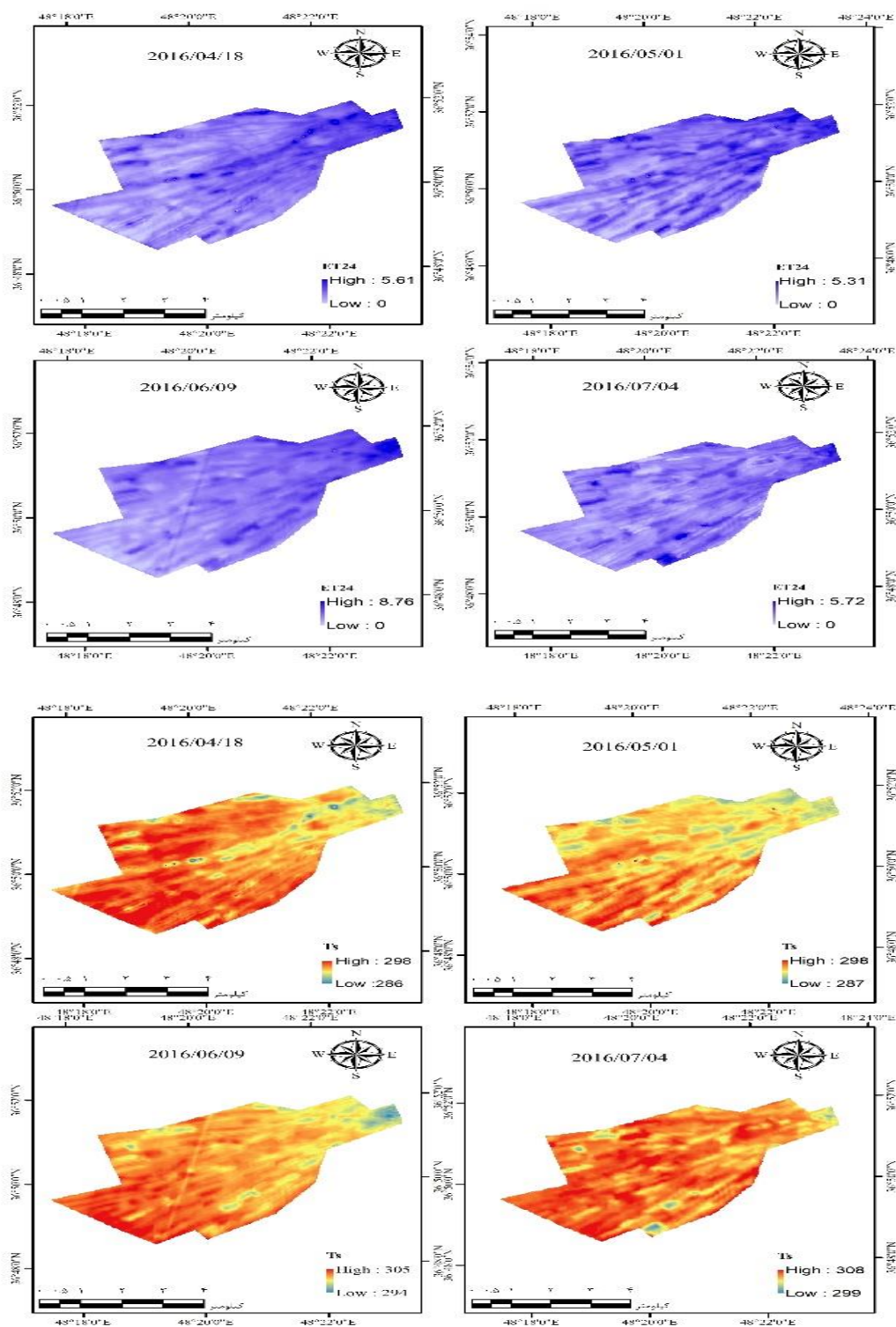
یکی از روش‌های مطرح در زمینه برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از فناوری سنجش از دور و مبتنی بر بیلان انرژی است، که بر اساس ترکیبی از معادلات فیزیکی و روابط تجربی هستند. در مدل SEBAL، تبخیر-تعرق از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی با استفاده از رابطه بیلان انرژی سطحی محاسبه می‌گردد:

