

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی مدل کارایی مصرف تابش در برآورد زیست توده و عملکرد گندم آبی بر اساس تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه)

فرشته نسیمی^۱، جواد بهمنش^{۲*}، وحید رضاوردی نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵

چکیده

با توجه به اینکه روش‌های سنتی اندازه‌گیری زمینی نیاز به هزینه، زمان و نیروی انسانی زیاد دارند تمایل به استفاده از روش‌های غیرمستقیم مانند سنجش از دور افزایش یافته است. بنابراین هدف از این پژوهش محاسبه زیست‌توده خشک، شاخص برداشت و عملکرد دانه گندم آبی با استفاده از سنجش از دور در حوضه دریاچه ارومیه بود. برای این منظور حوضه دریاچه ارومیه به شش زیرحوضه تقسیم گردید و از مدل کارایی مصرف تابش (RUE) استفاده شد. در این پژوهش از ۱۱۱۵ مزرعه گندم آبی استفاده شد. نتایج پایش مزارع و شاخص NDVI نشان داد که جوانه‌زنی گندم آبی در سطح حوضه به طور متوسط از تاریخ ۲۰ آبان ماه شروع شده و برداشت این محصول نهایتاً تا ۳۰ تیرماه ادامه داشته است. مقدار شاخص‌های ضریب همبستگی (R)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و ضریب باقی‌مانده (CRM) در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۹۰، ۰/۷۶، ۱۵ درصد و ۶/۳۸ درصد و در مرحله صحت سنجی به ترتیب برابر ۰/۹۲، ۰/۷۲، ۱۴ درصد و ۷/۲۱ درصد بدست آمد. بررسی شاخص برداشت (HI) نشان داد که میانگین این شاخص در زیرحوضه‌های مختلف بین ۰/۴۰ تا ۰/۴۵ است و به طور کلی میانگین این شاخص برای حوضه دریاچه ارومیه ۰/۴۲ بدست آمد. نتایج بررسی زیست‌توده و عملکرد دانه حاکی از تفاوت‌های چشم‌گیر در مقادیر آن‌ها در زیرحوضه‌های مختلف بود. بیشترین زیست‌توده و عملکرد دانه در زیرحوضه زرینه-سیمینه با میانگین ۱۲۰۹۸ و ۵۲۶۱ کیلوگرم بر هکتار و کمترین آن‌ها در زیرحوضه غرب-دریاچه با میانگین ۸۶۵۱ و ۳۷۲۳ کیلوگرم بر هکتار مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، سنجش از دور، شاخص برداشت، شاخص NDVI

مقدمه

محصولات استراتژیک کشاورزی است که در سطح وسیع در این حوضه کشت می‌شود. در راستای مدیریت مصرف آب، آگاهی دقیق از نیاز آبی، میزان تولید سالانه و در نهایت بهره‌وری مصرف آب گندم برای تصمیم‌گیری صحیح ضروری است (Mokhtari et al., 2019). اندازه‌گیری دقیق زیست‌توده خشک تولید شده و عملکرد دانه و به تبع آن محاسبه بهره‌وری مصرف آب محصول از اقدامات اولیه در پایش برنامه‌های کلان کشاورزی و بررسی نتایج تصمیمات اتخاذ شده در زمینه مدیریت آب و آبیاری می‌باشد (Venancio et al., 2020). روش‌های سنتی برآورد زیست‌توده و بهره‌وری آب، شامل استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی است که به دلیل هزینه‌بر، وقت‌گیر و طاقت‌فرسا بودن جمع‌آوری داده‌های زمینی کارایی چندانی ندارند (Zheng et al., 2016). این محدودیت‌ها موجب شده تمایل به استفاده از روش‌های غیرمستقیم مانند سنجش از دور در برآورد زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب افزایش یابد. مدل‌های مبتنی بر ماهواره، پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای نظارت بر تولید محصول دارند،

حوضه دریاچه ارومیه در چند دهه اخیر با بحران جدی منابع آب روبروست. این بحران به دلیل عوامل متعددی از جمله تغییر اقلیم و استفاده بی‌رویه از آب در بخش کشاورزی رخ داده است و نتیجه آن، عدم تعادل در تأمین و مصرف آب، کوچک شدن سریع سطح دریاچه را در پی داشته است (Tasumi, 2019). با این حال کشاورزی به‌طور گسترده در مناطق مختلف این حوضه صورت می‌گیرد و گندم یکی از

- ۱- کاندیدای دکتری مهندسی آب، گرایش آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 - ۲- استاد گروه مهندسی آب، گرایش آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 - ۳- استاد گروه مهندسی آب، گرایش آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- (*) نویسنده مسئول: (Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

این پژوهش در حوضه دریاچه ارومیه با مساحتی حدود ۵۱۸۰۰ کیلومتر مربع واقع در شمال غربی ایران انجام گرفت. حوضه دریاچه ارومیه در محدوده سه استان آذربایجان غربی (۴۶ درصد)، آذربایجان شرقی (۴۳ درصد) و کردستان (۱۱ درصد) قرار گرفته است و وسعت آن حدود ۳/۲ درصد از مساحت کل کشور را در بر می‌گیرد (شکل ۱). بر اساس طبقه‌بندی دمارتن، آب و هوای آن به عنوان سرد و نیمه خشک با میانگین دمای سالانه بین ۶ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد طبقه‌بندی می‌شود (خلیلی و همکاران ۱۴۰۱). میانگین بارندگی سالانه (در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲) در این منطقه بین ۱۸۰ تا ۴۴۰ میلی‌متر متغیر است (Barideh and Nasimi, 2022; Javadian et al., 2019).

زیرحوضه‌ها

حوضه دریاچه ارومیه به دلیل دارا بودن وسعت زیاد، در طول‌ها و عرض‌های جغرافیایی مختلفی واقع شده است. این موضوع باعث وجود شرایط آب و هوایی متنوع در مناطق مختلف آن شده است. همچنین وضعیت کیفیت خاک و توپوگرافی در سطح حوضه دریاچه ارومیه از تنوع بالایی برخوردار است. لذا با توجه به موارد ذکر شده، به منظور بررسی دقیق‌تر اهداف این پژوهش، این حوضه به شش زیرحوضه مطابق شکل (۱) تقسیم‌بندی گردید. برای تعیین زیرحوضه‌ها از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) و نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده گردید. نقشه DEM با پیکسل سایز ۳۰×۳۰ متر از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (United States Geological Survey) دریافت گردید. در مجموع حوضه دریاچه ارومیه به شش زیرحوضه با اسامی آجی-چای (۱۳۶۰۰۴۵ هکتار)، جنوب-سهند (۴۴۰۰۵۳ هکتار)، زرينه-سیمینه (۱۵۴۰۹۰۲ هکتار)، مه‌باد-گادار (۳۶۹۴۶۸ هکتار)، غرب-دریاچه (۵۱۸۳۹۴ هکتار) و شمال-دریاچه (۲۵۵۱۱۳ هکتار) تقسیم‌بندی گردید.

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی مورد نیاز از قبیل دمای کمینه، دمای بیشینه، سرعت باد، ساعات آفتابی و کمینه و بیشینه رطوبت از ۲۴ ایستگاه سینوپتیک موجود در سطح حوضه جمع‌آوری گردید. موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است.

