



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱

صفحه‌های ۲۹۵-۳۰۸

DOI: 10.22059/jwim.2022.336225.954

مقاله پژوهشی:

مقایسه صحت روش‌های مختلف پردازش تصویر در برآورد پوشش سایه‌انداز گیاه چغندرقد با

استفاده از تصاویر دوربین دیجیتال

سیدرضا حدادی^۱، مسعود سلطانی^{۲*}، معصومه هاشمی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۳. محقق مرکز تحقیقات سنجش از راه دور دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴

چکیده

در پژوهش حاضر، از عکس‌برداری دیجیتال برای برآورد مقدار پوشش سایه‌انداز چغندرقد استفاده شد. برای این منظور، مجموعه تصاویر مرئی گیاه چغندرقد، در طول دوره رشد، در سال ۱۳۹۶، تحت تیمارهای تنش خشکی و نیتروژن در گلخانه‌ای در پژوهشگاه علوم گیاهی ETH واقع در لیندائو اسپیکان، سوئیس، تهیه شد. تیمارهای این پژوهش شامل دو سطح تنش آبیاری (کم‌آبیاری و آبیاری کامل) و سه سطح تنش کود (۲۰، ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن) بود. جداسازی تصاویر، با استفاده از کتابخانه‌های پردازش تصویر در زبان برنامه‌نویسی پایتون و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تمایز و آستانه‌گذاری تصویرها انجام گرفت. به این منظور از روش‌های ترکیبی جداسازی با استفاده از شاخص‌های گیاهی تمایز (گیاه از خاک و پس‌زمینه) سبزیگی مازاد، تفاضل باند سبز مازاد با باند قرمز مازاد و بدون استفاده از شاخص تمایز و الگوریتم‌های آستانه‌گذاری انتخابی و آستانه‌گذاری خودکار Otsu و مثلثی استفاده شد. بنابراین، سه روش ترکیبی متشکل از الگوریتم‌های تمایز و آستانه‌گذاری برای برآورد پوشش سایه‌انداز ایجاد شد که روش‌های ترکیبی شاخص گیاهی تفاضل سبزیگی مازاد با مقدار باند قرمز مازاد و آستانه‌گذاری انتخابی (ExGR & M_Threshold) و شاخص سبزیگی مازاد و آستانه‌گذاری Otsu (ExG & Otsu) به ترتیب، بیش‌ترین صحت، ۹۴/۶۹ درصد و ۸۷/۵۲ درصد را داشتند. روش بدون شاخص تمایز و آستانه‌گذاری مثلثی (No_Discrimination & Triangle) کم‌ترین صحت را با مقدار ۵۳/۱۸ درصد داشت.

کلیدواژه‌ها: آستانه‌گذاری، تمایز، تنش خشکی، تنش نیتروژن، جداسازی.

Comparing the accuracy of different image processing methods to estimate sugar beet canopy cover by digital camera images

Seyed Reza Haddadi¹, Masoud Soltani^{2*}, Masoumeh Hashemi³

1. M. Sc. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2. Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3. Researcher, Faculty of Remote Sensing Institute of Civil Engineering, Sharif University, Tehran, Iran.

Received: December 25, 2021

Accepted: June 14, 2021

Abstract

In this study, digital photography was used to estimate the amount of sugar beet's canopy cover. For this purpose, a dataset of visible images of sugar beet crops, during the growing season, in 2018, under drought and nitrogen stress were taken in a greenhouse at the ETH research station for plant sciences in Lindau Eschikon, Switzerland. The treatments of this research included two levels of irrigation stress (low water and sufficient water) and three levels of fertilizer stress (20, 40, and 80 kg/ha nitrogen). Image discrimination and threshold algorithms are applied to perform segmentation on the images in Python. Compound segmentation methods using Excess Green, Excess Green minus Excess Red discrimination vegetation indices (plant from soil and background), and without discrimination index and manual input thresholding and Otsu and Triangle automated algorithms were used. Therefore, nine different compound methods including discrimination and thresholding algorithms used to estimate the canopy cover under different stresses. Results showed that compound methods of Excess Green minus Excess Red vegetation index and manual input thresholding and Excess Green Index and Otsu have the highest accuracy, 94.69 and 87.52 percent, respectively. The method without discrimination index and triangle thresholding which has 53.18 percent accuracy was the least accurate method.

