

تعیین ضریب گیاهی چغندر قند به روش سنجش از نزدیک^۱ با استفاده از تصاویر

رقومی

رضا محمدی کیا، علی اشرف صدرالدینی^۲، امیرحسین ناظمی، رضا دلیرحسن نیا و

اژدر عنابی میلانی

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

swirm@yahoo.com

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

sadraddini@tabrizu.ac.ir

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

ahnazemi@yahoo.com

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

delearhasannia@yahoo.com

استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

a_o_milani@yahoo.com

دریافت: فروردین ۱۴۰۱ و پذیرش: خرداد ۱۴۰۱

چکیده

هدف این پژوهش بررسی امکان تعیین ضریب گیاهی چغندر قند با استفاده از پوشش گیاهی مستخرج از تصاویر رقومی در مدیریت‌های مختلف آبیاری بود. ضریب گیاهی و پوشش گیاهی متغیرهایی بودند که در طول دوره رشد و هر ۱۰ روز یک‌بار به صورت مستقیم و به ترتیب با روش بیلان آبی و پردازش تصویر اندازه‌گیری شدند. در این مطالعه، ضریب گیاهی چغندر قند در سه مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ با استفاده از معادله رگرسیونی آن با پوشش گیاهی که در شرایط پتانسیل مدل‌سازی شده بود برآورد شد و با میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده در دو سال اعتبارسنجی شد. نتایج اعتبارسنجی داده‌ها نشان داد که در مدیریت‌های آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز ۴۰٪ و ۶۰٪، ضرایب گیاهی برآورد شده توافق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند. در مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز ۴۰٪ ضریب تبیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، و ضریب کارایی مدل (EF) به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۱۱ و ۰/۹۵ و در مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز ۶۰٪ مقدار این ضرایب به ترتیب ۰/۹، ۰/۱۳ و ۰/۸۵ به دست آمد. نتایج ارزیابی مدل، کارایی استفاده از این روش را برای تعیین ضریب گیاهی چغندر قند در دامنه تغییرات رطوبتی بین ظرفیت زراعی تا بیشینه تخلیه مجاز ۶۰٪ تأیید کرد. در مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز ۸۰٪، ضریب تبیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، و ضریب کارایی مدل (EF) به ترتیب به ۰/۴۹، ۰/۳۷ و ۰/۶۳ کاهش یافت که نشان‌دهنده کارایی ضعیف مدل در شرایط تنش خشکی شدید بود. روش پیشنهادی از یک فناوری پردازش تصاویر رقومی برای شناسایی پوشش گیاهی استفاده می‌کند و از مزایایی مانند جمع‌آوری آسان و سریع داده‌ها، دقت بیشتر و هزینه کمتر، امکان تهیه تصویر به تعداد دلخواه و عدم نیاز به داده‌های هواشناسی برخوردار است، بنابراین می‌توان رشد گیاه و تغییرات ضریب گیاهی را در طول دوره رشد بررسی کرد.

واژه‌های کلیدی: وسیله اندازه‌گیری پوشش گیاهی، فضای رنگی، لایسومتر، بیشینه تخلیه مجاز، شاخص سبزیگی، مازاد

مقدمه

به منظور استفاده بهینه از منابع آب، دانستن مقدار آب لازم برای تولید پایدار اقتصادی محصول از اهمیت خاصی برخوردار است. تعیین نیاز آبی و ضریب گیاهی گیاهان به روش‌های مستقیم برای گیاهان زراعی و باغی از راهبردهای اساسی هر منطقه با اقلیم‌های مشابه بوده که مبنای برنامه‌ریزی استفاده از منابع آب و آبیاری گیاهان مختلف است. بیلان آبی رایج‌ترین روش تعیین ضریب گیاهی و نیاز آبی است. استفاده از مقادیر ضریب گیاهی برای تخمین میزان تبخیر - تعرق واقعی گیاه به عنوان روش استاندارد در تعیین نیاز آبیاری پذیرفته شده است. در تعیین نیاز آبی خالص، تبخیر - تعرق پتانسیل سطوح پوشش گیاهی مورد نظر، در مقادیر به دست آمده ضریب گیاهی ضرب شود. ضریب گیاهی به عواملی مانند نوع گیاه، مرحله رشد و شرایط آب و هوایی محلی بستگی دارد. از این رو ضریب گیاهی ثابت نیست و مقدار آن در طول دوره رشد تغییر می‌کند. وابستگی تغییرات ضریب گیاهی به خصوصیات گیاه بیشتر از شرایط اقلیمی است. برای تعیین ضریب گیاهی، از روش‌های مستقیم (بیلان آبی) و غیرمستقیم (معادلات تجربی و ریاضی) استفاده می‌شود. روش‌های مستقیم دشوار، پرهزینه بوده و بسته به تغییرات اقلیم و گیاه نیاز به تکرار دارند و با توجه به تغییرات مکانی پارامترهای جوی، اندازه‌گیری‌های به دست آمده، فقط برای سطح محدود قابل کاربرد است. همچنین در بسیاری از مناطق، آمار درازمدت وجود ندارد و یا امکان احداث ایستگاه هواشناسی در آینده نزدیک در همه مناطق دور از انتظار است. امروزه با توجه به پیشرفت فناوری ماهواره‌ها، فن سنجش از دور^۳ در تعیین تبخیر - تعرق استفاده می‌شود. در این روش داده‌های دمای سطحی، آلبیدوی سطحی، پوشش گیاهی و شاخص‌های گیاهی پس از پردازش و تصحیحات لازم بر روی تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شوند. در این روش برخی شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای را برآورد و با ایجاد رابطه رگرسیونی بین این

شاخص‌ها با شاخص‌های گیاهی مانند ضریب گیاهی یا شاخص سطح برگ تبخیر - تعرق محاسبه می‌شود. تعداد محدود تصاویر، سطح پیکسل‌های تصویربرداری و ابرناکی هوا در زمان گذر ماهواره از مشکلات مهم این روش است. روش دیگر در تعیین تبخیر - تعرق گیاه سنجش از نزدیک^۴ (عکاسی دیجیتال) است. عکاسی دیجیتال در کشاورزی دقیق، امکان نظارت بر رشد گیاه را فراهم می‌کند. در این فناوری، می‌توان بهره‌وری آب را با تعیین متغیرهایی که به طور مستقیم یا غیرمستقیم به تبخیر - تعرق وابسته هستند، بهبود بخشید (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). پردازش تصاویر رقومی یکی از فناوری‌های نوین است که در آن یک تصویر به عنوان متغیر ورودی تعریف و با انجام عملیات پردازش تصویر بر روی آن یک مجموعه از نشان‌های ویژه یا متغیرهای مربوط به تصویر به عنوان خروجی از آن دریافت می‌شود. این خروجی‌ها می‌تواند نمایش و چاپ تصویر، ویرایش تصویر، بهبود تصویر، کشف و تشخیص یک ویژگی خاص در تصویر و فشرده‌سازی تصویر باشد. جمع - آوری آسان و سریع اطلاعات، دقت بیشتر و هزینه کمتر، تهیه تصویر به تعداد دلخواه، عدم وابستگی و نیاز به داده - های هواشناسی و امکان استفاده از آن در هر زمان و مکان از مزیت‌های این روش است. در این روش تهیه تصاویر رقومی در دامنه وسیعی از فرمت‌ها (تصویر بهبودیافته، اشعه ایکس، عکس نگاتیو، فیلم و ...) انجام و امکان استخراج و پردازش اطلاعات از تصاویر و فیلم را برای تفسیر توسط کامپیوتر فراهم می‌شود. تغییر پیکسل‌های تصاویر برای دستیابی به تراکم و کنتراست دلخواه، امکان ذخیره و بازیابی تصاویر و امکان انتقال ساده‌تر تصاویر از دیگر مزایای استفاده از این روش است. ضریب گیاهی، اثرات ویژگی - های گیاه اصلی را از گیاه مرجع متمایز می‌کند. در نتیجه، گیاهان مختلف دارای ضرایب گیاهی متفاوتی هستند که معمولاً در طول مراحل رشد بر اساس شرایط پوشش گیاهی آن‌ها متفاوت است. از این رو، تعیین دقیق پوشش گیاهی، به عنوان یکی از مسائل اصلی، نقش کلیدی در تخمین تبخیر