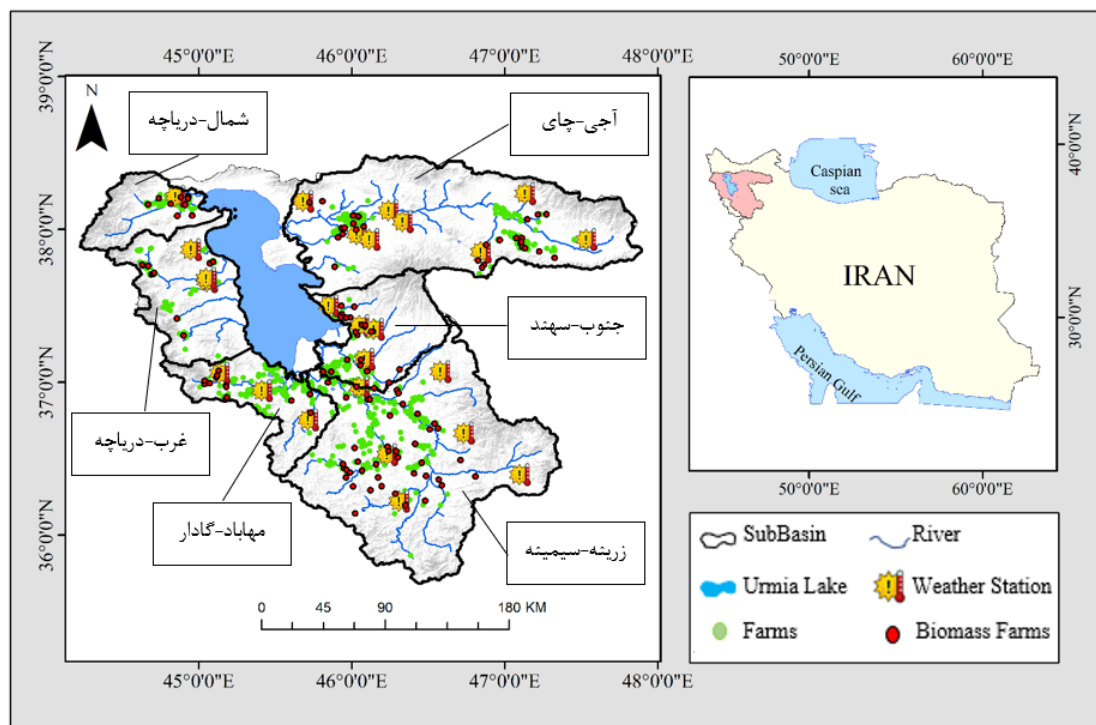
نمونه‌برداری

در این پژوهش تعداد ۱۱۱۵ مزرعه گندم آبی در سطح منطقه مورد مطالعه شناسایی و مختصات آن‌ها ثبت گردید. از این تعداد، ۱۲۹ مزرعه به صورت کاملاً تصادفی برای کالیبره کردن مدل کارایی

زیرا داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند اطلاعات مداوم رشد محصول را از نظر زمانی و مکانی در مقیاس بزرگ ارائه دهند (Fu et al., 2021; Lobell et al., 2003). روش‌های مختلفی برای تخمین عملکرد محصول و زیست‌توده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسعه داده شده است. روش کارایی مصرف تابش (RUE: Radiation Use Efficiency) یکی از روش‌های پرکاربرد در این زمینه است. RUE عبارت است از مقدار زیست‌توده تولید شده در واحد نور دریافت شده (Tripathi et al., 2018). ماتیت مفهوم RUE را به صورت نسبت بین مقدار ماده خشک (DM) تولید شده و مقدار تابش فعال فتوسنتزی دریافتی (IPAR: Intercepted Photosynthetic Active Radiation) انباشته شده تعریف کرد (Monteith, 1978). مقدار تابش فعال فتوسنتزی (PAR) دریافتی از خورشید و کارایی تاج پوشش گیاهی برای جذب PAR، اساساً بر میزان تجمع زیست‌توده تأثیر می‌گذارد (Mahakosee et al., 2022; Saha et al., 2022). بنابراین با کاربرد یک مدل مناسب می‌توان تجمع ماده خشک گیاه را به مقدار PAR جذب شده توسط تاج پوشش گیاهی و کارایی تبدیل PAR جذب شده به ماده خشک (گرم بر مگاژول) نسبت داد (Chavez et al., 2022; Monteith and Moss, 1977; Shi et al., 2022). نتایج پژوهش مختاری و همکاران در زمینه برآورد زیست‌توده گندم با روش‌های RUE، FAO 33 و SWAP نشان داد که روش RUE با خطای مطلق برابر با ۱/۷۹ و RMSE برابر با ۶۶۴/۶ کیلوگرم بر هکتار نسبت به سایر مدل‌ها برتری دارد (Mokhtari et al., 2021). محققان دیگر نیز بر دقت بالای این مدل در برآورد زیست‌توده خشک در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی تأکید کردند (Dwivedi et al., 2019; Fu et al., 2021; Lobell et al., 2003; Tripathi et al., 2018; Zheng et al., 2016). با توجه به موارد ذکر شده می‌توان فناوری سنجش از دور را راهکاری آسان، ارزان و سریع برای پایش پارامترهای مختلف از جمله تبخیر-تعرق، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب دانست که قادر است با حداقل نیروی انسانی، داده‌های مورد نیاز را به‌هنگام و در سطح وسیع برداشت نماید (Hassan et al., 2022; Servia et al., 2022). بنابراین از آنجایی که بررسی و مقایسه زیست‌توده و عملکرد دانه محصول گندم آبی در وسعت حوضه، جهت مدیریت بهینه مصرف آب در شرایط بحرانی کنونی امری ضروری تلقی می‌شود، لذا هدف از این پژوهش محاسبه زیست‌توده خشک، شاخص برداشت و عملکرد دانه گندم آبی با بهره‌گیری از روش‌های سنجش از دور و همچنین صحت‌سنجی الگوریتم کارایی مصرف تابش برای محاسبه زیست‌توده در این حوضه بود.

در جدول (۱) تعداد کل مزارع گندم آبی هر زیرحوضه، تعداد مزارع منتخب برای بررسی زیست توده و عملکرد دانه ارائه شده است. همچنین پراکنندگی این مزارع در شکل (۱) نشان داده شده است.

مصرف تابش (RUE) برای محاسبه زیست توده و تعیین شاخص برداشت (HI) گندم آبی، از میان کل مزارع مورد بررسی انتخاب و اقدام به برداشت نمونه‌های زمینی زیست توده و عملکرد دانه گردید.



شکل ۱- موقعیت مکانی زیرحوضه‌ها، ایستگاه‌های هواشناسی و مزارع مورد بررسی محدوده مطالعاتی

جدول ۱- تعداد کل اراضی و اراضی منتخب برای برداشت نمونه در هر زیرحوضه

مجموع	شمال-دریاچه	غرب-دریاچه	مهباد-گادار	زرینه-سیمینه	جنوب-سهند	آجی-چای	مزارع مورد مطالعه
۱۱۱۵	۸۷	۱۱۰	۱۷۱	۲۹۰	۲۱۳	۲۴۴	مزارع گندم آبی
۱۲۹	۹	۱۱	۱۳	۴۲	۲۲	۳۲	زیست توده

تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ استفاده گردید. تصاویر لندست ۸ و ۹ هر ۱۶ روز یکبار در دسترس هستند و با ترکیب تصاویر این دو ماهواره امکان انجام محاسبات در هر هشت روز فراهم می‌گردد. اما گاهی به دلیل وجود پوشش ابر زیاد استفاده از همه تصاویر این ماهواره‌ها امکان‌پذیر نیست. لذا همه تصاویر موجود در بازه کاشت تا برداشت گیاه گندم آبی در حوضه دریاچه ارومیه بررسی و تصاویری که قابل استفاده بودند شناسایی شدند که در نهایت تعداد ۴۳ تصویر ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ انتخاب گردید.