Keywords: Discrimination, Drought stress, Nitrogen stress, segmentation, thresholding.

مقدمه

(Hemayati et al., 2017). نیتروژن در چغندر قند نقش اساسی در گسترش برگ‌ها برای جذب نور خورشید ایفا می‌کند و یک عامل قطعی در نرخ رشد برگ‌ها و ریشه‌ها در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که مقدار نیتروژن خاک معمولاً محدود است، کشاورزان مجبور هستند که مقدار نیتروژن خاک را با استفاده کودهای نیتروژن‌دار افزایش دهند تا به این وسیله به محصول بیش‌تر و بهتری دست پیدا کنند (Kamali et al., 2017).

به‌کارگیری تکنیک‌های معتبر تجزیه و تحلیل تصاویر برای جداسازی^۱ گیاهان از خاک و پس‌زمینه تصاویر ضروری می‌باشد (Wenhua Mao et al., 2003). جداسازی تصاویر یکی از مراحل اساسی پردازش تصاویر است که به‌طور کلی متشکل از تفکیک اشیای موردنظر یک تصویر از پس‌زمینه^۲ آن است. در میان تکنیک‌های جداسازی، روش‌های مبتنی بر آستانه‌گذاری^۳ و خوشه‌بندی^۴، بیش‌ترین استفاده را برای جداسازی تصاویر دارند (Abdullah et al., 2012; Riehle et al., 2020). در میان روش‌های خودکار آستانه‌گذاری، روش Otsu (1979) توسعه داده شد، یکی از پراستفاده‌ترین و بهترین روش‌ها است که توجه بسیاری از پژوهش‌گران را جلب کرده است (Thailambal & Yogeshwari, 2020; Yu et al., 2021). روش مبتنی بر آستانه‌گذاری Otsu بر روی تصاویر خاکستری کار می‌کند و به‌صورت خودکار، مقدار بهینه حد آستانه را از هیستوگرام تصویر خاکستری انتخاب می‌کند. روش مثلثی، که توسط Zack et al. (1977) ارائه شد یکی دیگر از روش‌های خودکار آستانه‌گذاری است که حد آستانه بهینه در آن، از قطع خط بین نقطه اوج هیستوگرام و دورترین نقطه پایانی هیستوگرام به‌دست می‌آید (Aureliano Netto et al., 2015; Kim et al., 2018). چندین روش برای جداسازی سایه‌انداز گیاهان پیشنهاد شده است که به‌طور خاص، به

تعیین عوامل تنش زراعی با استفاده از علائم ظاهری، فرایندی پیچیده است که به وجود نیروی باتجربه و آموزش‌دیده علم کشاورزی و آسیب‌شناسی گیاهی نیازمند است (Ghosal et al., 2018). پردازش تصویر^۱ یکی از ابزارهای مهم، سریع و مقرون‌به‌صرفه در کشاورزی مدرن به‌شمار می‌رود. هدف اصلی استفاده از فناوری پردازش تصویر در کشاورزی مدرن، افزایش بهره‌وری استفاده از نهاده‌ها، تشخیص به موقع تنش‌های گیاهی و کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در وقت و به‌هنگام‌بودن اطلاعات وضعیت گیاه در طول دوره رشد آن است (Story & Kacira, 2015).

هم‌چنین از تکنولوژی پردازش تصویر در تقسیم‌بندی اراضی، تعیین بهترین نقاط برای کشت محصولات مختلف با در نظر گرفتن منابع آب و نوع خاک، تشخیص علف‌های هرز، تشخیص بیماری گیاه و ایجاد سیستم خودآبیاری گیاهان و غیره استفاده می‌شود (An et al., 2019; Kisalaei et al., 2014; Noda et al., 2006; Poonguzhali & Vijayabhanu, 2014; Saxena & Armstrong, 2019).