4- Proximal sensing

3-Remote sensing

استفاده شده است. کلیرا و همکاران (۲۰۰۱) از تصاویر رقومی استفاده و یک پرتوسنجی از کرت‌های آزمایشی جو، ذرت و چغندر قند انجام دادند. در مناطق خشک جنوب ایالات متحده، لالی‌برت و همکاران (۲۰۰۷) از تصاویر رقومی برای به‌دست آوردن پوشش چمنی استفاده کردند که معمولاً ترکیبی از گیاهان خشک و سبز در فضای رنگی (HSL)^۷ بود. لی و لی (۲۰۱۱) پوشش سبز گیاهی را در مزارع برنج با استفاده از تصاویر رقومی و فضاهای رنگی مختلف محاسبه کردند. فیلیپ و رث (۲۰۰۲) طیف‌های رنگی مختلف را به‌منظور یافتن بهترین روش برای تفکیک گیاه از پس‌زمینه مقایسه کردند. در مطالعه دیگری، سیستم پردازش تصویر و مدل‌سازی آماری برای ارزیابی کیفیت روزانه درختان زینتی در گلخانه‌ها استفاده شد (پارسونز و همکاران ۲۰۰۹). در مطالعه‌ای بر روی استخراج رگرگ‌ها برای تقسیم‌بندی برگ، از دو ویژگی رنگ و شدت رنگ برای جداسازی برگ‌ها و برجسته‌کردن رگرگ‌ها استفاده شد (ژنگ و وانگ ۲۰۱۰). جیاکوملی و همکاران (۱۹۹۸) و (۱۹۹۶) از یک سیستم بینایی ماشینی برای استخراج درصد پوشش گیاهی کاهو و تعیین تنش مواد مغذی استفاده کردند. لینگ و روژیتسکی (۱۹۹۲) همبستگی زیادی بین وزن تر، وزن خشک و درصد پوشش گیاهی با استفاده از فناوری پردازش تصویر در نهال‌های گوجه‌فرنگی گزارش کردند. بلاسکو و همکاران (۲۰۰۲) یک سیستم رباتیک بر اساس تجزیه و تحلیل تصویر برای از بین بردن علف‌های هرز در مزارع کاهو طراحی کرد. استوری و همکاران (۲۰۱۰) یک سیستم بینایی ماشینی برای تشخیص کمبود کلسیم در کاهو با استفاده از تغییرات زمانی، رنگی و مورفولوژیکی گیاه طراحی کردند. در برخی مطالعات، رابطه بین پوشش گیاهی و ضریب گیاهی بررسی (گراتان و همکاران ۱۹۹۸، هانسون و می ۲۰۰۶، دی‌مدیروس و همکاران ۲۰۰۱، لویز اوره‌آ و همکاران ۲۰۰۹ و فرناندز پاجیکو و همکاران ۲۰۱۴) و رابطه قوی بین پوشش گیاهی و ضریب گیاهی در گیاهان مختلف گزارش شده است. این

- تعرق گیاه دارد (آن و همکاران، ۱۹۹۸). برای تعیین درصد پوشش گیاهی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. با هر یک از این روش‌ها، برآوردی از درصد پوشش گیاهی به دست می‌آید. در روش سطحی (Area method) در منطقه نمونه‌برداری در یک قاب مرجع مشخص، در سه نقطه از یک سطح مشخص عرض ردیف گیاه با استفاده از یک نوار متریک برآورد و سپس از این داده‌ها برای تخمین عرض متوسط ردیف گیاه و پوشش گیاهی استفاده می‌شود (آدامز و آرکین، ۱۹۷۷؛ گیم‌نیز، ۱۹۸۵). در روش کنتوری (Contour method) با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند IMAGE J ترسیم خط مرزی گیاه بر روی کاغذ انجام و سپس اندازه‌گیری ناحیه مورد نظر شبیه‌سازی می‌شود (کوت و مارشال، ۱۹۷۱). روش دیگر طبقه‌بندی مجدد تصویر (Reclassification method) است که در آن از یک فناوری پردازش تصاویر رقومی در فضای RGB^۵ برای شناسایی پوشش سبز گیاهی استفاده می‌کند. در این روش سطح گیاه در دامنه سطح تابش نشان داده شده بر روی تصویر RGB از گیاه (۰ تا ۲۵۵ رنگ) تعیین و پوشش سبز گیاهی محاسبه می‌شود (کمپیلو و همکاران، ۲۰۰۸). در مطالعات مختلف، پوشش گیاهی با استفاده از پردازش تصویر رقومی برآورد شده است (کرونین و هیک کینین ۲۰۰۹، پیکین و مک فارلین ۲۰۰۹، ری و همکاران ۲۰۱۰، چیانوچی و کوتینی ۲۰۱۳، پاتریگنانی و اوشنر ۲۰۱۵، پی آیدا و همکاران ۲۰۱۵، مورا و همکاران ۲۰۱۶، رابه و همکاران ۲۰۱۷، سالاس و همکاران ۲۰۱۷؛ آلورینی و همکاران ۲۰۱۸؛ ژیونگ و همکاران ۲۰۱۹). در این مطالعات از شاخص‌های رنگی، ابزارها و روش‌های مختلف برای جداسازی و ایجاد تضاد بین پوشش سبز و زمینه برای رسیدن به هدف‌های مختلف استفاده شده است. سبزیگی مازاد یک از این شاخص‌های رنگی است. ووبیکه و همکاران (۱۹۹۵) شاخص سبزیگی مازاد (Excessive^۶ green index) را برای پوشش گیاهی به‌عنوان یک تصویر دو طیفی پیشنهاد کردند که به‌طور گسترده در مطالعات اخیر

7- Hue- Saturation- Lightness

5- Red-Green-Blue

6-2G-R-B

زهکش‌دار به ابعاد یک در دو متر قرار داشت کشت شد. فاصله ردیف‌های کشت ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها در هر ردیف ۲۰-۱۸ سانتی‌متر بود. تاریخ کاشت در سال اول و دوم به ترتیب ۳۰ اردیبهشت و اول خردادماه بود. ضریب گیاهی و پوشش گیاهی متغیرهایی بودند که در طول دوره رشد برای دوره‌های ۱۰ روزه اندازه‌گیری و برای مراحل چهارگانه رشد محاسبه شدند.

تعیین ضریب گیاهی

به‌منظور تعیین ضریب گیاهی چغندر قند، در هر سال تبخیر-تعرق گیاه در شرایط پتانسیل و در سه مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز (MAD^A)، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد به روش بیلان آب در خاک (رابطه ۱) اندازه‌گیری شد.

$$ET_c = I + R - DP - D_{rz}(\theta_f - \theta_i) \quad (1)$$

در این رابطه ET_c : تبخیر-تعرق گیاه (mm)، I : عمق آب آبیاری (mm)، R : مقدار بارندگی (mm)، DP : نفوذ عمقی (mm)، D_{rz} : عمق توسعه ریشه (mm)، θ_f : رطوبت حجمی خاک در انتهای دوره مورد نظر (mm/m)، θ_i : رطوبت حجمی خاک در ابتدای دوره مورد نظر (mm/m) است.

عمق آب آبیاری بر اساس میانگین رطوبت خاک ناحیه توسعه ریشه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$I = ((Fc - \theta)/100) * d \quad (2)$$

که در آن، I : عمق آب آبیاری (میلی‌متر)، Fc : محتوای حجمی آب در ظرفیت مزرعه (درصد)، θ : محتوای حجمی آب پیش از آبیاری (درصد) و d : عمق ناحیه توسعه ریشه (میلی‌متر) است.