برای برداشت نمونه‌های زیست توده ابتدا تصاویر ماهواره‌ای که سطح منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌داد تهیه شد. سپس مرز ۱۲۹ مزرعه منتخب روی تصاویر قرار گرفت و برای هر مزرعه محل برداشت نمونه‌ها با انتخاب یک پیکسل از تصاویر ماهواره‌ای که به صورت کامل در داخل مرز مزرعه قرار داشت مشخص گردید. نمونه‌های زیست توده در انتهای دوره رشد گیاه و نزدیک به زمان برداشت محصول، با استفاده از کودرات با ابعاد $0/5 \times 0/5$ متر برداشت گردید. برای این منظور کودرات در دو نقطه در داخل پیکسل انتخاب شده برای هر مزرعه قرار گرفت و نمونه‌ها از محل طوقه بریده و جمع‌آوری شدند. سپس این نمونه‌ها به مدت ۲۰ روز در معرض نور مستقیم خورشید قرار گرفتند و وزن نمونه‌های خشک و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد.

مدل کارایی مصرف تابش (RUE)

برای محاسبه زیست توده خشک بالای سطح زمین (AGB) از الگوریتم کارایی مصرف تابش (RUE) استفاده گردید. برای محاسبه AGB باید مقادیر تنش آبی، انرژی استفاده شده برای فتوسنتز و کارایی مصرف تابش محاسبه گردد.

محاسبه تنش آبی

در این روش برای محاسبه تنش آبی (EF)، ابتدا انرژی مصرف شده توسط محصولات تحت شرایط بالقوه (λET_p) به صورت معادله (۱) که توسط پریستلی و تیلور (Priestley and Taylor, 1972) ارائه شده است، در نظر گرفته شد.

$$\lambda ET_p = \alpha \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n - G) \quad (1)$$

که در آن، R_n تابش خالص (W/m^2)، G شار حرارتی خاک (W/m^2)، Δ شیب فشار بخار ($kPa/^\circ C$)، γ ثابت سایکرومتریک ($kPa/^\circ C$) و α ضریب Priestly-Taylor است که ET_p را با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی محاسبه می‌کند. در این مطالعه طبق پیشنهاد پریستلی و تیلور، مقدار $1/26$ برای α در نظر گرفته شد (Mokhtari et al., 2021).

جیانگ و ایسلام (Jiang and Islam, 1999) برای محاسبه انرژی مصرف شده توسط محصولات در شرایط واقعی (λET_a) معادله‌ای مشابه پریستلی و تیلور به صورت زیر ارائه دادند (معادله ۲).

$$\lambda ET_a = \varphi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n - G) \quad (2)$$

که در آن φ یک پارامتر اثر ترکیبی بدون بعد است و مقاومت آیرودینامیکی را محاسبه می‌کند. برای محاسبه φ که مشابه α عمل می‌کند (با این تفاوت که α مربوط به شرایط پتانسیل بوده و برای سطوح مرطوب به کار می‌رود درحالی‌که φ نماینده مقادیر مختلف رطوبت خاک است و برای شرایط واقعی صدق می‌کند)، دو معادله λET_p و λET_a بر یکدیگر تقسیم شدند و مقدار φ به صورت معادله (۳) محاسبه شد.

$$\varphi = \alpha \times K_C \quad (3)$$

در نهایت، EF که نشان‌دهنده مقدار تنش آبی است که به دلیل کمبود رطوبت خاک به محصول وارد می‌شود (Mokhtari et al., 2021)، به صورت زیر محاسبه شد (رابطه ۴).

$$EF = \varphi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad (4)$$

برای محاسبه K_C از الگوریتم سیال استفاده گردید. با توجه به اینکه مراحل محاسباتی این الگوریتم بسیار طولانی بوده و در مقالات مختلف، نحوه محاسبه آن به طور کامل شرح داده شده است، از تکرار آن در این بخش صرف نظر گردید. لذا جهت اطلاعات بیشتر در

این زمینه، خوانندگان می‌توانید به Allen et al., 2002 مراجعه کنید.

محاسبه مقدار انرژی استفاده شده برای فتوسنتز

زیست توده خشک بالای سطح زمین متناسب با مقدار تابش فعال فتوسنتزی جذب شده (APAR) توسط گیاه است که با واحد انرژی (MJ/m^2) بیان شده و با رابطه زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۵).

$$APAR = fPAR \times PAR \quad (5)$$

در این معادله تابش فعال فتوسنتزی [$PAR (MJ/m^2)$] نماینده مقدار کل انرژی است که برای فرآیند فتوسنتز به محصول می‌رسد. مقدار این پارامتر با ضرب 0.48 در تابش ورودی به زمین محاسبه می‌شود (Chavez et al., 2022; $PAR = 0.48 \times R_{SL}$; Mokhtari et al., 2021; Rinaldi and Garofalo, 2011). نسبت انرژی جذب شده به کل انرژی رسیده به زمین $fPAR$ نامیده می‌شود که با استفاده از معادله (۶) محاسبه می‌گردد. به عبارتی $fPAR$ کسری از PAR است که توسط محصول جذب می‌شود و در فرآیند فتوسنتز به زیست توده تبدیل می‌شود.

$$fPAR = \frac{(SI - SI_{min})(fPAR_{max} - fPAR_{min})}{(SI_{max} - SI_{min}) + fPAR_{min}} \quad (6)$$

در رابطه بالا، SI شاخص طیفی ماهواره‌ای (شاخص گیاهی) می‌باشد که از بین انواع آن، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) به طور گسترده برای تخمین $fPAR$ استفاده می‌شود. SI_{max} و SI_{min} به ترتیب کمینه و بیشینه شاخص مورد استفاده در دوره رشد گیاه هستند. $fPAR_{max}$ و $fPAR_{min}$ نیز به ترتیب 0.1 و 0.95 در نظر گرفته شدند (Lobell et al., 2003; Mokhtari et al., 2021; Zheng et al., 2016).

محاسبه کارایی مصرف تابش

در این مرحله، برای تخمین زیست توده خشک در شرایط واقعی، کارایی مصرف تابش با دخالت تنش آبی گیاه ناشی از کمبود رطوبت خاک و سایر پارامترها با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد.

$$RUE = RUE_{max} \times EF \times T_1 \times T_2 \quad (7)$$

$$T_1 = 0.8 + 0.02 \times T_{opt} - 0.0005 \times T_{opt}^2 \quad (8)$$

$$T_2 = 1.192 \times \left(\frac{1}{1 + \exp(0.2 \times (T_{opt} - 10 - T_{month}))} \right) \times \left(\frac{1}{1 + \exp(0.3 \times (-T_{opt} - 10 + T_{month}))} \right) \quad (9)$$

در معادلات (۷) تا (۹)، RUE_{max} حداکثر ضریب تبدیل برای AGB است که برای گیاهان C_3 و C_4 به ترتیب $2/5$ و 4 گرم بر مگاژول بر روز در نظر گرفته می‌شود (Mokhtari et al., 2021). T_1 و T_2 نیز که با عنوان تناسب دما تعریف می‌شوند، بر اساس دمای

مقادیر برآورد شده و \bar{O} میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. ضریب همبستگی $[R (-)]$ بیان‌گر روند برآوردها می‌باشد و نشان می‌دهد که مقادیر دو یا چند متغیر در یک مجموعه داده چقدر شبیه است. ضریب همبستگی عددی بین -1 و 1 است و مقادیر نزدیک به واحد عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده $[nRMSE (\%)]$ تفاوت نسبی داده‌های برآورد شده در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. اگر $nRMSE \leq 10\%$ باشد، تخمین عالی در نظر گرفته می‌شود. مقادیر بین 10% تا 20% و 20% تا 30% به ترتیب نشان‌گر وضعیت خوب و متوسط مدل در برآورد بوده و اگر $nRMSE > 30\%$ باشد، نشان‌دهنده عدم اطمینان به مدل است. ضریب نش-ساتکلیف $[NSE (-)]$ نشان‌دهنده اختلاف نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده است. بازه تغییرات ضریب NSE از $-\infty$ تا 1 متغیر بوده و اگر مقدار آن برابر 1 باشد، بیان‌گر تطابق کامل بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد. اگر $1 < NSE < 0.75$ باشد، نتایج شبیه‌سازی خوب و چنانچه $0.75 < NSE < 0.36$ باشد، نتایج مدل خوب تا متوسط توصیف می‌شود. ضریب باقی‌مانده $[CRM (\%)]$ نشان‌دهنده کم برآوردی یا بیش برآوردی مدل است. مقادیر مثبت این آماره بیان‌گر بیش برآوردی و مقادیر منفی بیان‌گر کم برآوردی مدل می‌باشد. هر چه مقدار شاخص CRM به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده اختلاف اندک و تطابق بالای مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل است (Barideh et al., 2022; Besharat et al., 2020; Duc and Sawada, 2023; Moriasi et al., 2007; Nash and Sutcliffe, 1970).