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad (8)$$

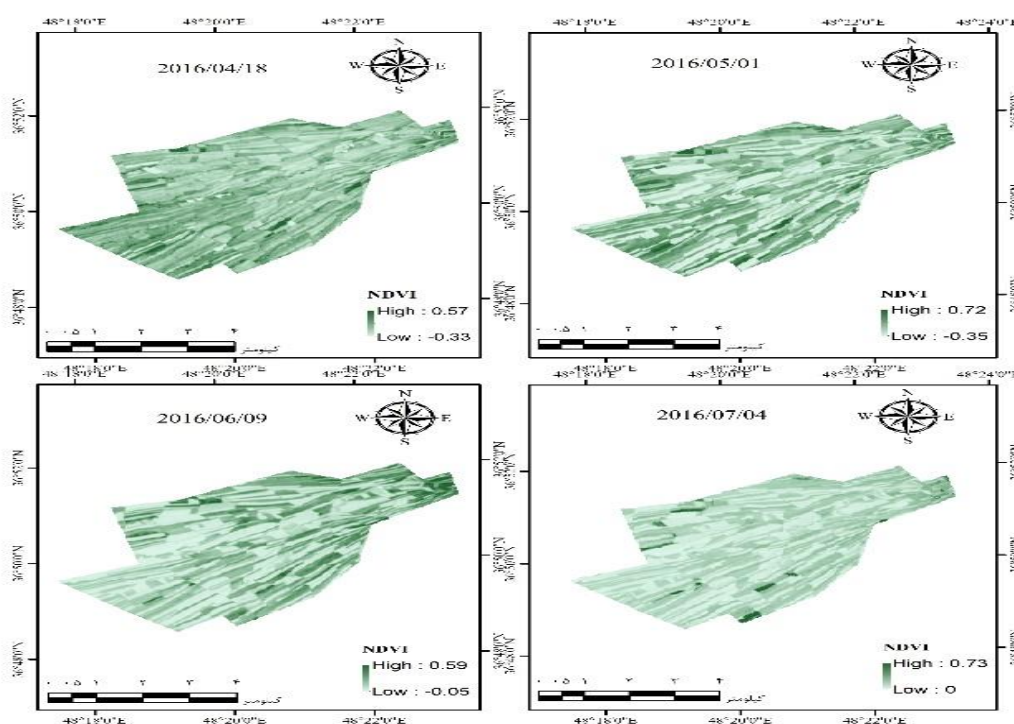
R_n تابش خالص، G شار گرمای خاک، H شار گرمای محسوس و λET شار گرمای نهان بوده و تمامی واحدها برحسب $\frac{W}{m^2}$ می‌باشند. برای برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی لازم است اجزای بیلان انرژی به طور جداگانه در رابطه (۸) محاسبه و سپس شار گرمای نهان برآورد گردد و در نهایت به تبخیر-تعرق (ET) تبدیل شود.

شار گرمای نهان، میزان تلفات گرما از سطح را به دلیل وجود پدیده تبخیر-تعرق نشان می‌دهد. از آنجاکه مقادیر R_n ، H و G به دست آمده مقادیر لحظه‌ای و برای زمان گذر ماهواره می‌باشند، مقدار شار گرمای نهان (λET) مقدار لحظه‌ای برای زمان گذر ماهواره

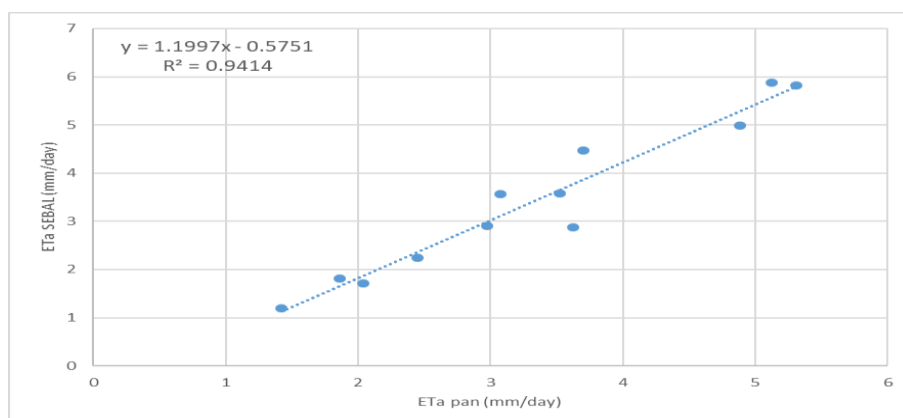
1- Normalized Difference Vegetation Index



شکل ۲- نقشه ETa و Ts روزانه منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای



شکل ۳- نقشه NDVI روزانه منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای



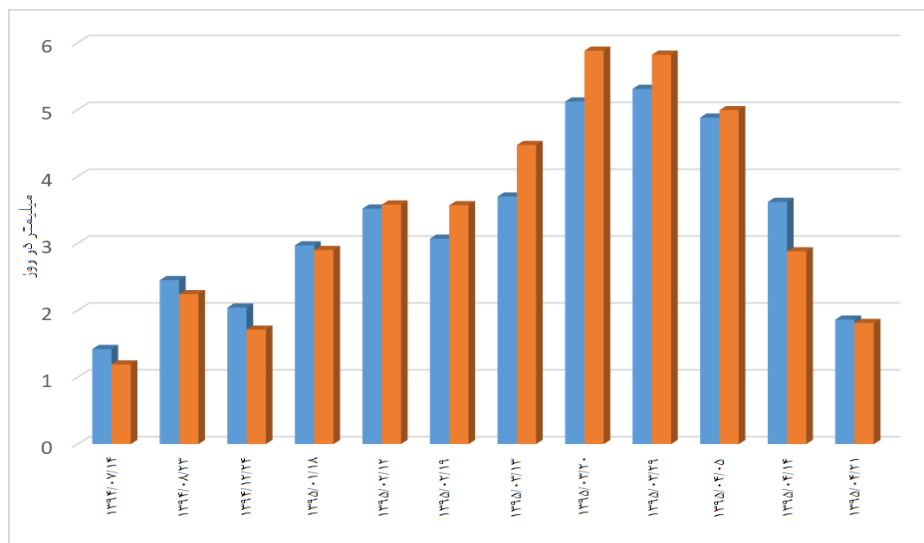
شکل ۴- نمودار مقایسه تبخیر-تعرق واقعی با تبخیر-تعرق محاسبه‌شده الگوریتم SEBAL