مقدار بارندگی بر اساس یادداشت داده‌های روزانه ایستگاه هواشناسی مشکین‌دشت (واقع در فاصله ۵۰ متری محل مورد مطالعه) و تغییرات رطوبت خاک بین دو آبیاری با استفاده از نوترون‌متر اندازه‌گیری شد.

مطالعات در یک مدیریت آبیاری خاص بوده و تاکنون مطالعه جامعی برای تعیین روابط بین ضریب گیاهی و پوشش سبز گیاهی در مدیریت‌های مختلف آبیاری با استفاده از تصاویر رقومی سنجش از نزدیک در ایران انجام نشده است. این مطالعه با هدف تعیین رابطه رگرسیونی بین ضریب گیاهی و پوشش سبز گیاهی چغندر قند برای برآورد ضریب گیاهی در شرایط مختلف مدیریت آبیاری به روش سنجش از نزدیک انجام شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات مزرعه تحقیقاتی

این پژوهش به مدت دو سال (۱۳۹۶-۹۷) در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب واقع در مشکین‌دشت کرج با مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی انجام شد. این منطقه دارای آب و هوای گرم و خشک مدیترانه‌ای (بر اساس طبقه‌بندی آب و هوایی De Martonne) با تابستان‌های خشک و گرم و زمستان‌های سرد است. ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۱ متر، بارندگی سالانه ۲۷۱ میلی‌متر و میانگین بیشترین و کمترین دمای چهل ساله به ترتیب ۳۹/۹ درجه سانتی‌گراد (ژوئن-ژوئیه) و ۴ درجه سانتی‌گراد (دسامبر-ژانویه) است. بر اساس نتایج آزمون خاک، بافت خاک محل آزمایش لوم و شوری خاک کمتر از آستانه تحمل به شوری گیاه چغندر قند (۷ دسی زیمنس بر متر) و بدون محدودیت برای کشت بود (آلن و همکاران ۱۹۹۸). آب آبیاری از چاه تأمین شد. مطابق با طبقه‌بندی ویلکاکس آب استفاده شده در کلاس C2-S1 طبقه‌بندی می‌شود و کیفیت خوبی دارد. سطح شوری و قلیائیت آن کم و برای آبیاری انواع محصولات مناسب است.

آزمایش مزرعه‌ای

در هر سال بذر چغندر قند (رقم شکوفا) در زمینی به مساحت ۱۲۰۰ مترمربع که در مرکز آن یک عدد لایسیمتر

تعیین درصد پوشش گیاهی

در این مطالعه برای تعیین درصد پوشش سبز گیاه، از برنامه Canopeo (پاتریگنی و اوشنر، ۲۰۱۵) به عنوان ابزار پردازش استفاده شد. Canopeo ابزاری است که در زبان برنامه‌نویسی MATLAB در فضای رنگی قرمز-سبز-آبی (RGB) نوشته شده است و برای تجزیه و تحلیل خودکار آستانه رنگ در هر تصویر استفاده می‌شود. Canopeo تمام پیکسل‌های تصویر را تجزیه و تحلیل و طبقه‌بندی می‌کند. تجزیه و تحلیل خودکار آستانه رنگ تصویر بر اساس انتخاب پیکسل‌ها با توجه به نسبت‌های رنگی قرمز به سبز (R/G)، آبی به سبز (B/G) و شاخص سبزیگی مازاد (Excessive green index) بود. نتیجه تجزیه و تحلیل، یک تصویر دو طیفی است که در آن پیکسل‌های سفید با پیکسل‌هایی که معیارهای انتخاب را برآورده می‌کنند (پوشش سبز) و پیکسل‌های سیاه با پیکسل‌هایی که معیارهای انتخاب را ندارند (پوشش غیرسبز) مطابقت دارند. دامنه پوشش گیاهی سبز از صفر (بدون پوشش گیاهی سبز) تا یک (۱۰۰ درصد پوشش گیاهی سبز) است. طبقه‌بندی پوشش گیاهی سبز بر اساس معیارهای زیر است:

$R/G < P1$ and $B/G < P2$ and $2G - R - B > P3$
 $P1$ و $P2$ پارامترهایی هستند که برای طبقه‌بندی پیکسل‌هایی که عمدتاً در باند سبز (۵۷۰-۵۰۰ نانومتر) قرار دارند استفاده می‌شود و مقدار هر دو پارامتر به صورت پیش فرض ۰/۹۵ است. $P3$ پارامتری است که کمترین مقدار شاخص سبزیگی مازاد را تعیین می‌کند که به طور معمول برای انتخاب پوشش سبز گیاهی مقدار آن حدود ۲۰ است (پاتریگنی و اوشنر، ۲۰۱۵). تصویربرداری برای تعیین درصد پوشش گیاهی در طول دوره رشد، از فاصله ثابت ۱/۲ متری بالای سطح گیاه و عمود بر آن و هر ۱۰ روز یک بار و زمان مشخص با استفاده از دوربین دیجیتال Sony Cyber-Shot DSC-TX1، با وضوح ۱۰/۲ مگاپیکسل و فاصله کانونی ۲۴ میلی‌متر نصب شده بر روی یک پایه فلزی انجام شد. متناسب با طول مراحل چهارگانه رشد ۲ مرتبه تصویربرداری در مرحله ابتدایی، چهار مرتبه در مرحله

تبخیر-تعرق پتانسیل چغندر قند با استفاده از لایسیمتر اندازه‌گیری شد. آبیاری داخل لایسیمتر بر مبنای حفظ رطوبت خاک ناحیه توسعه ریشه (۶۰ سانتی‌متر) در حد ظرفیت مزرعه برای ایجاد شرایط پتانسیل بود و به منظور تولید زه‌آب حجم آب آبیاری در هر آبیاری ۲۰ درصد بیشتر از مقدار مورد نیاز گیاه بود. آب زهکشی شده پس از جمع شدن در داخل مخزنی که در انتهای لایسیمتر نصب بود دو روز بعد از هر آبیاری با استفاده از ظرف مدرج اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری تبخیر-تعرق چغندر قند در مدیریت-های مختلف آبیاری در داخل کرت‌هایی با مساحت ۶ مترمربع و به روش بیلان آب در خاک انجام شد. در این مدیریت‌ها، برای جلوگیری از نفوذ عمقی، حجم آب آبیاری به اندازه‌ای بود که رطوبت ناحیه ریشه مجدداً به رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای برسد.

هم‌زمان، تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه هواشناسی مشکین‌دشت و روش پنمن-مانتیت فائو محاسبه شد (آلن و همکاران ۱۹۹۸):

$$ET_o = \frac{0/408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0/34u_2)} \quad (3)$$

در این رابطه ET_o : تبخیر-تعرق گیاه مرجع R_n ، (mm/day): تشعشع خالص در سطح گیاه G ، (MJ/m²/d): شار گرمای خاک T ، (MJ/m²/d): دمای هوا در ارتفاع دو متری u_2 ، (°C): سرعت باد در ارتفاع دو متری e_s ، (m/sec): فشار بخار اشباع e_a ، (kpa): فشار بخار واقعی $e_s - e_a$ ، (kpa): کمبود فشار بخار اشباع (kpa)، Δ : شیب منحنی فشار بخار (kpa/°C) و γ : ضریب ثابت سایکرومتری (kpa/°C) است.