نتایج و بحث

فنولوژی گیاه

برای تعیین مراحل چهارگانه رشد گیاه (مرحله اولیه، توسعه، میانی و پایانی) از اطلاعات محلی، نشریه‌های مراکز تحقیقات کشاورزی و سری زمانی شاخص گیاهی NDVI استفاده گردید. بر اساس شاخص NDVI عملیات خاک‌ورزی و کاشت گندم در زیرحوضه‌های آجی-چای و شمال-دریاچه زودتر از بقیه زیرحوضه‌ها و در اوایل آبان صورت گرفته است. سپس با فاصله زمانی حدوداً ۱۰ روزه این عملیات در زیرحوضه‌های زرنه-سیمینه و غرب-دریاچه شروع می‌شود. پس از آن در دهه سوم آبان عملیات کاشت در زیرحوضه‌های مه‌باد-گادار و جنوب-سهند صورت گرفته است.

اختلاف در زمان کاشت در زیرحوضه‌ها مربوط به شرایط دمایی آن‌ها بود. میانگین دمای زیرحوضه جنوب-سهند بالاتر از سایر زیرحوضه‌ها بود و به همین دلیل زمان کاشت گندم در این زیرحوضه با تأخیر صورت گرفته است. همچنین دمای میانگین روزانه آجی-

ماهانه هوا (T_{month}) و دمای هوا در ماه حداکثر LAI (T_{opt}) محاسبه می‌شوند (Awad, 2019).

محاسبه زیست‌توده خشک بالای سطح زمین

در نهایت با محاسبه پارامترهای ذکر شده، زیست‌توده خشک بالای سطح زمین با استفاده از رابطه (۱۰) به صورت زیر محاسبه شد.

$$AGB = \sum_{i=1}^n (APAR_i \times RUE_i \times \Delta t) \quad (10)$$

که در آن، Δt فاصله زمانی بین تصویر شماره i و $i-1$ (day)، n تعداد کل تصاویر معتبر در طول یک فصل رشد و RUE_i کارایی مصرف تابش مربوط به تصویر i است که تابعی از EF می‌باشد (Dwivedi et al., 2019).

عملکرد دانه

در مرحله بعد برای تبدیل مقدار زیست‌توده به عملکرد دانه از شاخص برداشت (HI) استفاده شد. شاخص برداشت نشان‌دهنده این است که چند درصد از زیست‌توده به عملکرد دانه تبدیل می‌شود. این شاخص از تقسیم مقدار زیست‌توده به عملکرد دانه اندازه‌گیری شده برای هر زیرحوضه (جدول ۱) محاسبه شد. در ادامه مقدار زیست‌توده برآورد شده با RUE با استفاده از این شاخص به عملکرد دانه تبدیل گردید.

نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش از نرم‌افزارهای Microsoft Excel و ArcGIS Pro v. 3.1 و زبان برنامه‌نویسی Python v. 3.10 و کتابخانه‌های OS، Math، Grass-session، Pandas، Numpy و Matplotlib استفاده گردید.

شاخص‌های آماری

در این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد مدل RUE در تخمین زیست‌توده خشک محصول گندم آبی و همچنین بررسی ضرایب گیاهی برآورد شده به روش سنجش از دور، از معادلات (۱۱) تا (۱۴) استفاده گردید.

$$R = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (11)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (12)$$

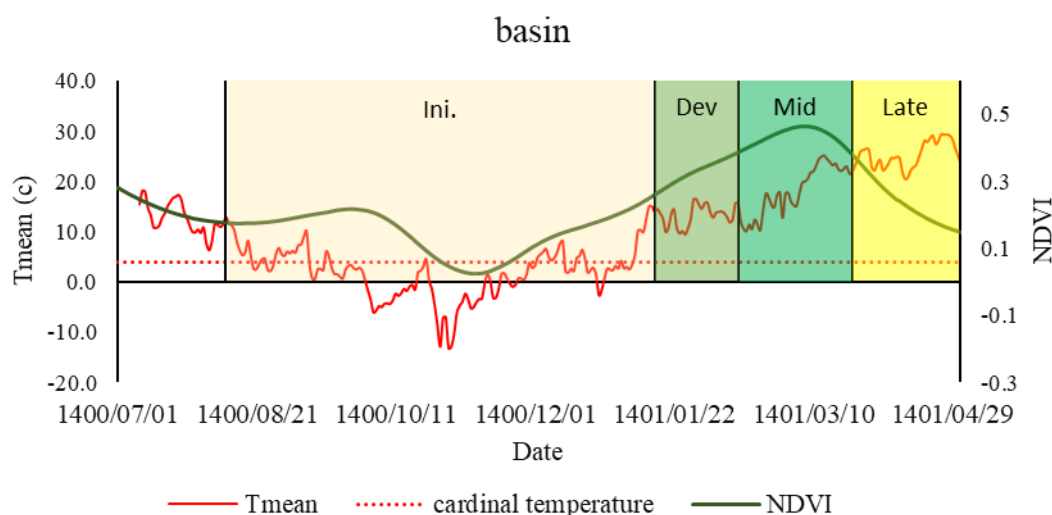
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (14)$$

در این روابط، n تعداد داده‌ها، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، P_i

کلی در حوضه دریاچه ارومیه و در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ مرحله جوانه‌زنی محصول گندم آبی از تاریخ ۲۰ آبان ماه شروع شده و تا ۱۵ فروردین ادامه داشته است. مرحله توسعه به مدت ۳۰ روز و تا ۱۵ اردیبهشت و مرحله میانی به مدت ۴۰ روز و تا ۲۵ خرداد ماه به طول انجامیده است. برداشت محصول گندم آبی نیز تا ۳۰ تیرماه ادامه داشته است.

چای، غرب-دریاچه و شمال-دریاچه نسبت به سایر زیرحوضه‌ها کمتر بود که این موضوع می‌تواند دلیل کشت زود هنگام گندم در این زیرحوضه‌ها باشد. به طور کلی مراحل رشد گیاه از شرایط دمایی تبعیت کرده و با کاهش دما به زیر دمای کاردینال رشد گیاه متوقف شده است. میانگین مراحل مختلف رشد گیاهی در حوضه دریاچه ارومیه در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس این شکل به طور



شکل ۲- سری زمانی شاخص NDVI، میانگین دمای روزانه، دمای کاردینال و مراحل مختلف رشد گندم آبی در حوضه دریاچه ارومیه

زیست توده مزارع مورد استفاده قرار گیرد. نتایج پژوهش مختاری و همکاران در زمینه برآورد زیست توده گندم با روش‌های RUE، FAO 33 و SWAP نیز نشان داد که روش RUE با خطای مطلق برابر با ۱/۷۹ و RMSE برابر با ۶۶۴/۶ کیلوگرم بر هکتار نسبت به سایر مدل‌ها برتری دارد (Mokhtari et al., 2021). محققان دیگر نیز بر دقت بالای این مدل در برآورد زیست توده خشک در مقایسه با اندازه-گیری‌های زمینی تأکید کردند (Dwivedi et al., 2019; Fu et al., 2021; Lobell et al., 2003; Tripathi et al., 2018; Zheng et al., 2016).