چغندر قند با نام علمی *Beta vulgaris L*. گیاهی دو ساله و غده‌ای است که در سال اول تولید میوه و در سال دوم تولید بذر می‌کند. در رشد چغندر قند عواملی هم‌چون آب، کود، طول روز، دما و میزان رطوبت هوا بسیار مؤثر می‌باشد (Latifoltojar et al., 2014; Orak et al., 2011). وقوع تنش خشکی به‌ویژه در مراحل اولیه رشد چغندر قند می‌تواند عملکرد نهایی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش دهد (Sadeghzadeh Hemayati et al., 2017). تحت تنش خشکی و در مواجهه با کمبود آب، برگ‌های چغندر قند گرایش به خوابیدگی بر روی خاک دارند و بنابراین سطح مؤثر آن‌ها در برابر نور خورشید کاهش می‌یابد (Moosavi et al., 2017; Sadeghzadeh

در این مطالعه، برای جداسازی از دو روش آستانه‌گذاری خودکار Otsu و مثلثی و روش غیرخودکار $^{12}M_Threshold$ استفاده شد. برای بهره‌گیری از آستانه‌گذاری، نخست تصاویر رنگی سه‌باند به تصاویر خاکستری تک‌باند تبدیل شد. این کار با استفاده از شاخص تمایز انجام شد. استفاده از شاخص‌های تمایز نظیر ExG و ExGR، از طریق بالا بردن تفاوت رنگ پیکسل برگ و خاک به جداسازی کمک می‌کند. هدف، ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف برآورد پوشش سایه‌انداز گیاه چغندر قند، براساس صحت و سرعت پردازش تصویر و امکان‌سنجی استفاده از برخی شاخص‌های گیاهی بر مبنای تصاویر رنگی برای بهبود تمایز در روش‌های مختلف جداسازی پوشش سایه‌انداز بود.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، مجموعه تکنیک‌های پردازش تصویر، برای تجزیه و تحلیل تصاویر RGB¹³ حاصل از پژوهش *Khanna et al.* (2019) به‌کار گرفته شد. آزمایش در یک گلخانه تحت شرایط کنترل‌شده آب‌وهوایی در پژوهشگاه علوم گیاهی ETH واقع در لینداو اسپیکان¹⁴، سوئیس انجام شد. گیاه چغندر قند از واریته Samuela بود. شش گیاه چغندر قند در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۸ در گلدان‌هایی در اندازه‌های ۴۰×۲۰×۱۵/۵ سانتی‌متر کاشته شد. در این پژوهش تأثیر تیمارهای سه سطح تنش نیتروژن (تنش کم، متوسط و زیاد) و دو سطح تنش خشکی (کم‌آبیاری، آبیاری کافی) بر ویژگی‌های رویشی گیاه چغندر قند در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. سطوح تنش نیتروژن، به‌ترتیب، معرف کمبود نیتروژن، مقدار معمول و کافی نیتروژن و نیتروژن بیش از حد، معادل با ۲۰، ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم بر هکتار ازت در هر گلدان بود. تیمارهای تنش نیتروژن، به‌صورت کودآبیاری و براساس تجارب شخصی و بهترین اقدامات مدیریتی کشاورزان محلی اعمال شد.