دست آمد که با توجه به پایین بودن درصد خطای مدل و در نظر گرفتن اینکه بخشی از خطا نیز مربوط به ایستگاه هواشناسی و داده‌های ورودی آن است، برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی اراضی در منطقه مورد مطالعه قابل قبول می‌باشد. در شکل ۴ همبستگی بالا در سطح ۹۹ درصد بین تبخیر-تعرق محاسبه‌شده با تشت تبخیر و تبخیر-تعرق محاسبه‌شده با الگوریتم SEBAL را مشاهده می‌نمایید.

$$ET_a = K_p * K_c * E_{pan} \quad (11)$$

با استفاده از نقشه شاخص NDVI در نرم‌افزار ArcMap، مزارع تحت کشت گندم از زمین‌های آیش و بایر (اراضی با NDVI بیش از ۰/۲) تفکیک گردید و نتایج تبخیر-تعرق روزانه واقعی اراضی تحت کشت گندم به دست آمد. با استفاده از دو آماره میانگین خطای مطلق^۱ و جذر میانگین مربعات خطا^۲، میزان دقت مدل برای برآورد تبخیر-تعرق تعیین شد. مقدار MAE=۰/۳۶ و RMSE=۰/۴۵ میلی‌متر به

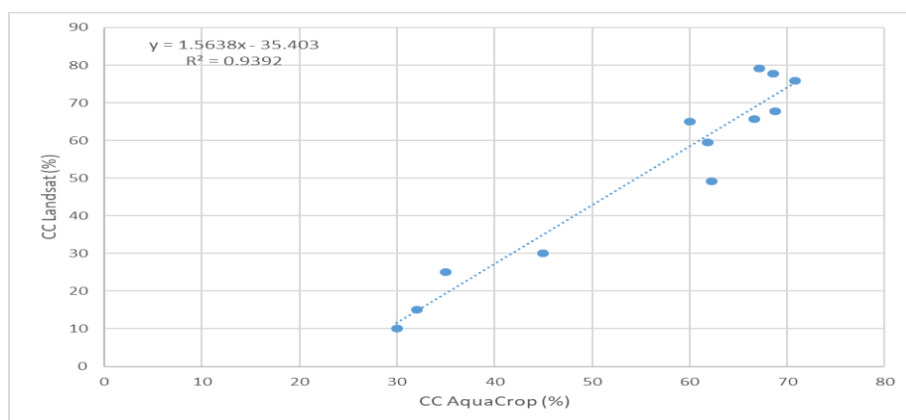
- 1- MAE
- 2- RMSE.



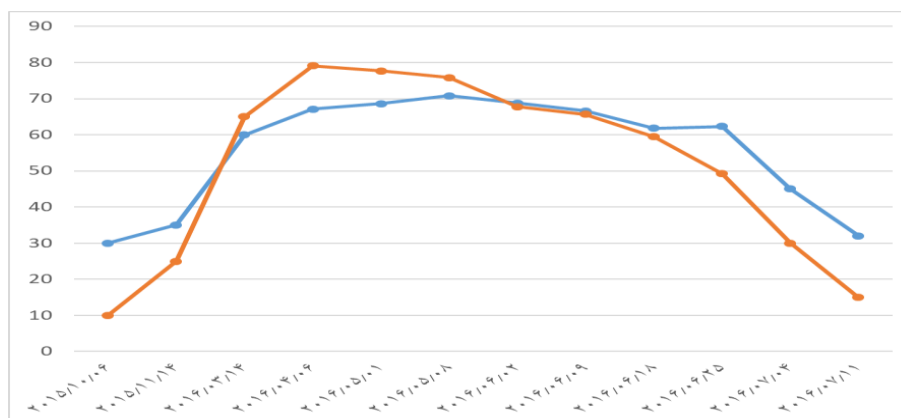
شکل ۵- مقایسه تبخیر-تعرق (میلی متر در روز) الگوریتم SEBAL (قرمز) با داده‌های تشت تبخیر (آبی)

پوشش سایه‌انداز گیاه محاسبه شده با تصاویر ماهواره‌ای و مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۱۱/۰۶ و ۹/۲ درصد به دست آمد. همان‌طور که در نمودار شکل ۶ مشاهده می‌شود مقادیر CC دارای همبستگی بالایی هستند و روند نسبتاً مشابهی در طول دوره رشد محصول دارند. با توجه به شکل ۷ در دو ماه اول فصل بهار مدل AquaCrop مقادیر CC را بیشتر از تصاویر ماهواره‌ای محاسبه کرده است و همچنین در ابتدا و انتهای دوره رشد یعنی فصل پاییز و ابتدای تابستان مقادیر محاسبه شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بیشتر از مقادیر محاسبه شده توسط مدل AquaCrop هستند که می‌تواند به دلیل وجود ناخالصی در منطقه مانند وجود بعضی بوته‌ها و درخت‌ها باشد که سبب بیشتر شدن مقدار LAI و به همان نسبت مقدار CC می‌شوند.