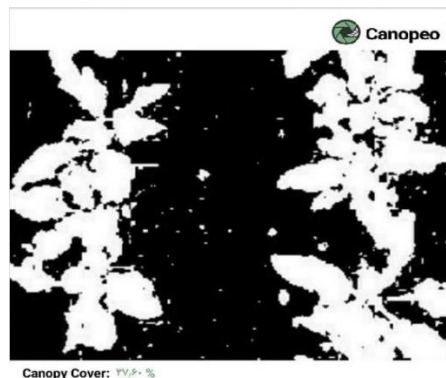
پس از تعیین تبخیر-تعرق گیاه مرجع، مقدار ضریب گیاهی چغندر قند از نسبت تبخیر-تعرق گیاه اصلی به گیاه مرجع و با استفاده از رابطه (۴) برای دوره‌های ده روزه تعیین شد (آلن و همکاران ۱۹۹۸):

$$Kc = ET_c / ET_o \quad (4)$$

(درصد تغییرات پوشش گیاهی) و با استفاده از برنامه Canopeo در شرایط پتانسیل تعیین شد. پس از تهیه تصاویر، از نسخه MATLAB و Android برنامه Canopeo برای تعیین درصد پوشش گیاهی استفاده شد. شکل یک نمونه‌ای از تصویر رقومی اصلی و پردازش شده پوشش گیاهی را با استفاده از برنامه Canopeo نشان می‌دهد.



توسعه، نه مرتبه در مرحله میانی و سه مرتبه در محله پایانی رشد انجام شد. در مجموع، ۱۸ مرتبه تصویربرداری در طول دوره رشد انجام و از هر مدیریت آبیاری ۱۸ قطعه تصویر تهیه شد. در مجموع ۷۲ قطعه تصویر از گیاه در شرایط مختلف مدیریت آبیاری تهیه و پردازش شد. همچنین طول مراحل مختلف رشد گیاه (مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی) بر مبنای تعریف ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو



شکل ۱- تصویر چغندر قند پیش و بعد از پردازش تصویر

ترتیب بیانگر بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مدل است. شاخص توافق ویلموت (d) نمایه‌ای بدون بعد که مقدار توافق بین دو مجموعه داده اندازه‌گیری و برآورد شده را سنجیده و مقدار عاری بودن از خطای مقادیر برآورد شده را ارزیابی می‌کند. این نمایه بین صفر و یک در نوسان است. عدد یک توافق کامل دو مجموعه داده را نشان می‌دهد و هرچه مقدار توافق بین دو مجموعه داده کمتر باشد مقدار آن کمتر خواهد بود. ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) بیانگر تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی با مقادیر مشاهده شده است. این شاخص به صورت درصد، اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی را بیان می‌کند که مقادیر کمتر از ۱۰ درصد نشان‌دهنده توافق خوب، ۲۰ تا ۳۰ درصد توافق قابل قبول و بزرگ‌تر از ۳۰ توافق ضعیف است (جامیسون و همکاران، ۱۹۹۱). EF ضریب کارایی مدل است که نشان می‌دهد مدل تا چه اندازه

مدل‌سازی و اعتبارسنجی

مدل‌سازی در شرایط پتانسیل و اعتبارسنجی در سه مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز (MAD) ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد و با استفاده از میانگین داده‌های اندازه‌گیری - شده ضریب گیاهی انجام شد. برای ارزیابی مدل از ضریب تعیین^۹ (R^2)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا^{۱۰} (RMSE)، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده^{۱۱} (NRMSE)، شاخص توافق ویلموت (d)، میانگین خطای اریب^{۱۲} (MBE) و ضریب کارایی^{۱۳} (EF) (لوآگو و گرین، ۱۹۹۱، جامیسون و همکاران، ۱۹۹۱ و چن و همکاران، ۲۰۰۳) استفاده شد. مقدار ضریب تعیین (R^2) بین صفر و یک متغیر بوده و هر اندازه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد بهتر است. ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) که مقادیر آن هر اندازه به صفر نزدیک‌تر باشد توافق خوب بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت و منفی میانگین خطای اریب (MBE) به

¹² -Mean Bias Error
¹³ -Model efficiency

⁹ -Coefficient of Determination
¹⁰ -Root Mean Square Error
¹¹ -Normalized Root Mean Square Error

درست عمل می‌کند. مقدار آن بین صفر و یک بوده و هر چقدر به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده کارایی بالای آن مدل است (رضایی و پیرا، ۲۰۱۳).

نتایج و بحث

میانگین طول دوره رشد چغندرقد در دو سال ۱۸۴ روز بود که طول مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی رشد آن در دو سال بر مبنای تعریف ارائه‌شده در نشریه شماره ۵۶ فائو (درصد تغییرات پوشش گیاهی) و در شرایط پتانسیل با استفاده از برنامه Canopeo به ترتیب ۲۵، ۴۳،

۸۱ و ۳۵ تعیین شد. در شرایط آبیاری پتانسیل میانگین تبخیر- تعرق دوساله چغندرقد و گیاه مرجع به ترتیب ۹۱۳/۴ میلی‌متر و ۱۰۲۶/۸ میلی‌متر بود. جدول (۱) میانگین نتایج دوساله ضریب گیاهی اندازه‌گیری‌شده در شرایط پتانسیل و ضرایب پیشنهادی در نشریه شماره ۵۶ فائو را نشان می‌دهد. ضریب گیاهی دوساله در مراحل ابتدایی، توسعه، میانی، پایانی و کل دوره رشد به ترتیب ۰/۳۹، ۰/۷۱، ۱/۱۸، ۰/۶۱ و ۰/۸۹ و درصد پوشش گیاهی متناظر با این مراحل رشد به ترتیب ۷/۲۳، ۵۳/۲۲، ۹۴/۹۹ و ۸۲/۷۷ درصد تعیین شد.

جدول ۱- میانگین دو ساله ضرایب گیاهی اندازه‌گیری‌شده در شرایط پتانسیل آبیاری و پیشنهادی در نشریه شماره ۵۶ فائو

متغیر	روش	مرحله رشد		
		ابتدایی	توسعه	میانی
ضریب گیاهی	بیان آبی	۰/۳۹	۰/۷۱	۱/۱۸
	فائو ۵۶	۰/۳۵	۰/۷۸	۱/۲
درصد خطای روش فائو نسبت به روش بیان آبی		-۱۰/۳	+۹/۸۶	+۱/۷

چگینی و همکاران (۱۳۸۷) در کرج مقدار ضریب گیاهی چغندر بذری را در مراحل مختلف رشد (ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی) به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۸۹، ۱/۱۲ و ۰/۶۶ تعیین کردند. رثوف (۱۳۹۸) مقدار ضریب گیاهی چغندرقد را در اردبیل به ترتیب ۰/۳۳، ۰/۹، ۱/۱۶ و ۰/۸۸ برای مراحل رشد ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی به دست آورد. در مطالعات مختلف تبخیر و تعرق چغندرقد برای فصول کوتاه و شرایط آب و هوایی خنک ۴۰۰ میلی‌متر و برای شرایط آب و هوایی خشک و گرم و فصول طولانی تا ۱۵۰۰ میلی‌متر گزارش شده است (هاول و همکاران ۱۹۸۷، اوچان و جنکوگلان ۲۰۰۴، رینالدی و وونیا ۲۰۰۶). مقایسه میانگین دوساله ضرایب گیاهی اندازه‌گیری‌شده در شرایط پتانسیل و ضرایب پیشنهادی در نشریه شماره ۵۶ فائو (جدول ۱) نشان داد بین مقادیر ضرایب گیاهی در مراحل مختلف رشد اختلاف وجود دارد. در مرحله ابتدایی رشد مقدار ضریب گیاهی پیشنهادی در نشریه شماره ۵۶ فائو ۱۰/۳ درصد کمتر از مقدار اندازه‌گیری‌شده بود. علت این اختلاف افزایش تبخیر از سطح