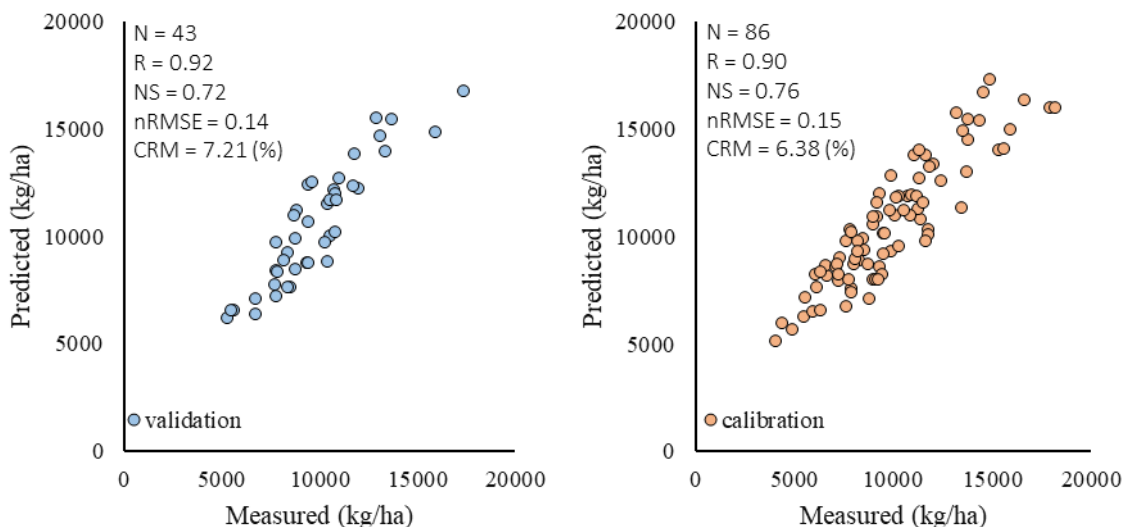
شاخص برداشت (HI)

برای تبدیل مقدار زیست توده به عملکرد دانه از شاخص برداشت استفاده شد. به عبارت ساده شاخص برداشت نشان‌دهنده این است که چند درصد از زیست توده به عملکرد دانه تبدیل می‌شود. در این پژوهش برای تعیین شاخص برداشت در هر زیرحوضه از نمونه برداری مقدار زیست توده و عملکرد دانه استفاده گردید. در زیرحوضه آجی-چای تعداد ۳۲ نمونه زمینی مورد استفاده قرار گرفت. مقدار زیست توده این مزارع در بازه ۵۳۰۹ تا ۱۴۵۸۹ و میانگین ۹۷۳۶ کیلوگرم بر هکتار بود.

برآورد زیست توده و عملکرد محصول

واسنجی و صحت سنجی مدل RUE

در شکل (۳) مقادیر شاخص‌های آماری برای مرحله واسنجی و صحت سنجی مدل RUE نشان داده شده است. بر اساس این شکل مقدار شاخص‌های ضریب همبستگی (R)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و ضریب باقی مانده (CRM) در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۹۰، ۰/۷۶، ۱۵ درصد و ۶/۳۸ درصد و در مرحله صحت سنجی به ترتیب برابر ۰/۹۲، ۰/۷۲، ۱۴ درصد و ۷/۲۱ درصد بدست آمد. دقت این مدل در هر دو مرحله بر اساس شاخص‌های NSE و nRMSE در رتبه خوب قرار گرفت که به طور کلی نشان دهنده کارایی مناسب این مدل بود. شاخص CRM نشان داد که در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی مدل RUE دارای بیش برآوردی به میزان ۶/۳۸ و ۷/۲۱ درصد است. همچنین مقادیر ضریب همبستگی روند خطی با دقت بالایی را بیان می‌کنند که بیان گر قابلیت بالای مدل RUE در برآورد زیست توده می‌باشد. به طور کلی همه شاخص‌های آماری نشان دادند که این مدل در مرحله صحت سنجی دقت کاملاً مشابهی با مرحله واسنجی داشته است و بنابراین می‌تواند با اطمینان برای برآورد



شکل ۳- مقادیر شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (R)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و ضریب باقی‌مانده (CRM) در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

شد. در این نمونه‌ها مقدار زیست‌توده از ۷۶۲۸ تا ۱۱۹۸۰ و مقدار عملکرد دانه از ۲۸۲۸ تا ۴۹۴۱ کیلوگرم بر هکتار متغیر بود. میانگین مقدار زیست‌توده و عملکرد دانه نیز به ترتیب برابر ۱۰۴۶۹ و ۴۱۲۹ کیلوگرم بر هکتار محاسبه شد. شاخص برداشت‌های بدست آمده از این مقادیر در بازه ۰/۳۲ تا ۰/۴۸ قرار داشتند که میانگین آن‌ها برابر ۰/۴۰ محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت. در زیرحوضه غرب-دریاچه تعداد ۱۱ نمونه از مزارع مختلف جمع‌آوری گردید. مقدار زیست‌توده این مزارع از ۶۳۶۱ تا ۱۱۶۷۹ کیلوگرم بر هکتار نوسان داشت که میانگین آن‌ها برابر ۸۷۴۱ کیلوگرم بر هکتار بود. مقدار عملکرد نیز در بازه ۲۹۴۴ تا ۵۰۹۸ کیلوگرم بر هکتار اندازه‌گیری شد که میانگین آن‌ها برابر ۳۷۵۸ کیلوگرم بر هکتار بدست آمد. شاخص برداشت این مزارع از ۰/۳۷ تا ۰/۵۰ متغیر بود و میانگین این زیرحوضه برابر ۰/۴۳ در نظر گرفته شد. در نهایت تعداد ۹ نمونه زمینی در زیرحوضه شمال-دریاچه اندازه‌گیری و جمع‌آوری شد. مقادیر زیست‌توده از ۶۷۷۴ تا ۱۱۷۹۷ کیلوگرم بر هکتار و مقادیر عملکرد از ۲۸۲۵ تا ۴۰۸۳ کیلوگرم بر هکتار متغیر بودند. میانگین این بازه‌ها به ترتیب برابر ۸۸۸۱ و ۳۵۶۱ کیلوگرم بر هکتار بدست آمد. شاخص برداشت این زیرحوضه در بازه ۰/۳۳ تا ۰/۴۷ قرار داشت و میانگین آن برابر ۰/۴۰ محاسبه گردید.

به طور کلی در این پژوهش از ۱۲۹ نمونه اندازه‌گیری شده در کل حوضه دریاچه ارومیه استفاده گردید و مقدار میانگین زیست‌توده، عملکرد دانه و شاخص برداشت کل حوضه به ترتیب برابر ۹۵۷۷، ۴۰۰۷ کیلوگرم بر هکتار و ۰/۴۲ بدست آمد. عنایب میلانی و