همان‌طور که در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود میزان تبخیر-تعرق هم‌زمان با افزایش دما و طول دوره رشد گیاه افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار خود در اواسط خردادماه می‌رسد و هم‌زمان با پایان دوره رشد گیاه و شروع پیری و رسیدن محصول علی‌رغم افزایش دما میزان تبخیر-تعرق کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در ابتدا دوره رشد یعنی تا اواخر فروردین، میزان تبخیر-تعرق مدل SEBAL کمتر از تبخیر-تعرق تشت تبخیر بوده و از اوایل اردیبهشت تا اواخر خرداد میزان تبخیر-تعرق تشت تبخیر بیشتر از تبخیر-تعرق مدل SEBAL به دست آمده است و از تیرماه دوباره به حالت اول برگشته است. در ادامه تصاویر ماهواره‌ای پوشش سایه‌انداز گیاه به دست آمده است و همچنین نمودارهای رابطه خطی و میزان همبستگی آن با CC مدل و روند آن در طول دوره رشد گیاه ارائه شده است. مقدار شاخص‌های آماری RMSE و MAE برای داده‌های



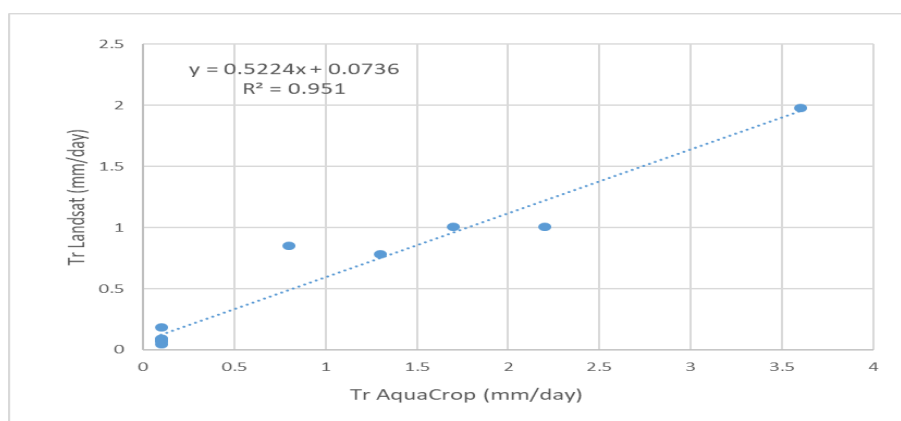
شکل ۶- نمودار پوشش سایه‌انداز گیاه محاسبه شده با تصاویر ماهواره‌ای و مدل AquaCrop



شکل ۷- نمودار روند CC در طول دوره رشد، محاسبه شده با تصاویر ماهواره‌ای (آبی) و مدل AquaCrop (قرمز)

داده‌های تعرق محاسبه شده با تصاویر ماهواره‌ای و مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۰/۶۳۳ و ۰/۳۵۹ میلی‌متر در روز به دست آمد. با توجه به نقشه‌ها هم‌زمان با رشد و توسعه گیاهان، افزایش دما و پوشش سایه‌انداز گیاه محصول، میزان تعرق گیاهان نیز افزایش یافته است و با رسیدن به انتهای دوره رشد گیاه، کاهش پوشش سایه‌انداز گیاه و شروع خشک شدن محصولات، میزان تعرق نیز کاهش می‌یابد.