خاک به علت دور کم آبیاری‌ها در این مرحله از دوره رشد برای سبز شدن و استقرار مناسب گیاه بود. در مرحله توسعه رشد، مقدار ضریب گیاهی اندازه‌گیری‌شده ۰/۷۱ بود. در نشریه شماره ۵۶ فائو برای این مرحله از دوره رشد عدد ۰/۷۸ پیشنهاد شده است که نسبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده ۹/۸۶ درصد بیشتر است. در مرحله میانی رشد مقدار ضریب گیاهی پیشنهادی در نشریه شماره ۵۶ فائو برای دوره میانی رشد ۱/۲ است که با مقدار اندازه‌گیری‌شده اختلاف اندکی (۱/۷+) داشت. در مرحله پایانی رشد، مقدار ضریب گیاهی پیشنهادی در نشریه شماره ۵۶ فائو در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری‌شده ۱۴/۷۵ درصد بیشتر بود. به‌جز مرحله میانی رشد، اختلاف بین ضرایب پیشنهادی فائو با ضرایب اندازه‌گیری‌شده در سایر مراحل رشد در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود که نشان‌دهنده ضرورت اصلاح این ضرایب با توجه به شرایط محلی است. نداشتن همخوانی بین داده‌های منتشرشده توسط فائو (نشریه شماره ۵۶) با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مطالعات متعددی گزارش شده است. بیک‌کینی و همکاران (۲۰۰۹) در ایالت

چند جمله‌ای درجه سوم بین ضریب گیاهی پایه با درصد پوشش گیاهی زمین با ضریب تعیین ۰/۹۷ و سطح احتمال کمتر از ۰/۰۱ به دست آوردند. گراتان و همکاران (۱۹۹۸) اقدام به ایجاد یک رابطه مستقیم بین درصد پوشش گیاهی و ضریب گیاهی برای هفت گیاه مختلف در کالیفرنیا ایالات متحده آمریکا نمودند. نویسندگان ضریب گیاهی را به روش نسبت باون اندازه‌گیری کردند، این مطالعه، تأیید کرد که ضرایب گیاهی به صورت یک تابع درجه دوم با درصد پوشش گیاهی تغییر می‌کند. این نویسندگان ضریب تعیین ۰/۶ برای کنگر فرنگی، ۰/۶۹ برای لوبیا، ۰/۷۴ برای کلم بروکلی، ۰/۶۳ برای کاهو، ۰/۹ برای خربزه، ۰/۷۲ پیاز و ۰/۸۷ برای توت فرنگی به دست آوردند. فرناندز پاچیکو و همکاران (۲۰۱۴) ضریب گیاهی کاهو را به صورت تابعی از نسبت درصد پوشش گیاهی زمین و ارتفاع گیاه با ضریب تعیین بسیار بالا (۰/۹۸) به دست آوردند.

ارزیابی مدل در مدیریت‌های مختلف آبیاری

جدول (۲) میانگین دوساله ضریب گیاهی و پوشش گیاهی اندازه‌گیری شده گیاه چغندر قند در مدیریت‌های مختلف آبیاری را نشان می‌دهد. در مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز (MAD) ۴۰ درصد، میانگین ضرایب گیاهی مراحل چهارگانه رشد به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۶۸، ۰/۱۴ و ۰/۵۵ اندازه‌گیری شد. ضرایب برآورد شده از مدل متناظر با این مراحل به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۷۱، ۰/۰۲ و ۰/۸۳ بود. بر اساس نتایج اعتبارسنجی داده‌ها (جدول ۳)، در این مدیریت آبیاری، ضریب تعیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بین داده‌های اندازه‌گیری و برآورد شده به ترتیب ۰/۹۵، ۱۱/۴ درصد و ۰/۹۸ به دست آمد. مقدار ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۱۰۰۶ نشان‌دهنده پایداری مدل بود. میانگین خطای اریب (MBE)، -۶ درصد نشان داد مقادیر برآورد شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود. شاخص کارایی مدل (EF) ۹۵ درصد نشان‌دهنده صحت خوب مدل در برآورد داده‌های ضریب گیاهی بود.

تگزاس آمریکا با آزمایش بر روی گیاهان ذرت و سورگوم گزارش کردند که ضرایب گیاهی پیشنهادی فائو در مرحله میانی رشد بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده و در مراحل پایانی رشد کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده بود. آکاندا و همکاران (۲۰۱۷) در بنگلادش نتیجه گرفتند که ضرایب گیاهی توصیه شده توسط فائو برای سیب‌زمینی بیش از مقدار اندازه‌گیری شده با لایسیمتر بود. در پژوهش مشابه که توسط کاروال‌هو و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد استفاده از ضرایب گیاهی ارائه شده توسط فائو منجر به ۱۰ درصد برآورد بیشتر آب مصرفی سیب‌زمینی در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری شده شد. وانگ و همکاران (۲۰۱۷) در چین گزارش کردند که روش پیشنهادی فائو میزان آب مصرفی گیاه گندم زمستانه را در مرحله اولیه رشد کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده از لایسیمتر و در مراحل توسعه و میانی رشد بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. بافکار و همکاران (۱۳۹۲) در کرمانشاه ضریب گیاهی ذرت دانه‌ای را برای مراحل ابتدایی، میانی و انتهایی رشد به ترتیب ۰/۵، ۰/۲۲ و ۰/۸۹ اندازه‌گیری کردند در حالی که ضرایب گیاهی پیشنهادی فائو برای دوره‌های رشد یاد شده به ترتیب ۰/۳۵، ۰/۶۸ و ۰/۱۲ بوده است.

همبستگی ضریب گیاهی با پوشش گیاهی در شرایط پتانسیل آبیاری

بر پایه آنالیز آماری داده‌ها و پردازش روابط رگرسیونی، رابطه بین دو متغیر ضریب گیاهی و پوشش گیاهی در شرایط پتانسیل آبیاری به صورت یک تابع درجه سوم با ضریب تعیین ۰/۹۷ به دست آمد که در سطح احتمال کمتر از یک درصد معنی‌دار بود.

$$Kc = 5 * 10^{-06}CC^3 - 0.0006CC^2 + 0.0285CC + 0.2017 \quad (5)$$

در این معادله Kc ضریب گیاهی و CC درصد پوشش گیاهی است.

همبستگی بین ضریب گیاهی و پوشش گیاهی در مطالعات مختلف بررسی شده است. دی‌مدیروس و همکاران (۲۰۰۱) برای گیاه لوبیا یک رابطه قوی به شکل

جدول ۲- میانگین دو ساله ضریب گیاهی و پوشش گیاهی اندازه‌گیری شده در مدیریت‌های مختلف آبیاری

متغیر	مدیریت آبیاری	مرحله رشد		
		ابتدایی	توسعه	میانی
ضریب گیاهی	بیشینه تخلیه مجاز ۴۰ درصد	۰/۳۸	۰/۶۸	۱/۱۴
	بیشینه تخلیه مجاز ۶۰ درصد	۰/۲۹	۰/۵۸	۰/۹۸
	بیشینه تخلیه مجاز ۸۰ درصد	۰/۲۲	۰/۳۶	۰/۶۶
درصد پوشش گیاهی	بیشینه تخلیه مجاز ۴۰ درصد	۵/۸۵	۴۹/۴۳	۹۰/۰۴
	بیشینه تخلیه مجاز ۶۰ درصد	۵/۷۹	۳۵/۰۹	۸۲/۶۸
	بیشینه تخلیه مجاز ۸۰ درصد	۴/۸	۳۰/۳	۶۵/۵۶