جداسازی رنگ سبز (سبزینگی) گرایش دارد. در یک پژوهش، برای جداسازی تصویر پوشش سایه‌انداز¹⁵ محصول برنج از پس‌زمینه، از شاخص‌های ExG¹⁶، MexG¹⁷ (شاخص ExG اصلاح‌شده) و gn¹⁸ و آستانه‌گذاری غیرخودکار انتخابی استفاده شده است. استفاده از شاخص MExG و آستانه‌گذاری انتخابی با حد آستانه ۰/۰۳ کم‌ترین خطا، را با ۰/۱۳ درصد و بیش‌ترین ضریب همبستگی را با ۰/۹۴ داشت (Lee & Lee, 2011). در پژوهشی دیگر، برای جداسازی پوشش سایه‌انداز محصول سویا، از یک شاخص تمایز جدید گیاهی به نام (b-a) و آستانه‌گذاری خودکار مثلثی و Otsu استفاده شده است. روشی که از آستانه‌گذاری Otsu استفاده کرده است، $98/18 \pm 1/79$ درصد صحت و روشی که از آستانه‌گذاری مثلثی استفاده کرده است، $97/85 \pm 1/87$ درصد صحت داشته است (Kim et al., 2015). در پژوهشی، پردازش جداسازی برای محصول ذرت با شاخص‌های گیاهی تمایز ExG، ExGR¹⁹ و NDI²⁰ (شاخص تفاضل نرمال‌شده) با سه روش آستانه‌گذاری خودکار Otsu، Ridler و مثلثی انجام شده است که صحت روش آستانه‌گذاری مثلثی برای پردازش با شاخص NDI، $90/70$ درصد و با شاخص ExGR، $90/23$ درصد بوده است، هم‌چنین برای روش‌های آستانه‌گذاری Otsu و Ridler، پردازش با شاخص NDI، صحت نتایج به‌ترتیب $89/06$ درصد و $89/03$ درصد بوده است (Aureliano Netto et al., 2018). نخستین روش خودکار آستانه‌گذاری، روش ارائه‌شده توسط Ridler & Calvard (1978) بوده است. *Riehle et al.* (2020) در پژوهش خود درباره ذرت و چغندر قند، روشی ترکیبی بر مبنای شاخص تمایز و فضا‌های رنگی ارائه کردند که روش‌های جداسازی با شاخص ExG و ExR & ExG در فضای رنگی Cielab، بیش‌ترین صحت ($97/4$ درصد) را نشان داد.

تحلیل‌های آماری با استفاده از پارامترهای صحت، جذر میانگین مربعات خطا^{۲۴} (RMSE) و R^2 انجام شد. صحت روش‌های جداسازی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$\text{Accuracy} = 100 \times \left(\frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که A، بیانگر مجموع پیکسل‌های تصویر واقعیت زمینی^{۲۵} است که به‌عنوان پوشش سایه‌انداز گیاه شناخته شده است و B بیانگر مجموع پیکسل‌هایی است که در روش جداسازی به‌عنوان پوشش سایه‌انداز تعیین می‌شود (Coy et al., 2016). پارامترهای میانگین (μ) و انحراف معیار (σ) صحت در این پژوهش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

در نهایت برای تعیین اثربخشی روش‌های جداسازی در تمام دوره کشت، از روش تجزیه و تحلیل واریانس^{۲۶} (ANOVA) توسط نرم‌افزار Minitab استفاده شده و مقایسه میانگین صحت روش‌ها با استفاده از آزمون توکی^{۲۷} انجام شد.

مراحل انجام پژوهش

شکل (۱)، فلوچارت مراحل روش پیشنهادی در این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در فلوچارت مشاهده می‌شود، مراحل انجام پژوهش، به سه مرحله کلی آماده‌سازی، پردازش داده‌ها و استخراج ویژگی تقسیم شد. مرحله آماده‌سازی داده‌ها شامل پیش‌پردازش داده‌ها و تعیین منطقه ROI^{۲۸} و مرحله پردازش داده‌ها شامل تبدیل تصاویر RGB به خاکستری، آستانه‌گذاری و ایجاد ماسک باینری^{۲۹} بود. در مرحله استخراج ویژگی، پوشش سایه‌انداز چغندر قند برآورد شده و تجزیه و تحلیل‌های آماری انجام شد.