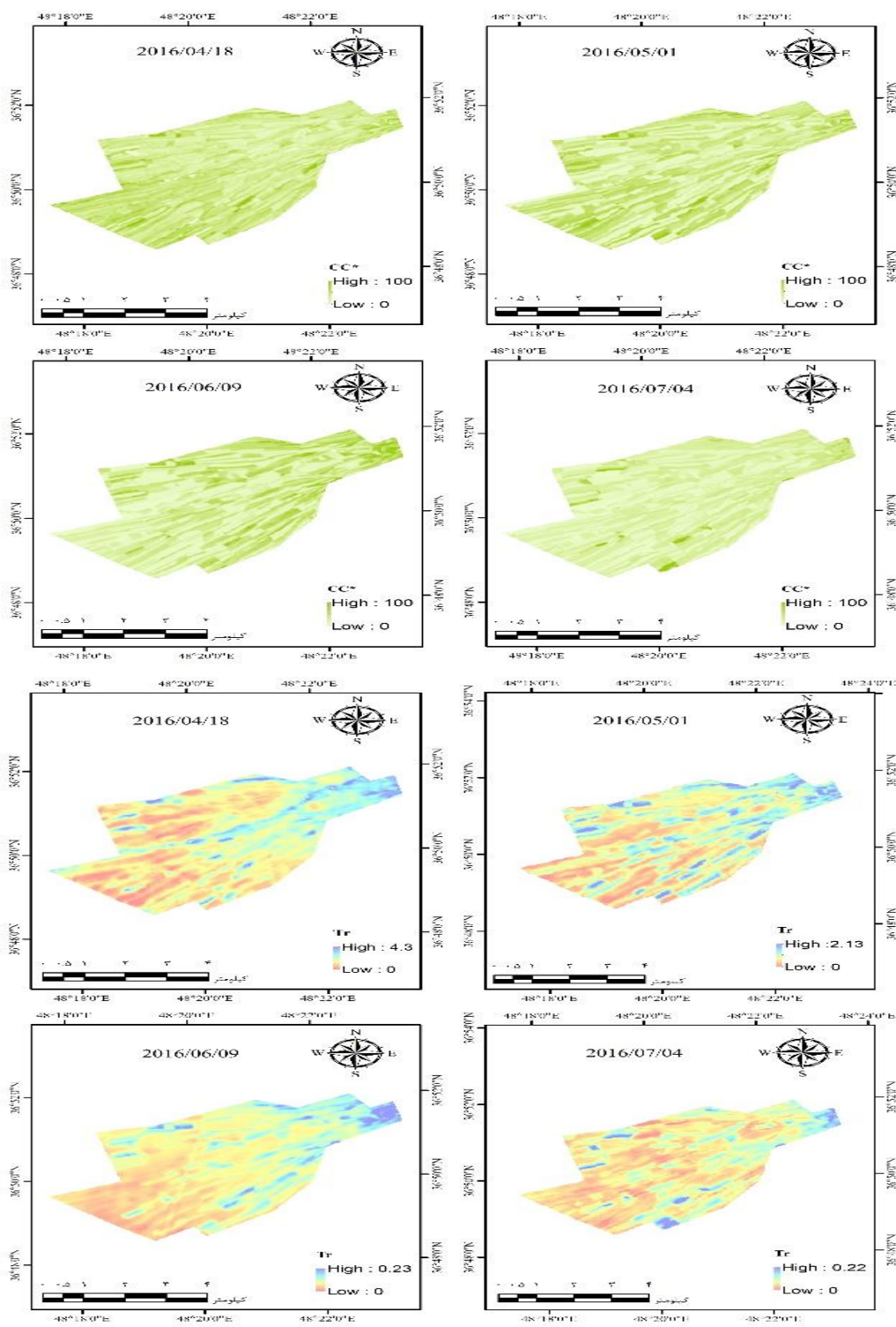
تعرق گیاه با استفاده از تبخیر-تعرق مرجع و ضرب آن در ضرایبی مانند ضریب تعرق گیاه (K_{cTr}) و با در نظر گرفتن ضریب تنش آبی (K_s) و تنش دمایی ($K_{sTr,x}$) محاسبه می‌شود (رابطه ۱). برای ایجاد تصویر تعرق (شکل ۹) از تصاویر تبخیر-تعرق روزانه و پوشش سایه‌انداز گیاه (CC) تولید شده در مراحل قبل استفاده شد و ضرایب موجود در فرمول از خروجی گرفته شده از مدل AquaCrop استخراج می‌شوند. مقدار شاخص‌های آماری RMSE و MAE برای مقایسه



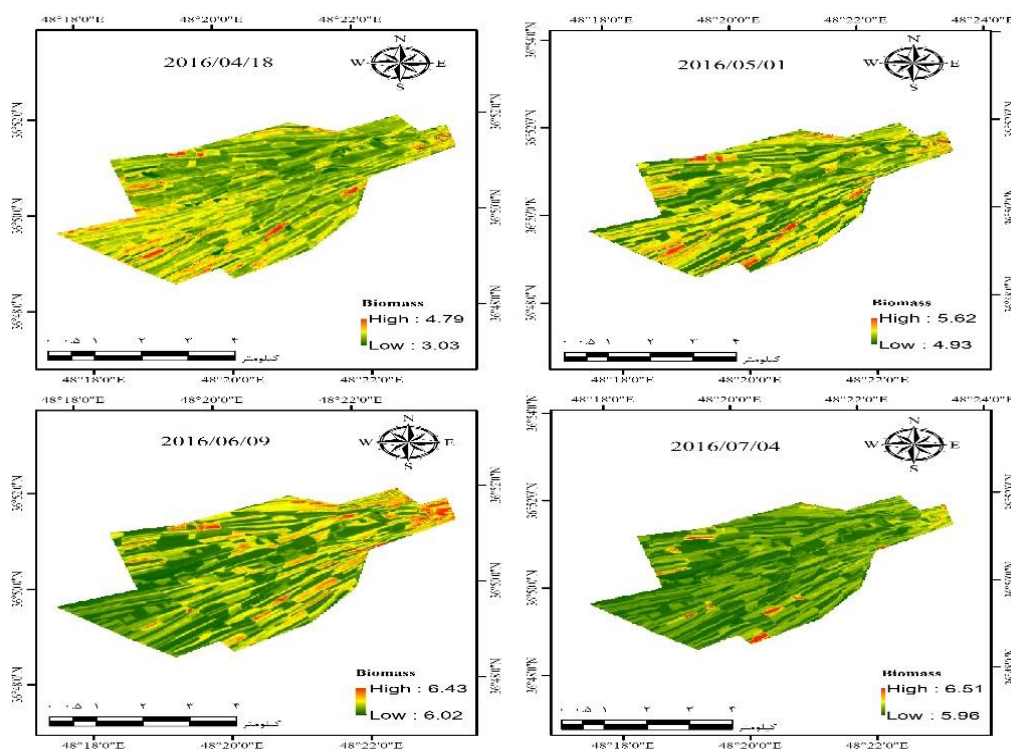
شکل ۸- نمودار تعرق محاسبه شده با تصاویر ماهواره‌ای و مدل AquaCrop