جدول ۳- نتایج آماره‌های اعتبارسنجی در مدیریت‌های مختلف آبیاری

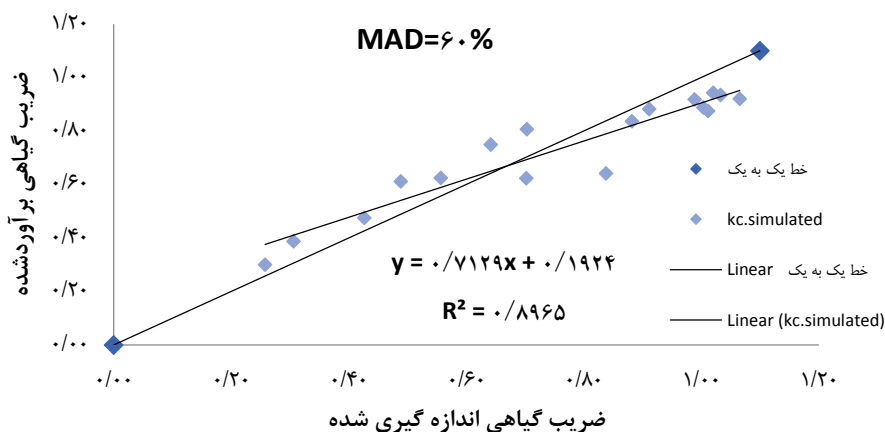
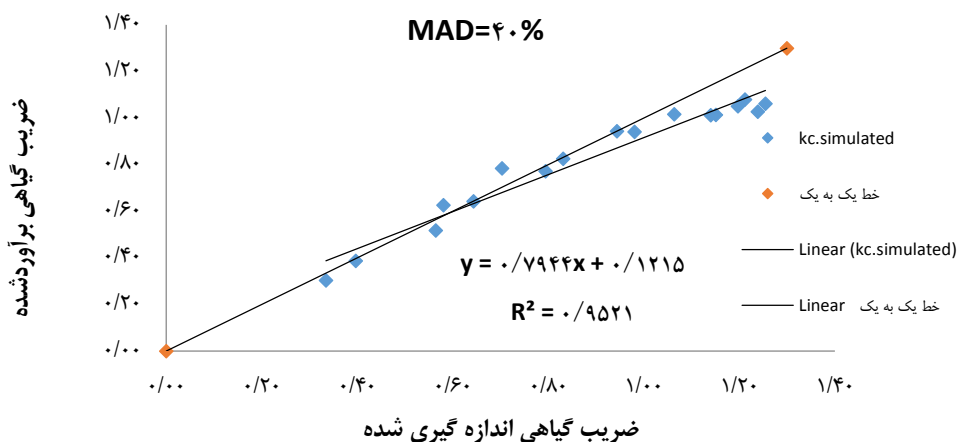
آماره‌های اعتبارسنجی					مدیریت آبیاری
R ²	RMSE	NRMSE	MBE	d	
۰/۹۵	۰/۱۰۰۶	۰/۱۱۴	-۰/۰۶	۰/۹۷۸	بیشینه تخلیه مجاز ۴۰ درصد
۰/۹	۰/۱۰۱۱	۰/۱۳۴	-۰/۰۲۴	۰/۹۷	بیشینه تخلیه مجاز ۶۰ درصد
۰/۴۹	۰/۱۷۹۷	۰/۳۶۷	+۰/۱۰۴	۰/۷۹۸	بیشینه تخلیه مجاز ۸۰ درصد

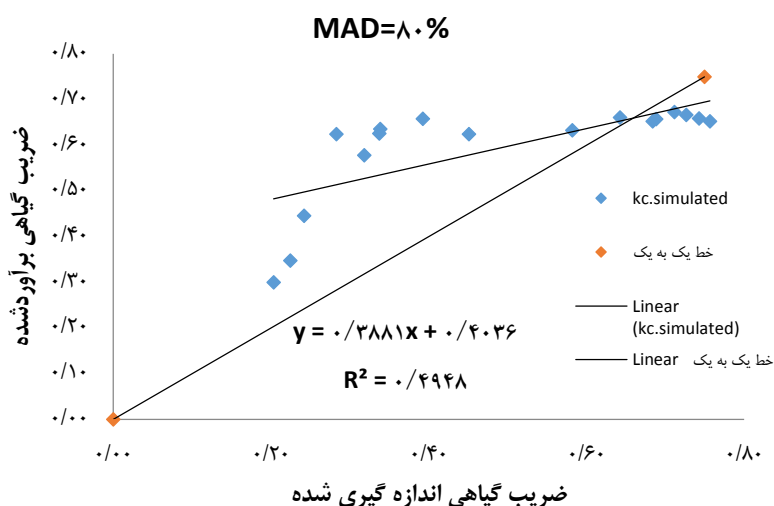
درصد بود که رضایت‌بخش نبود. بررسی روند تغییرات مقادیر ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب کارایی مدل (EF) بین مدیریت‌های آبیاری نشان داد که با اعمال تنش از کارایی مدل کاسته شد. اثر تنش بر رشد گیاه در مرحله ابتدایی و توسعه رشد که از مراحل حساس این گیاه هستند در این مدیریت آبیاری بیشتر بود. نمودار پراکنش داده‌ها نسبت به خط یک به یک در مدیریت‌های مختلف آبیاری (شکل ۲) این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد. در مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز ۴۰ درصد مقادیر ضرایب گیاهی برآورد شده همبستگی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند ($R^2=0.95$). با افزایش ضریب بیشینه تخلیه مجاز، به تدریج درصد همبستگی در اثر تنش کاهش یافت و در نهایت در شرایط تنش شدید به کمترین مقدار رسید ($R^2=0.49$). درصد کمی از اختلاف بین ضرایب گیاهی برآوردی و اندازه‌گیری شده ناشی از خطاهای احتمالی در اندازه‌گیری ضریب گیاهی به روش بیلان آب، تفاوت‌های احتمالی ناشی از عملیات مدیریتی، آفات و بیماری، شرایط آب و هوایی، مشکلات تغذیه‌ای، رقم مورد استفاده، خطای مربوط به زمان عکس‌برداری و تنظیمات پایه دوربین بود و دلیل اصلی این اختلاف، ناشی از تنش آبی است که

در مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز (MAD) ۶۰ درصد، میانگین ضرایب گیاهی مراحل چهارگانه رشد به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۵۸، ۰/۹۸ و ۰/۴۹ اندازه‌گیری و ضرایب برآورد شده از مدل متناظر با این مراحل به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۷، ۱/۰۱ و ۰/۸۳ به دست آمد. ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب تعیین (R^2) به ترتیب ۱۳/۴ درصد و ۰/۹ بود. مقادیر ضرایب گیاهی برآورد شده در طول دوره رشد ۲/۴ درصد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود. مقدار ضریب کارایی مدل ۸۵ درصد بود که نشان داد مدل کارایی خود را در این شرایط مدیریتی حفظ نموده است. در مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز (MAD) ۸۰ درصد که گیاه در تنش شدید بود میانگین ضرایب گیاهی مراحل چهارگانه رشد به ترتیب ۰/۲۲، ۰/۳۶، ۰/۶۶ و ۰/۲۲ اندازه‌گیری شد. ضرایب گیاهی متناظر با این مراحل هم به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۷، ۰/۹۹ و ۰/۸۲ برآورد شد. ضرایب گیاهی برآورد شده در طول دوره رشد ۱۰/۴ درصد بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود. مقادیر ضریب تعیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بین داده‌های اندازه‌گیری و برآورد شده به ترتیب ۰/۴۹، ۰/۳۶۷ و ۰/۷۹۸ به دست آمد. ضریب کارایی مدل ۶۳

دو مدیریت آبیاری دیگر، زودتر وارد مرحله پایانی رشد گردید. با پژمردگی گیاه، شدت تعرق گیاه کاهش یافته و شکل ظاهری گیاه و محتوای رنگدانه‌ای (کلروفیل و کارتنوئید) آن دچار تغییرات شد. نتیجه این تغییرات در پوشش سبز گیاهی که به‌عنوان متغیر وابسته در تعیین ضریب گیاهی استفاده شده است نمایان شد. در این مرحله از رشد (پایانی) سرعت کاهش ضریب گیاهی متناسب با تغییرات پوشش سبز گیاهی نبود و با رسیدن محصول و خشک شدن هوا، ضریب گیاهی با سرعت بیشتری نسبت به پوشش سبز گیاهی کاهش یافت. در واقع با توجه به مقاوم-بودن گیاه چغندر قند به تنش آبی، روند کاهش درصد پوشش سبزینه‌ای گیاه بکندی صورت گرفت و آثار تنش در ضریب گیاهی زودتر از پوشش سبز گیاهی نمایان شد. به علت بالا بودن درصد پوشش سبزینه‌ای گیاه در این مرحله، مقدار ضریب گیاهی برآوردشده از مدل بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده بود.