آماده‌سازی داده‌ها

برای پیش‌پردازش^{۳۰} تصاویر، در ابتدا بخش موردنظر در تصویر برش داده شد. به این پیش‌پردازش، در اصطلاح برش منطقه موردنظر (ROI) گفته می‌شود. پیش از انجام این

نیاز آبی کل چغندر قند بستگی به آب‌وهوا و طول دوره کامل رشد دارد و در محدوده ۵۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر بر دوره کشت تغییر می‌کند (Steduto et al., 2012). تنش خشکی، شامل دو سطح کم‌آبایی و آبیاری کافی بود. گلدان‌های تیمار آبیاری کافی، به‌صورت منظم و متوالی هر ۲-۳ روز یک‌بار آب دریافت می‌کرد. تیمار تنش خشکی، براساس توزین گلدان‌ها و به‌روش بیلان جرم اعمال شد. در این پژوهش، برای گلدان‌های تیمار کم‌آبایی، آبیاری اولیه کافی و به‌دنبال آن یک فاز خشکی پس از جوانه‌زنی در نظر گرفته شد. تنش خشکی در مرحله میانی رشد در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۲۵ اعمال شد و دوباره از مرحله نهایی رشد در تاریخ ۱۳۹۶/۳/۲۱، آبیاری به‌صورت منظم ادامه پیدا کرد.

تصویربرداری از گیاه چغندر قند در این پژوهش، از ۱۳۹۶/۱۰/۲۸ مصادف با تاریخ کاشت چغندر قند آغاز شد و در ۱۶ تاریخ با فاصله زمانی میانگین چهار روز، تا انتهای آزمایش انجام شد. به‌منظور اخذ تصاویر از دوربین Intel Realsense ZR300 استفاده شد. این دوربین از مزایایی نظیر وزن کم، مصرف برق کم و امکان تصویربرداری در فضای باز برخوردار است. ابعاد تصاویر RGB برداشته شده، 1920×1080 پیکسل است که شامل گلدان و پس‌زمینه محل آزمایش می‌باشد.

شاخص‌های آماری

برای اعتبار بخشیدن به فرایند جداسازی، صحت نه روش مختلف جداسازی، مرکب از شاخص‌های تمایز و الگوریتم‌های آستانه‌گذاری در مراحل مختلف رشد محاسبه شد و مورد مقایسه قرار گرفت. الگوریتم‌های ترکیبی، روش‌های جداسازی متشکل از ExGMT^{۱۵}، ExGO^{۱۶}، ExGT^{۱۷}، ExGRMT^{۱۸}، ExGRO^{۱۹}، ExGRT^{۲۰}، NDMT^{۲۱}، NDO^{۲۲} و NDT^{۲۳} بود.

مقایسه صحت روش‌های مختلف پردازش تصویر در برآورد پوشش سایه‌انداز گیاه چغندر قند با استفاده از تصاویر دوربین دیجیتال

چرخش^{۳۱} تصاویر در محیط برنامه‌نویسی MATLAB R2014a و برش منطقه موردنظر در محیط برنامه‌نویسی Python 3.8 انجام شد.

پیش‌پردازش، چرخشی در حدود ۲- تا ۲/۵ درجه در تصاویر مشاهده شد که باید برای انجام پیش‌پردازش جداکردن منطقه موردنظر، اصلاح می‌شد (شکل ۲). اصلاح