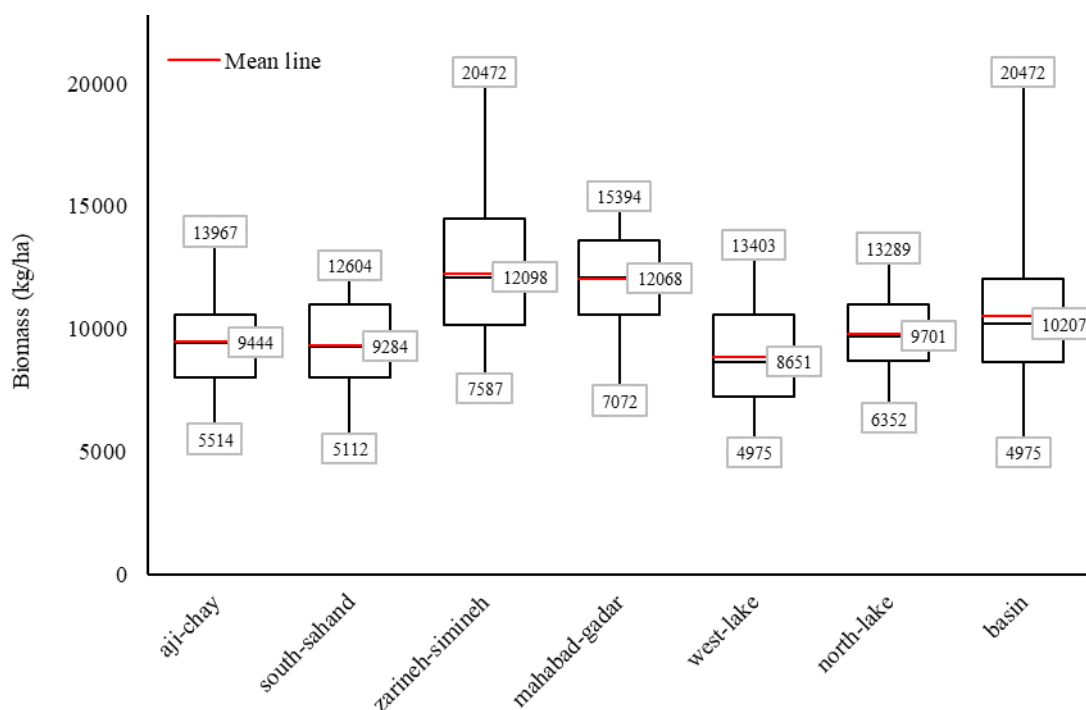
همچنین مقدار عملکرد دانه این زیرحوضه از ۲۳۶۷ تا ۶۸۰۹ کیلوگرم بر هکتار متغیر بود و میانگین آن‌ها برابر ۳۹۹۵ کیلوگرم بر هکتار محاسبه گردید. با استفاده از این مقادیر شاخص برداشت در بازه ۰/۳۰ تا ۰/۴۸ بدست آمد و میانگین آن برابر ۰/۴۱ محاسبه و برای برآورد عملکرد سایر مزارع این زیرحوضه مورد استفاده قرار گرفت. در زیرحوضه جنوب-سهند از تعداد ۲۲ نمونه اندازه‌گیری با بازه زیست‌توده ۴۰۸۴ تا ۱۱۸۱۱ کیلوگرم بر هکتار و بازه عملکرد دانه ۲۰۰۰ تا ۵۰۲۰ کیلوگرم بر هکتار استفاده گردید. میانگین زیست‌توده و عملکرد این نمونه‌ها به ترتیب برابر ۸۱۰۶ و ۳۶۴۷ کیلوگرم بر هکتار بدست آمد. بازه تغییرات شاخص برداشت این زیرحوضه از ۰/۳۰ تا ۰/۵۸ متغیر بود و در نهایت از میانگین این بازه با مقدار ۰/۴۵ به عنوان شاخص برداشت این زیرحوضه استفاده گردید. زیرحوضه زرینه-سیمینه که در جنوب حوضه دریاچه ارومیه قرار دارد، دارای بیشترین تعداد نمونه زمینی بود. در این زیرحوضه از ۴۲ مزرعه گندم آبی نمونه‌برداری شد و مقادیر بیومس و عملکرد دانه محاسبه گردید. زیست‌توده این مزارع از ۷۱۶۰ تا ۱۸۲۰۸ کیلوگرم بر هکتار و مقدار عملکرد دانه آن‌ها از ۳۵۶۹ تا ۶۶۷۵ کیلوگرم بر هکتار متغیر بود. همچنین میانگین زیست‌توده و عملکرد دانه در این زیرحوضه و در مزارع نمونه‌برداری شده به ترتیب برابر ۱۱۵۳۱ و ۴۹۵۷ کیلوگرم بر هکتار محاسبه شد. شاخص برداشت بدست آمده از این نمونه‌ها در بازه ۰/۲۸ تا ۰/۵۴ نوسان داشت و میانگین آن با مقدار ۰/۴۳ برای سایر مزارع این زیرحوضه استفاده گردید. برای محاسبه شاخص برداشت در زیرحوضه مه‌باد-گادار تعداد ۱۳ نمونه زمینی جمع‌آوری

زیرحوضه مورد بررسی از ۸۶۵۱ تا ۱۲۰۹۸ کیلوگرم بر هکتار متغیر بود. به طور کلی در حوضه دریاچه ارومیه حداقل، میانگین و حداکثر زیست‌توده تولید شده به ترتیب برابر ۴۹۷۵، ۱۰۲۰۷ و ۲۰۴۷۲ کیلوگرم بر هکتار بدست آمد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که از لحاظ تولید زیست‌توده سه زیرحوضه آجی-چای، جنوب-سهند و شمال-دریاچه در وضعیت نسبتاً مشابهی قرار داشتند. زیرحوضه‌های زرینه-سیمینه و مهاباد-گادار وضعیت مطلوب‌تر و زیرحوضه غرب-دریاچه وضعیت ضعیف‌تری نسبت به سایر زیرحوضه‌ها در تولید زیست‌توده داشتند. اختلاف بین بیشترین (زیرحوضه زرینه-سیمینه) و کمترین (زیرحوضه غرب-دریاچه) میزان تولید زیست‌توده ۳۴۴۷ کیلوگرم بر هکتار بدست آمد.

موسوی‌منش (۱۳۹۷) نیز در یک پژوهش ۴ ساله متوسط شاخص برداشت را برای دشت تبریز برابر ۰/۴۱ بدست آوردند.

زیست‌توده

برای برآورد زیست‌توده مزارع هر زیرحوضه مدل RUE با ضرایب بدست آمده در مراحل قبل اجرا شد و نتایج در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق شکل کمینه زیست‌توده در بین زیرحوضه‌های مورد بررسی در بازه ۴۹۷۵ تا ۷۵۸۷ کیلوگرم بر هکتار نوسان داشت و کمترین زیست‌توده بدست آمده در زیرحوضه غرب-دریاچه مشاهده شد. بازه تغییرات بیشینه زیست‌توده نیز از ۱۲۶۰۴ تا ۲۰۴۷۲ کیلوگرم بر هکتار بدست آمد و بیشترین مقدار مربوط به زیرحوضه زرینه-سیمینه بود. در نهایت میانگین زیست‌توده تمام مزارع در شش



شکل ۴- نمودار جعبه‌ای مقادیر زیست‌توده محاسبه شده با استفاده از مدل کارایی مصرف تابش برای شش زیرحوضه مورد بررسی و حوضه دریاچه ارومیه