به تدریج در مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز ۶۰ و ۸۰ درصد اثرات آن ظاهر شد. در مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز ۸۰ درصد (شکل ۲) و در دامنه ضرایب گیاهی ۰/۲ تا ۰/۶ یک واگرایی بین مقادیر اندازه‌گیری و برآوردشده وجود دارد. این واگرایی در دو مرحله توسعه و پایانی رشد مشاهده شد. در مرحله توسعه رشد که از مراحل حساس این گیاه است، علاوه بر تنش حاصل از مدیریت آبیاری، تنک‌کردن گیاه باعث واردشدن یک تنش مضاعف به گیاه شد. نتیجه این تنش‌ها انسداد روزنه‌ها، کاهش فعالیت‌های پروتوپلاسمی و تثبیت گاز کربنیک، کاهش سنتز پروتئین و کلروفیل و در نهایت کاهش رشد رویشی گیاه بود که سبب تقلیل فرایند فتوسنتز شد. با کاهش رشد رویشی گیاه شدت اثر سرعت باد بر تبخیر-تعرق گیاه کم و ضریب گیاهی اندازه‌گیری شده کاهش یافت. اثرات تنش با کاهش آبیاری شروع و تا پژمردگی برگ‌ها ادامه یافت. در این مدیریت آبیاری در اثر شدت تنش، گیاه در مقایسه با





شکل ۲ - نمودار پراکنش داده‌ها نسبت به خط یک به یک در مدیریت‌های مختلف آبیاری

نتیجه‌گیری

روش برای تعیین ضریب گیاهی چغندر قند استفاده نمود. جمع‌آوری آسان و سریع داده‌ها، دقت بیشتر و هزینه کمتر، امکان تهیه تصویر به تعداد دلخواه و عدم نیاز و وابستگی به داده‌های هواشناسی از مزایای این روش است. در استفاده از این روش برای تهیه تصاویر می‌توان از دوربین‌های دیجیتال و گوشی‌های تلفن همراه که قابلیت تصویربرداری در فضای رنگی RGB را دارند استفاده کرد. در این روش با تعیین درصد پوشش گیاهی می‌توان ضریب گیاهی و تبخیر-تعرق لحظه‌ای را محاسبه و از نتایج آن برای اعتبارسنجی داده‌های سنسور از دور در تعیین تبخیر-تعرق لحظه‌ای استفاده نمود؛ اما در شرایط تنش خشکی شدید یا کم‌آب‌باری، به‌عنوان نمونه برای مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز (MAD) ۸۰ درصد نتایج اعتبارسنجی داده‌ها نشان‌دهنده کارایی ضعیف مدل در برآورد ضریب گیاهی در این شرایط بود و استفاده از آن توصیه نمی‌شود.

در این مطالعه با عکس‌برداری از بالای سطح گیاه (سنسور از نزدیک) درصد پوشش گیاهی به روش پردازش تصاویر رقومی در فضای رنگی RGB تعیین و رابطه رگرسیونی آن با ضریب گیاهی به صورت یک تابع درجه سوم مدل‌سازی شد. مدل‌سازی در شرایط پتانسیل و اعتبارسنجی در سه مدیریت آبیاری با بیشینه تخلیه مجاز (MAD) ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد انجام شد. نتایج اعتبارسنجی، کارایی مدل برای تعیین ضریب گیاهی چغندر قند در دامنه تغییرات رطوبتی بین ظرفیت زراعی تا بیشینه تخلیه مجاز (MAD) ۶۰ درصد را تأیید کرد. آلن و همکاران (۱۹۹۸) در نشریه شماره ۵۶ فائو بیشینه تخلیه مجاز رطوبتی برای چغندر قند را ۰/۵۵ پیشنهاد داده‌اند. با توجه به این که ضریب پیشنهادی در دامنه رطوبتی بین ظرفیت زراعی تا بیشینه تخلیه مجاز رطوبتی ۶۰ درصد قرار دارد می‌توان از این

فهرست منابع

۱. بافکار، ع.، فرهادی، ب. و کریمی، ع.، ر. ۱۳۹۲. برآورد ضریب گیاهی ذرت دانه‌ای با استفاده از خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه (مطالعه موردی: ماهیدشت کرمانشاه). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۷، شماره ۴. ص ۸۳۲-۸۳۴.
۲. چگینی، م.، ع. و غالبی، س.، ۱۳۸۷. گزارش نهایی تعیین ضریب تعرق گیاهی در مراحل مختلف رشد چغندر بذری. مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند. کرج.

۳. رئوف، م، ۱۳۹۸. تعیین ضریب گیاهی چغندر قند با استفاده از لایسیمتر در دشت اردبیل و مقایسه آن با داده های جهانی فائو. پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب).

4. Adams, J.E. and G.F. Arkin. 1977. Alight interception method for measuring row crop ground cover. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 41:789–792.
5. Akanda, A.R., M.S. Rahman, M.S. Islam and A.J. Mila. 2017. Crop coefficient of a popular potato variety in Bangladesh. *Bangladesh J. Agril. Res.* 42(1): 67-76.
6. Alivernini A, Fares S, Ferrara C, Chianucci F. 2018. An objective image analysis method for estimation of canopy attributes from digital cover photography. *Trees.* 32(3):713-723.
7. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. *FAO Irrigation and drainage paper No. 56.* Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 56(97): e156.
8. Allen, R.G. 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *J. Hydrol.* 229: 27 - 41.
9. Andarzian, B, M. Bannayan, P. Steduto, H. Mazraeh, M. E. Barati, M. A. Barati, and A. Rahnema. "Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran." *Agricultural Water Management* 100, no. 1 (2011): 1-8.
10. Blasco J, Aleixos N, Roger J, Rabatel G, Moltó E. 2002. AE-Automation and emerging technologies: Robotic weed control using machine vision. *Biosystems Engineering.* 83(2):149-157.
11. Calera A, Martínez C, Melia J. 2001. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *International Journal of Remote Sensing.* 22(17):3357-3362.
12. Campillo, C., Prieto, M. H., Daza, C., Monino, M. J., & Garcia, M. I. (2008). Using digital images to characterize canopy coverage and light interception in a processing tomato crop. *Hortscience,* 43(6), 1780-1786.
13. Carvalho, D.F.D., D. G. D. Silva, H. S. D. Rocha, W. S. D. Almeida, E. D. S. Sousa. 2013. Evapotranspiration and crop coefficient for potato in organic farming. *Engenharia Agricola* 33(1):201-211.
14. Chen, J.C., Chang, N.B., and Shieh, W.K. 2003. Assessing wastewater reclamation potential by neural network model. *Journal of Engineering Application of Artificial Intelligence,* 16:149-157.
15. Chianucci F, Cutini A. 2013. Estimation of canopy properties in deciduous forests with digital hemispherical and cover photography. *Agricultural and Forest Meteorology.* 168:130-139.
16. De Medeiros GA, Arruda FB, Sakai El, Fujiwara M. 2001. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural Water Management.* 49(3):211-224.
17. Fernández-Pacheco DG, Escarabajal-Henarejos D, Ruiz-Canales A, Conesa J, Molina-Martínez JM. 2014. A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosystems engineering.* 117:23-34.
18. Giacomelli, G.A., Ling, P.P. and Morden, R.E. (1996). An automated plant monitoring system using machine vision. *International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems.* 440:377-382.
19. Giacomelli G, Ling P, Kole J. 1998. Determining nutrient stress in lettuce plants with machine vision technology. *HortTechnology.* 8(3):361-365.
20. Gime'nez, C. 1985. Resistencia a sequía de cultivares de girasol bajo condiciones de campo. Tesis Escuela Superior De Ingenieros Agro'nomos. Universidad de Cordoba.
21. Grattan S, Bowers W, Dong A, Snyder R, Carroll J, George W. 1998. New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops. *California agriculture.* 52(1):16-21.
22. Howell, J. A; L. H. ziska; M.C. Conmik; R. L. Burtch; B. B. Fisher .1987. Response of sugar Beet to irrigation frequency and off cut on clayloun soil, *Irrig – sci,* 8:1- 10.
23. Jamieson, P., Porter, J., and Wilson, D. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27: 337-350.
24. Korhonen L, Heikkinen J. 2009. Automated analysis of in situ canopy images for the estimation of forest canopy cover. *Forest Science.* 55(4):323-334.