در اواخر اردیبهشت و وارد شدن به مرحله تشکیل دانه، میزان زیست توده تقریباً ثابت مانده است و تغییرات چشمگیری ندارد همچنین در اواخر فصل رشد به بیشترین مقدار خود رسیده است. با توجه به اینکه در این منطقه تشکیل دانه از اواخر اردیبهشت شروع می‌شود فقط می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای خرداد و تیر (شکل ۱۱) برای تولید نقشه میزان عملکرد محصول استفاده کرد و در اواسط تیر به حداکثر میزان تولید عملکرد محصول و میزان تولید محصول نهایی رسیده است.

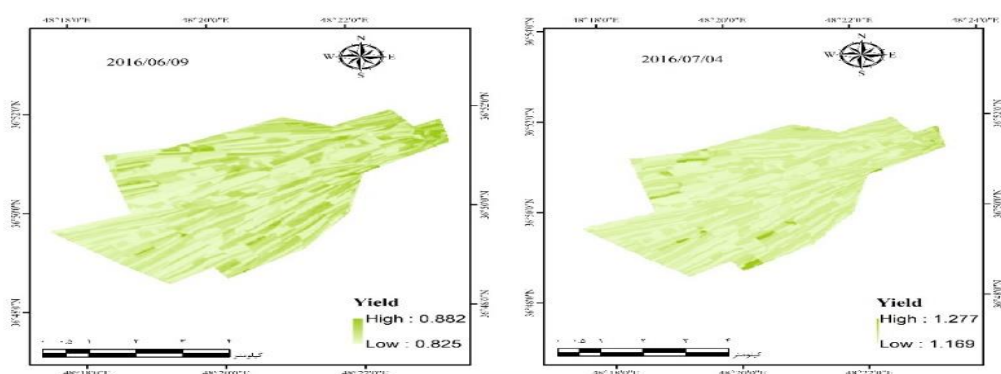
با توجه به اینکه تصاویر ماهواره‌ای برای تمام روزهای دوره رشد محصول موجود نیست باید مقادیر آن از روی تصاویر موجود برآورد شود. برای این کار میزان تعرق تاریخ‌های بدون تصویر ماهواره‌ای از روی رابطه بین تعرق تصاویر ماهواره‌ای موجود و تعرق محاسبه شده توسط مدل AquaCrop در روزهای متناظر با آن‌ها استفاده شد و در رابطه (۲) برای محاسبه میزان زیست توده لحاظ شد. با توجه به نقشه‌های خروجی (شکل ۱۰)، در اوایل فصل بهار و با مساعد شدن شرایط اقلیمی برای رشد گیاهان، میزان رشد رویشی بالا بوده و زیست توده نیز متناسب با آن رشد و افزایش سریع را نشان می‌دهد و



شکل ۹- نقشه Tr (mm/day) و CC* (%) منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای



شکل ۱۰- نقشه زیست توده B (ton/ha)



شکل ۱۱- نقشه عملکرد محصول (ton/ha)

عملکرد محصول واقعی منطقه نشان می‌دهد که با توجه به قدرت تفکیک مکانی و زمانی تصاویر و وسعت منطقه مطالعاتی، این نتایج قابل قبول هستند. نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مقداری بیش آوردی داشته است که می‌تواند به دلیل شبیه‌سازی رشد در شرایط بهینه و عدم وجود عوامل محدودکننده‌ی رشد از قبیل آفات، بیماری‌ها، کمبود مواد غذایی، عدم یکنواختی پوشش گیاهی و وجود ناخالصی‌هایی در پیکسل‌های مزرعه‌ای انتخاب شده باشد. این در حالی است که در واقعیت همواره عوامل محدودکننده رشد وجود دارند

میانگین عملکرد محصول در پیکسل‌های مزرعه‌ای محاسبه شد و برابر با ۱/۱۸۹ تن در هکتار به دست آمد. مقایسه نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای با آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی برای هر یک از شهرستان‌های استان (جدول ۱) و میانگین کل استانی با استفاده از شاخص آماری RMSE و MAE و میزان عملکرد محصول واقعی منطقه (۱-۱/۲ تن در هکتار) نشان می‌دهد که میزان برآورد برای عملکرد گندم در منطقه مورد مطالعه قابل قبول است. مقایسه میزان عملکرد محصول برآورد شده توسط تصاویر ماهواره‌ای با میزان

روی میزان زیست‌توده و عملکرد نهایی محصول می‌شود. در نتیجه عملکردی که مدل برآورد می‌کند در اکثر موارد بیشتر از واقعیت می‌باشد.