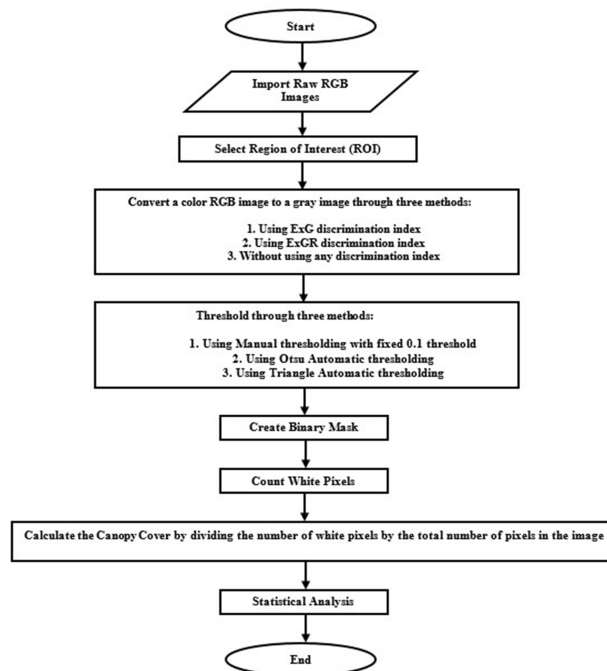


Figure 1. Flowchart of steps of proposed method

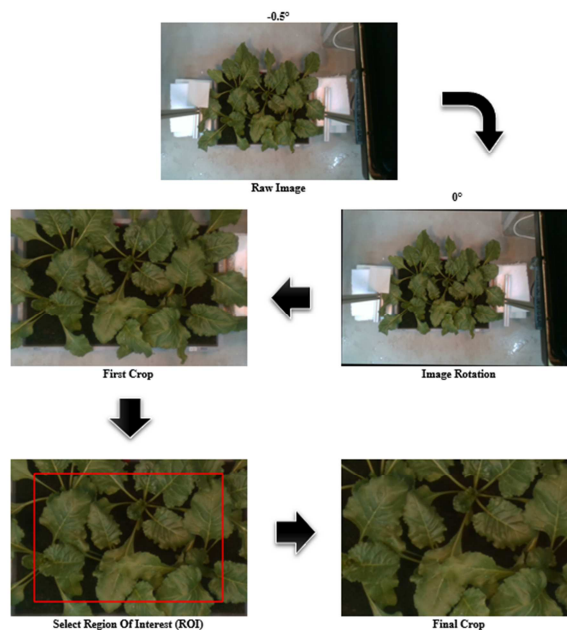


Figure 2. Image pre-processing and cropping ROI

می‌کند. از تفاضل شاخص ExG و شاخص ExR، شاخص ExGR (Meyer & Neto, 2008) به دست می‌آید که هم‌چون شاخص ExG، پیکسل‌های برگ را از پیکسل‌های خاک متمایز می‌کند (رابطه ۵).

$$\text{Grayscale}_{\text{RGB2GRAY}} = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (\text{رابطه } ۲)$$

$$\text{ExG} = 2G - R - B \quad (\text{رابطه } ۳)$$

$$\text{ExR} = 1.4R - G \quad (\text{رابطه } ۴)$$

$$\text{ExGR} = \text{ExG} - \text{ExR} \quad (\text{رابطه } ۵)$$

در روابط بالا، R، G، و B بازتاب هر یک از لایه‌های تصویر رنگی می‌باشد.

جداسازی تصاویر یکی از مراحل اساسی پردازش تصویر است که عموماً متشکل از تمایز اشیای موردنظر یک تصویر از پس‌زمینه آن است. بنابر مطالعه Al-amri et al. (2010)، این پردازش اغلب یک گام اساسی در تجزیه و تحلیل تصاویر است، که در آن نتایج با کیفیت پایین ممکن است بر کل پردازش‌ها تأثیر بگذارد و باعث حصول نتایج با دقت کم شود. شکل (۳)، تبدیل تصاویر RGB به تصویر خاکستری با استفاده از هر یک از روش‌های ذکرشده را نشان می‌دهد.

در گام بعدی، آستانه‌گذاری تصاویر خاکستری انجام شد. آستانه‌گذاری یکی از ساده‌ترین روش‌های جداسازی تصاویر است. در این روش، میزان روشنایی هر پیکسل از تصویر با یک حد آستانه مقایسه می‌شود.

تمام مراحل پردازش تصویر، با استفاده از کتابخانه OpenCV در محیط برنامه‌نویسی پایتون کدنویسی شد.