25. Kvet, J. and J.K. Marshall. 1971. Assessments of leaf area and other assimilating plant surfaces. Z. sexta k jc, and p.g. jarvis, The Hague, The Netherlands. p. 517–574.
26. Laliberte A, Rango A, Herrick J, Fredrickson EL, Burkett L. 2007. An object-based image analysis approach for determining fractional cover of senescent and green vegetation with digital plot photography. *Journal of Arid Environments*. 69(1):1-14.
27. Lee K-J, Lee B-W. 2011. Estimating canopy cover from color digital camera image of rice field. *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 14(2):151-155.
28. Ling, P.P. and Ruzhitsky, V.N. (1992). Transplant uniformity inspection using machine vision. *International Symposium on Transplant Production Systems* 319:607-612.
29. Loague, K., and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Contaminant Hydrology Journal* 7: 51-73.
30. Mora M, Avila F, Carrasco-Benavides M, Maldonado G, Olguín-Cáceres J, Fuentes S. 2016. Automated computation of leaf area index from fruit trees using improved image processing algorithms applied to canopy cover digital photographs. *Computers and Electronics in Agriculture*. 123:195-202.
31. Parsons NR, Edmondson R, Song Y. 2009. Image analysis and statistical modelling for measurement and quality assessment of ornamental horticulture crops in glasshouses. *Biosystems engineering*. 104(2):161-168.
32. Patrignani A, Ochsner TE. 2015. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal*. 107(6):2312-2320.
33. Pekin B, Macfarlane C. 2009. Measurement of crown cover and leaf area index using digital cover photography and its application to remote sensing. *Remote Sensing*. 1(4):1298-1320.
34. Philipp I, Rath T. 2002. Improving plant discrimination in image processing by use of different colour space transformations. *Computers and electronics in agriculture*. 35(1):1-15.
35. Piayda A, Dubbert M, Werner C, Correia AV, Pereira JS, Cuntz M. 2015. Influence of woody tissue and leaf clumping on vertically resolved leaf area index and angular gap probability estimates. *Forest Ecology and Management*. 340:103-113.
36. Piccinni, G., J. KO, T. Marek and T. Howell. 2009. Determination of growth– stage– specific crop coefficients (Kc) of maize and sorghum. *Agricultural water management* 96:1698-1704.
37. Raabe K, Pisek J, Lang M, Korhonen L. 2017. Estimating the beyond-shoot foliage clumping at two contrasting points in the growing season using a variety of field-based methods. *Trees*. 31(4):1367-1373.
38. Raziiei, T., & Pereira, L.S. (2013). Spatial variability analysis of reference evapotranspiration in Iran utilizing fine resolution gridded datasets. *Agricultural Water Management*, 126, 104-118.
39. Rinaldi, M., and A. V. Vonella, 2006: The response of autumn and spring sown sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to irrigation in Southern Italy: water and radiation use efficiency. *Field Crops Res*. 95, 103—114.
40. Ryu Y, Nilson T, Kobayashi H, Sonnentag O, Law BE, Baldocchi DD. 2010. On the correct estimation of effective leaf area index: Does it reveal information on clumping effects? *Agricultural and Forest Meteorology*. 150(3):463-472.
41. Salas-Aguilar V, Sánchez-Sánchez C, Rojas-García F, Paz-Pellat F, Valdez-Lazalde JR, Pinedo-Alvarez C. 2017. Estimation of vegetation cover using digital photography in a regional survey of central Mexico. *Forests*. 8(10):392.
42. Story D, Kacira M, Kubota C, Akoglu A, An L. 2010. Lettuce calcium deficiency detection with machine vision computed plant features in controlled environments. *Computers and electronics in agriculture*. 74(2):238-243.
43. Uçan, K., & GENÇOĞLAN, C. (2004). The effect of water deficit on yield and yield components of sugar beet. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28(3), 163-172.
44. Wang, P., J. Qiu, Z. Huo, M.C. Anderson, Y. Zhou, Y. Bai, et. al. 2017. Temporal downscaling of crop coefficients for winter wheat in the North China Plain: A case study at the Gucheng Agro-Meteorological experimental station. *Water* 9(155): 1-16.

45. Woebbecke DM, Meyer GE, Von Bargen K, Mortensen DA. 1995. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. Transactions of the ASAE. 38(1):259-269.
46. Xiong Y, West C, Brown C, Green P. 2019. Digital image analysis of old world bluestem cover to estimate canopy development.
47. Zheng X, Wang X. 2010. Leaf vein extraction based on gray-scale morphology. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing. 2(2):25.

Determination of Crop Coefficient of Sugar Beet by Proximal Sensing Method Using Digital Images

R. Mohammadikia, A. A .Sadraddini¹, A. H. Nazemi, R. Delerhasannia, and
A. Onnabi Milani

PhD. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.
swirm@yahoo.com

Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.
sadraddini@tabrizu.ac.ir

Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.
ahnazemi@yahoo.com

Associate Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.
delearhasannia@yahoo.com

Assistant Prof., Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, Agricultural Research,
Education, and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran.
a_o_milani@yahoo.com

Received: April 2022 and Accepted: June 2022

Abstract

This study aimed to determine the crop coefficient of sugar beet using canopy cover extracted from digital images under different irrigation managements. The crop coefficient and canopy cover were directly measured by water balance and image processing methods, respectively, in 10 days intervals during the growing season. The crop coefficient of sugar beet in three irrigation managements with maximum allowable depletion (MAD) of 40%, 60%, and 80%, was estimated using its regression equation with canopy cover. This was modeled for potential conditions and then validated by using the average measurements in two years. The findings showed that the estimated crop coefficients were in good agreement with the observations in irrigation managements that had MAD of 40% and 60%. The coefficient of determination (R^2), normalized Root Mean Square Error (nRMSE), and model efficiency (EF) were 0.95, 0.11 and 0.95, for 40% MAD, 0.9, 0.13 and 0.85 for 60% MAD, respectively. The results illustrate that the crop coefficient of sugar beet, within the moisture range between field capacity to a MAD of 60%, can be reliably estimated by this approach. The values of determination coefficient (R^2), normalized Root Mean Square Error (nRMSE) and model efficiency (EF) decreased to 0.49, 0.37 and 0.63, respectively, for 80% MAD, indicating poor performance of the model under severe drought stress conditions. The proposed method has some advantages including easy and fast data collection, greater accuracy and lower cost, the ability to provide the desired number of images, and no need for meteorological data. Therefore, this can be applied to study the plant growth and crop coefficient variations during the growth period.

Keywords: Canopeo, Color space, Lysimetric, Maximum Allowable Depletion, Excessive green index

¹ - Corresponding author: Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.