که باعث می‌شوند گیاه در حالت بهینه نباشد. از جمله این ناخالصی‌ها می‌توان به وجود علف‌های هرز در مزارع و همچنین وجود برخی درختان و بوته‌های پراکنده در برخی نقاط منطقه که سبب افزایش میزان شاخص NDVI، شاخص LAI، تعرق و متناسب با آن تأثیر

جدول ۱- میزان برداشت محصول گندم در شهرستان‌های استان زنجان برای سال زراعی ۹۴-۹۵

شهرستان	دیم (کیلوگرم در هکتار)	آبی (کیلوگرم در هکتار)	RMSE (کیلوگرم در هکتار)	MAE (کیلوگرم در هکتار)
ابهر	۱۱۵۰	۴۵۰۰		
زنجان	۱۰۵۰	۴۲۰۰		
سلطانیه	۱۱۰۰	۴۳۰۰		
خرمدره	۱۱۵۰	۴۵۰۰		
طارم	۱۲۰۰	۳۹۰۰		۸۱.۱۴
ماه‌نشان	۱۰۰۰	۳۶۰۰	۹۹.۹۷	
زرین‌دشت	-	۳۸۳۶		
کل استان زنجان	۱۱۲۷	۴۲۷۱		
مشاهداتی منطقه مطالعاتی	۱۲۰۰-۱۰۰۰	-		
برآورد تصاویر ماهواره‌ای	۱۱۸۹	-		

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مقداری بیش برآوردی داشته است که می‌تواند به دلیل شبیه‌سازی رشد در شرایط بهینه و عدم وجود عوامل محدودکننده‌ی رشد از قبیل آفات، بیماری‌ها و کمبود مواد غذایی و عدم یکنواختی پوشش گیاهی و وجود ناخالصی‌هایی در پیکسل‌های مزرعه‌ای انتخاب‌شده باشد.

تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های تبخیر-تعرق تحت تبخیر ایستگاه هواشناسی سینوپتیک زنجان با شاخص‌های آماری به‌دست‌آمده نشان‌دهنده قابل‌قبول بودن این نتایج است. با مقایسه نقشه‌های نواحی دارای پوشش گیاهی بالا، دما و آلبیدو پایین نسبت به سایر نواحی که دارای پوشش گیاهی پایین، دما و آلبیدو بالا هستند میزان تبخیر-تعرق بیشتری مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده مصرف بیشتر انرژی دریاقتی برای انجام تبخیر-تعرق در پوشش‌های گیاهی متراکم‌تر است. در این مطالعه برای شبیه‌سازی میزان عملکرد محصول از مدل رشد گیاهی AquaCrop و مراحل چهارگانه اجرایی آن استفاده شد و برای هر یک از این مراحل، ضرایب و داده‌های موردنیاز فرمول‌ها و همچنین تصاویر ماهواره‌ای موردنیاز محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقدار شاخص‌های آماری RMSE، MAE و R2 برای داده‌های پوشش سایه‌انداز گیاه و تعرق به دست آمد و نتایج نشان می‌دهد که مدل از دقت کافی برخوردار است. میانگین عملکرد محصول در پیکسل‌های مزرعه‌ای محاسبه شد که برابر ۱/۱۸۹ تن در هکتار به دست آمد. مقایسه نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای با آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی برای هر یک از شهرستان‌های استان زنجان، میانگین کل استانی با استفاده از شاخص آماری MAE و RMSE و میزان عملکرد محصول واقعی منطقه (۱-۱/۲ تن در هکتار) نشان می‌دهد که با توجه به قدرت تفکیک مکانی و زمانی تصاویر و وسعت منطقه مطالعاتی، این نتایج قابل‌قبول هستند.

منابع

- صدوقی، ل.، همایی، م.، نوروزی، ع. و اسدی کپورچال، س. ۱۳۹۵. برآورد عملکرد برنج با استفاده از مدل VSM و تصاویر ماهواره‌ای در استان گیلان. مجله علوم زراعی. ۶ (۳): ۳۹۷-۴۱۰.
- شمس نیا، س. و پیرمرادی، ن. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم به نوسانات اقلیمی با استفاده از مدل AquaCrop در استان فارس. مجله بین‌المللی نوآوری علوم مهندسی. ۲ (۴): ۴۱-۵۶.
- Anup, K. Prasad, a., Lim Chai, b., Ramesh, P., Singh, a. b., and Menas Kafatos, b. 2006. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. International journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 8(2): 26-33.
- Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology. 229: 87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M., Waters, R., Allen, R., Tasumi, M and Terzza, R. 2002. Advanced Training and User's Manual of Surface Energy Balance Algorithms for Land. Nasa EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through the Idaho