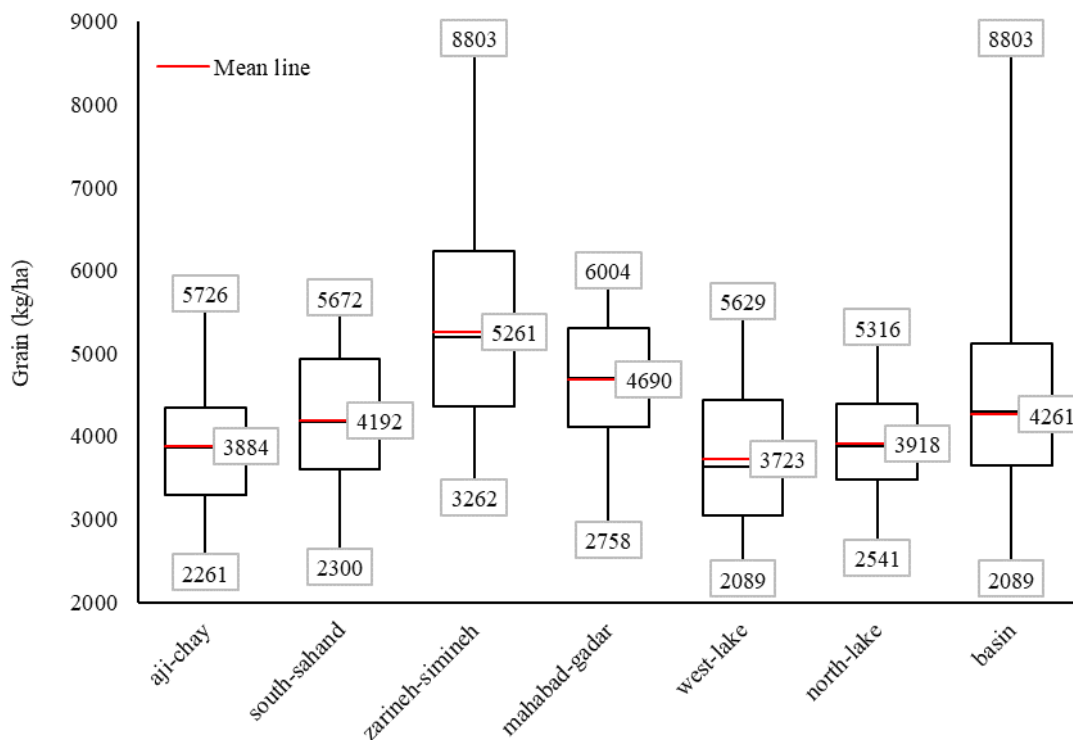
از سمت زیرحوضه آجی-چای به سمت زیرحوضه زرینه-سیمینه افزایشی بوده و پس از آن به سمت زیرحوضه غرب-دریاچه روند کاهشی به خود می‌گیرد. در نهایت میانگین عملکرد دانه در زیرحوضه شمال-دریاچه با افزایش جزئی همراه است. همچنین با توجه به یکسان بودن شاخص برداشت ($HI = ۰/۴۳$) در دو زیرحوضه زرینه-سیمینه (بیشترین زیست‌توده) و غرب-دریاچه (کمترین زیست‌توده) این اختلاف در زمینه عملکرد دانه نیز با همان نسبت به چشم می‌خورد و این دو زیرحوضه اختلاف ۱۵۳۸ کیلوگرم

عملکرد دانه

در شکل (۵) نمودار جعبه‌ای عملکرد دانه در هر زیرحوضه و میانگین کل حوضه نشان داده شده است. بر اساس شکل بازه تغییرات مینیمم، میانگین و ماکزیمم عملکرد دانه در میان شش زیرحوضه مورد بررسی به ترتیب از ۲۰۸۹ تا ۳۲۶۲، ۳۷۲۳ تا ۵۲۶۱ و ۵۳۱۶ تا ۸۸۰۳ کیلوگرم بر هکتار می‌باشد. همچنین میانگین عملکرد دانه در کل حوضه دریاچه ارومیه ۴۲۶۱ کیلوگرم بر هکتار بدست آمد. نتایج نشان داد روند تغییرات مقادیر میانگین عملکرد دانه

دانه را در شبکه آبیاری و زهکشی زرینه رود برابر ۴۸۹۷ کیلوگرم بر هکتار بدست آوردند.

بر هکتار را در مقادیر میانگین عملکرد دانه نشان می دهند. جمالی و همکاران (۱۳۹۷) نیز در پژوهشی که به منظور ارزیابی بهره‌وری مصرف آب در حوضه دریاچه ارومیه انجام دادند، میانگین عملکرد



شکل ۵- نمودار جعبه‌ای مقادیر عملکرد دانه محاسبه شده با استفاده از مدل کارایی مصرف تابش و شاخص برداشت برای شش زیرحوضه مورد بررسی و حوضه دریاچه ارومیه

با میانگین ۸۶۵۱ کیلوگرم بر هکتار مشاهده گردید. در بررسی عملکرد دانه در زیرحوضه‌های مختلف حوضه دریاچه ارومیه، بیشترین میزان عملکرد دانه در زیرحوضه زرینه-سیمینه (با مقدار میانگین ۵۲۶۱ کیلوگرم بر هکتار) و کمترین آن در زیرحوضه غرب-دریاچه (با مقدار میانگین ۳۷۲۳ کیلوگرم بر هکتار) مشاهده شد. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد بهره‌گیری از سنجش از دور در زمینه پایش و مدیریت یک حوضه کاملاً موفق بوده و بدون صرف زمان و هزینه زیاد می‌توان اطلاعات جامعی از وضعیت تولیدات کشاورزی در یک منطقه وسیع بدست آورد.

منابع

جمالی، ر.، بشارت، س.، یاسی، م. و امیرپوردیلمی، ا. ۱۳۹۷. ارزیابی راندمان‌های آبیاری، کارایی مصرف و بهره‌وری آب در حوضه دریاچه ارومیه (مطالعه موردی شبکه آبیاری و زهکشی زرینه‌رود). نشریه علوم آب و خاک. ۱۱۷(۳): ۱۱۷-۱۳۰.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف محاسبه زیست‌توده خشک، عملکرد دانه و شاخص برداشت گندم آبی در فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از سنجش از دور صورت گرفت. برای این منظور از ۴۳ تصویر ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ و مدل کارایی مصرف تابش استفاده گردید. نتایج پایش مزارع و شاخص NDVI نشان داد که جوانه‌زنی گندم آبی در سطح حوضه به طور متوسط از تاریخ ۲۰ آبان ماه شروع شده و برداشت این محصول نهایتاً تا ۳۰ تیرماه ادامه داشته است. بر اساس نتایج، مقادیر میانگین شاخص برداشت (HI) در زیرحوضه‌های مختلف بین ۰/۴۰ تا ۰/۴۵ بدست آمد. میانگین این شاخص برای حوضه دریاچه ارومیه نیز برابر ۰/۴۲ تعیین گردید. نتایج بررسی مقادیر زیست‌توده حاکی از تفاوت‌های چشم‌گیر در میزان زیست‌توده تولید شده بین زیرحوضه‌های مختلف بود. بیشترین زیست‌توده در زیرحوضه زرینه-سیمینه با میانگین ۱۲۰۹۸ کیلوگرم بر هکتار و کمترین مقدار در زیرحوضه غرب-دریاچه