پردازش داده‌ها

در این مرحله، تصاویر برش‌خورده، وارد فرایند جداسازی شد؛ به این صورت که نخست، با استفاده از شاخص‌های گیاهی تمایز^{۳۲}، تصاویر RGB به خاکستری^{۳۳} تبدیل و پوشش سایه‌انداز از خاک جدا شد، سپس با استفاده از الگوریتم‌های آستانه‌گذاری، تصویر تمایز یافته به حالت باینری در آمد. به این تصویر که متشکل از دو رنگ سیاه و سفید می‌باشد، اصطلاحاً ماسک باینری می‌گویند.

رابطه (۲)، تبدیل تصویر رنگی سه‌بانه به تصویر تک‌بانه خاکستری را با استفاده از دستور RGB2GRAY نشان می‌دهد. این رابطه، از راهنمای کتابخانه پردازش تصویر در محیط برنامه‌نویسی Python استخراج شد. در این حالت تمایزی بین پیکسل‌های اضافی خاک با پیکسل‌های برگ اتفاق نمی‌افتد و ممکن است در مرحله آستانه‌گذاری، پیکسل‌های خاک با پیکسل‌های برگ، اشتباه گرفته شوند. رابطه (۳)، شاخص تمایز ExG را نشان می‌دهد که با استفاده از این شاخص، پیکسل‌های خاک به رنگ سیاه درآمده و تمایز خاک از برگ اتفاق می‌افتد (Woebbecke et al., 1995). رابطه (۴)، شاخص باند قرمز مازاد را نشان می‌دهد که اختلال^{۳۴} تصویر را حذف

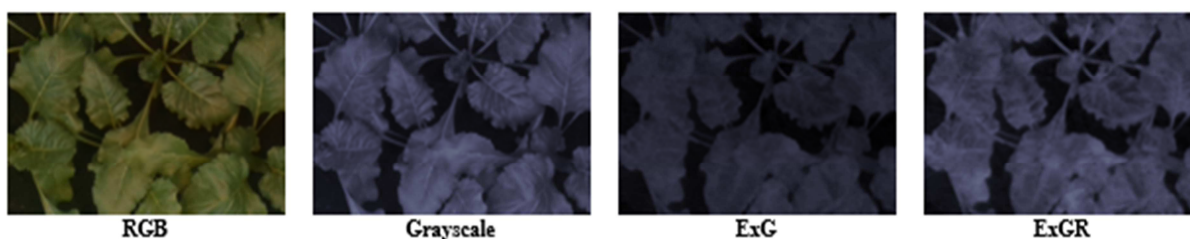


Figure 3. Converting a RGB image to a gray image through three different methods used in analysis

(غیرخودکار) استفاده شد. حد آستانه، عددی در بازه صفر تا ۲۵۵ است. در این مطالعه، برای حالت آستانه‌گذاری غیرخودکار، از حد آستانه ۲۵/۵ استفاده شده است. اگر مقیاس عدددهی پیکسل‌ها به صفر تا یک تغییر کند، در این صورت عدد حد آستانه مذکور، مقداری برابر با ۰/۱ دارد (۰/۱ = ۲۵۵ ÷ ۲۵/۵). حد آستانه، هیستوگرام را به دو بخش تقسیم می‌کند، که این دو بخش در اینجا، پوشش گیاهی و خاک هستند. مقدار حد آستانه ۰/۱، با سعی و خطا به دست آمده و رویکرد مقایسه‌ای با روش‌های آستانه‌گذاری خودکار Otsu و مثلی دارد. در ادامه، ماسک باینری برای همه تصاویر به روش‌های ذکر شده، تولید شد.

استخراج ویژگی

در این گام، پیکسل‌های سفید که معرف برگ هستند شمارش شدند و از طریق رابطه (۸)، پوشش سایه‌انداز محاسبه شد.