- the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*. 135: 61-72.
- Kroes, J. G. and Van Dam, J. C. 2003. Reference Manual SWAP version 3.03. (Ed). Alterra- report: Alterra Green World Research (773): 1-211.
- Li, Y., Zhou, Q., Zhou, J., Zhang, G., Chen, C. and Wang, J. 2014. Assimilating remote sensing information into a coupled hydrology-crop growth model to estimate regional maize yield in arid regions. *Ecological modelling*. 291: 15-27.
- Marjorie Battude., Ahmad, A. B., David, M., Jerome, C., Mireille, H., Claire, M. S., Valerie, L. D. and Valerie, D. 2016. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. 184: 668-681
- Mo, X. and Liu, S. 2001. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*. 109(10): 203-222.
- Nielsen, D.C., Miceli-Garcia, J.J. and Lyon, D.J. 2012. Canopy cover and leaf area index relationships for wheat, triticale, and corn. *Agronomy journal*. 104(6): 1569-1573.
- Padilla, F.L.M., Maas, S.J., González-Dugo, M.P., Mansilla, F., Rajan, N., Gavilán, P. and Domínguez, J. 2012. Monitoring regional wheat yield in Southern Spain using the GRAMI model and satellite imagery. *Field Crops Research*. 130: 145-154.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3): 438-447
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101(3): 438-447.
- Villalobos, F.J. and Fereres, E. 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. *Agronomy Journal*. 82(6): 1153-1159.
- Department of water Resources. 1: 1-98.
- Constantin, J., Magali W., Clément M., Bernard L., and Olivier T. 2015. The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 206: 55-68.
- Dente, L., Satalino, G., Mattia, F. and Rinaldi, M. 2008. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield. *Remote sensing of Environment*. 112(4): 1395-1407.
- Van Diepen, C.V., Wolf, J., Van Keulen, H. and Rappoldt, C. 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil use and management*. 5(1):16-24.
- Ferencz, C., Bogнар, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarcsai, G., Timár, G., Molnár, G., Pásztor, S.Z., Steinbach, P., Székely, B. and Ferencz, O.E. 2004. Crop yield estimation by satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. 25(20):4113-4149.
- Godwin, D.C. and Allan Jones, C. 1991. Nitrogen Dynamics in Soi-Plant Systems. *Modeling plant and soil systems*. 31: 287-321.
- Groten, S.M.E., 1993. NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing*. 14(8), pp.1495-1515.
- Hadria, R., Duchemin, B., Baup, F., Le Toan, T., Bouvet, A., Dedieu, G. and Le Page, M. 2009. Combined use of optical and radar satellite data for the detection of tillage and irrigation operations: case study in Central Morocco. *Agricultural water management*. 96(7): 1120-1127.
- Heng, L., K. Hsiao, T. Evett, S. Howell, and P. Steduto. 2009. Validation the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field Maize. *Agronomy Journal*. 101:488-498.
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P. 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101,448-459.
- Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., del Rio, S. 2014. Evaluation of

Evaluation of AquaCrop Model for Estimating Wheat Performance Using Landsat Satellite Images

A. Sardari¹, M. Homaei², A. A. Noroozi^{3*}

Received: Jul. 05, 2021

Accepted: Aug. 09, 2021

Abstract

Iran has a large area under cultivation, and reliable and timely crop yield forecasts are critical for making timely food supply decisions. As a result, several methods for estimating crop yield based on remote sensing observations have been published in recent years. One of the first and most critical steps in this study is to estimate real evapotranspiration using the SEBAL algorithm and high spatial and temporal resolution Landsat8 satellite images. The evapotranspiration obtained from satellite images was compared to evaporation data from the Zanjan synoptic meteorological station's evaporation pan, with statistical indicators (MAE=0/36, RMSE=0/45, R2 =0/94) indicating satisfactory results. The AquaCrop model and its four execution steps were used to simulate the product yield, and the necessary coefficients and data from the model were applied in satellite imagery calculations for each of these steps. For comparing CC data determined by satellite imagery and AquaCrop model, the RMSE, MAE, and R2 indices were respectively 11/06, 9/2 percent, and 0/94, and 0.633 and 0/359 mm/day and 0/95 for transpiration. The average yield was calculated to be 1/189 ton/ha in field pixels and its comparison with agricultural statistics and field studies (1-1/2 ton/ha) showed acceptable estimates for wheat yield in the area of this study.

Keywords: AquaCrop, Evapotranspiration, Landsat8, SEBAL, Wheat yield

1-M.Sc, Department of Irrigation and Drainage Science, Tarbiat Modares University, Tehran; Iran

2-Professor; Department of Soil Science; Tarbiat Modares University; Tehran; Iran

3-Associate Professor; Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI); AREEO, Tehran; Iran

(* Corresponding Author Email: noroozi.aa@gmail.com)