- J., Han, W., Ye, T., Zhao, W. and Yuan, W. 2021. A Satellite-Based Method for National Winter Wheat Yield Estimating in China. *Remote Sensing*. 13: 4680. <https://doi.org/10.3390/RS13224680>
- Hassan, D.F., Abdalkadhum, A.J., Mohammed, R.J. and Shaban, A. 2022. Integration Remote Sensing and Meteorological Data to Monitoring Plant Phenology and Estimation Crop Coefficient and Evapotranspiration. *Journal of Ecological Engineering*. 23: 325–335. <https://doi.org/10.12911/22998993/146267>
- Javadian, M., Behrangi, A., Gholizadeh, M. and Tajrishy, M. 2019. METRIC and WaPOR Estimates of Evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: Comparative Analysis and Composite Assessment. *Water*. 11: 1647. <https://doi.org/10.3390/W11081647>
- Jiang, L. and Islam, S. 1999. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*. 26(17): 2773–2776. <https://doi.org/10.1029/1999GL006049>
- Lobell, D.B., Asner, G.P., Ortiz-Monasterio, J.I. and Benning, T.L. 2003. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 94: 205–220. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00021-X)
- Mahakosee, S., Jogloy, S., Vorasoot, N., Theerakulpisut, P., Holbrook, C.C., Kvien, C.K. and Banterng, P. 2022. Light Interception and Radiation Use Efficiency of Cassava under Irrigated and Rainfed Conditions and Seasonal Variations. *Agriculture*. 12: 725. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12050725>
- Mokhtari, A., Noory, H., Balkhi, A. and Alaghmand, S. 2021. Comparison of Three Different Satellite-Based Approaches for Aboveground Biomass Estimation. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*. 89: 33–47. <https://doi.org/10.1007/S41064-020-00134-9/TABLES/8>
- Mokhtari, A., Noory, H., Vazifedoust, M., Palouj, M., Bakhtiari, A., Barikani, E., Zabihi Afrooz, R.A., Fereydooni, F., Sadeghi Naeni, A., Pourshakouri, F., Badiheshin, A. and Afrasiabian, Y. 2019. Evaluation of single crop coefficient curves derived from Landsat satellite images for major crops in Iran. *Agricultural Water Management*. 218: 234–249. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.03.024>
- Monteith, J.L. and Moss, C.J. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*. 281: 277–294. <https://doi.org/10.1098/RSTB.1977.0140>
- خلیلی، ع.، بذرافشان، ج. و چراغعلی‌زاده، م. ۱۴۰۱. بررسی تطبیقی نقشه‌های اقلیمی ایران در طبقه‌بندی دمارتن گسترش داده شده و کاربست روش برای پهنه‌بندی اقلیم جهان. *هواشناسی کشاورزی*. ۱۰(۱): ۳–۱۶.
- عُنّابی میلانی، ا. و موسوی‌منش، ش. ۱۳۹۷. تعیین لایسیمیتری تبخیرتقرق و ضریب گیاهی گندم در دشت تبریز و مقایسه آن با روش پیشنهادی فائو ۵۶. *هواشناسی کشاورزی*. ۶(۲): ۴۴–۵۷.
- Allen, R., Tasumi, M. and Trezza, R. 2002. *Advanced Training and Users Manual of Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL), Version 1.0. Idaho Implementation*. August, 2002.
- Awad, M.M. 2019. Toward Precision in Crop Yield Estimation Using Remote Sensing and Optimization Techniques. *Agriculture*. 9: 54. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE9030054>
- Barideh, R. and Nasimi, F. 2022. Investigating the changes in agricultural land use and actual evapotranspiration of the Urmia Lake basin based on FAO's WaPOR database. *Agricultural Water Management*. 264: 107509. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107509>
- Barideh, R., Veysi, S., Ebrahimipak, N. and Davatgar, N. 2022. The challenge of reference evapotranspiration between the WaPOR data set and geostatistical methods. *Irrigation and Drainage*. 1–12. <https://doi.org/10.1002/IRD.2738>
- Besharat, S., Barão, L. and Cruz, C. 2020. New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. *Journal of Environmental Management*. 263: 110398. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110398>
- Chavez, J.C., Ganjegunte, G.K., Jeong, J., Rajan, N., Zapata, S.D., Ruiz-Alvarez, O. and Enciso, J. 2022. Radiation Use Efficiency and Agronomic Performance of Biomass Sorghum under Different Sowing Dates. *Agronomy*. 12(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy12061252>
- Duc, L. and Sawada, Y. 2023. A signal-processing-based interpretation of the Nash–Sutcliffe efficiency. *Hydrology and Earth System Sciences*. 27: 1827–1839.
- Dwivedi, M., Saxena, S. and NeetuRay, S.S. 2019. Assessment of Rice Biomass Production and Yield Using Semi-Physical Approach and Remotely Sensed Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 423: 217–222. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-3-W6-217-2019>
- Fu, Y., Huang, J., Shen, Y., Liu, S., Huang, Y., Dong,

- <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2022.102725>
- Shi, D., Huang, Q., Liu, Z., Liu, T., Su, Z., Guo, S., Bai, F., Sun, S., Lin, X., Li, T. and Yang, X. 2022. Radiation use efficiency and biomass production of maize under optimal growth conditions in Northeast China. *Science of The Total Environment*. 836: 155574. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155574>
- Tasumi, M. 2019. Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water Management*. 226: 105805. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.105805>
- Tripathi, A.M., Pohanková, E., Fischer, M., Orság, M., Trnka, M., Klem, K. and Marek, M.V. 2018. The Evaluation of Radiation Use Efficiency and Leaf Area Index Development for the Estimation of Biomass Accumulation in Short Rotation Poplar and Annual Field Crops. *Forests*. 9(4): 168. <https://doi.org/10.3390/F9040168>
- Venancio, L.P., Eugenio, F.C., Filgueiras, R., Da Cunha, F.F., Dos Santos, R.A., Ribeiro, W.R. and Mantovani, E.C. 2020. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application. *PLOS ONE*. 15: e0235620. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0235620>
- Zheng, Y., Zhang, M., Zhang, X., Zeng, H. and Wu, B. 2016. Mapping Winter Wheat Biomass and Yield Using Time Series Data Blended from PROBA-V 100- and 300-m S1 Products. *Remote Sensing*. 8: 824. <https://doi.org/10.3390/RS8100824>
- Monteith, L.J. 1978. Reassessment of maximum growth rates for C3 and C4 Crops. *Agriculture*. 14: 1–5.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50: 885–900.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282–290.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*. 100(2): 81–92. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- Rinaldi, M. and Garofalo, P. 2011. Radiation-use efficiency of irrigated biomass sorghum in a Mediterranean environment. *Crop and Pasture Science*. 62(10): 830–839. <https://doi.org/10.1071/CP11091>
- Saha, S., Banerjee, S., Mondal, S., Mukherjee, A., Nath, R. and Chowdhury, S. 2022. Evaluating radiation interception pattern and RUE of green gram grown in Lower Gangetic Plains and assessing future yield based on RUE. *Journal of Agrometeorology*. 24: 3–9. <https://doi.org/10.54386/JAM.V24I1.830>
- Servia, H., Pareeth, S., Michailovsky, C.I., de Fraiture, C. and Karimi, P. 2022. Operational framework to predict field level crop biomass using remote sensing and data driven models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 108: 102725.

Assessment of Radiation Use Efficiency Model in Estimating Biomass and Yield of Irrigated Wheat Based on Landsat 8 and 9 Satellite Images (Case Study: the Urmia Lake Basin)

F Nasimi¹, J Behmanesh^{2*}, V Rezaverdinejad²

Received: Feb.15, 2024

Accepted: May.04, 2024

Abstract

Given that conventional ground-based methods require significant costs, time, and manpower, there is an increasing inclination towards using indirect methods such as remote sensing. Therefore, the aim of this research was to calculate dry biomass, harvest index, and grain yield of irrigated wheat using remote sensing in the Urmia Lake Basin. For this purpose, the Urmia Lake Basin was divided into six sub-basins, and the Radiation Use Efficiency (RUE) model was utilized. In this study, 1115 irrigated wheat fields were used. Monitoring results of the fields and the NDVI index indicated that irrigated wheat germination in the basin began on average from November 11th, and harvesting of this crop continued until July 21th. The values of correlation coefficient (R), Nash-Sutcliffe coefficient (NSE), normalized root mean square error (nRMSE), and coefficient of residual mass (CRM) in the calibration step were 0.90, 0.76, 15%, and 6.38%, respectively, and in the validation step, they were 0.92, 0.72, 14%, and 7.21%, respectively. Examination of the harvest index (HI) indicated that the average of this index in different sub-basins ranged from 0.40% to 0.45%, with an overall average of 0.42% for the Urmia Lake Basin. The results of biomass and grain yield assessment revealed significant differences in their values among different sub-basins. The highest biomass and grain yield were observed in the Zarrineh-Simineh sub-basin with averages of 12098 and 5261 kilograms per hectare, respectively, while the lowest values were observed in the West-Lake sub-basin with averages of 8651 and 3723 kilograms per hectare, respectively.

Keywords: Harvest index, NDVI index, Remote sensing, Water stress

1- Ph.D Candidate of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(*- Corresponding Author Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)