(رابطه ۸) Canopy cover (%) =

$$\frac{\text{White pixels number}}{\text{total pixels}} \times 100$$

مقادیر واقعی پوشش سایه‌انداز به روش‌های مختلف میدانی و غیرمیدانی قابل برداشت هستند. یکی از این روش‌ها، استفاده از ابزارهای ویرایش تصویر (مانند فتوشاپ) برای جداسازی پیکسل‌های برگ در تصاویر می‌باشد (Coy et al., 2016). در این مطالعه، تصاویر واقعیت زمینی، با استفاده از روش‌های مبتنی بر پیکسل در نرم‌افزار ویرایش تصویر GIMP 2.10 جداسازی شدند.

مراحل رشد

تصاویر در یک دوره ۷۰ روزه از کشت (از تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۸ تا تاریخ ۱۳۹۷/۰۱/۰۹) برداشته شد. با در نظر گرفتن رشد و افزایش تعداد برگ‌ها، این دوره به سه

در صورتی که روش‌نمایی پیکسل بیش‌تر از آستانه باشد، با رنگ سفید (۲۵۵) و در غیر این صورت با رنگ سیاه (صفر) علامت‌گذاری می‌شود. در نتیجه ایجاد تصویر باینری (ماسک) فقط پیکسل‌های بزرگ‌تر از حد آستانه در آن وجود خواهد داشت. در آستانه‌گذاری ساده انتخابی (غیرخودکار)، کاربر باید مقدار حد آستانه را وارد کند.

روش آستانه‌گذاری Otsu (1979) تلاش می‌کند تا یک حد آستانه (t) را بیابد که واریانس وزنی درون‌کلاسی ارائه‌شده در رابطه (۶) کمینه شود:

$$\sigma_w^2(t) = q_1(t)\sigma_1^2(t) + q_2(t)\sigma_2^2(t) \quad (\text{رابطه ۶})$$

Where:

$$q_1(t) = \sum_{i=1}^t P(i)$$

$$q_2(t) = \sum_{i=t+1}^I P(i)$$

$$\sigma_1^2(t) = \sum_{i=1}^t [i - \mu_1(t)]^2 \frac{P(i)}{q_1(t)}$$

$$\sigma_2^2(t) = \sum_{i=t+1}^I [i - \mu_2(t)]^2 \frac{P(i)}{q_2(t)}$$

احتمال رخداد (P) برای هر پیکسل، در دو دسته یک و

دو محاسبه می‌شود که توابع احتمال دسته‌ها با $q_1(t)$ و $q_2(t)$ مشخص شده است. روش آستانه‌گذاری Otsu طوری مقدار t را تعیین می‌کند که مقدار $\sigma_w^2(t)$ مینیمم شود.

روش مثلی، یا به عبارت بهتر، روش فاصله بیشینه مثلی^{۳۵}، یک روش آستانه‌گذاری خودکار براساس هیستوگرام تصویر است که توسط Zack et al. (1977) ارائه شد. $P_{max}=[b, h(b)]$ نقطه اوج هیستوگرام و $P_a=[a, h(a)]$ نقطه دارای بیش‌ترین فاصله از این نقطه اوج نسبت به دو طرف انتهای هیستوگرام می‌باشد. خط I از قطع این دو نقطه به دست می‌آید. نقطه $P_t=[t, h(t)]$ بیش‌ترین فاصله از خط I را نشان می‌دهد. رابطه (۷)، نحوه تعیین حد آستانه t را به روش آستانه‌گذاری مثلی نشان می‌دهد:

(رابطه ۷) $t_{Triangle} =$

$$\max(t) \left[\frac{|(t-a)h(b)-(b-a)h(t)|}{\sqrt{(b-a)^2+h(b)^2}} \right]$$

در این مطالعه، برای آستانه‌گذاری از سه روش، آستانه‌گذاری Otsu، مثلی و آستانه‌گذاری انتخابی

سایه‌انداز با گذشت زمان و پیشرفت مراحل رشد قابل‌ملاحظه است. در مورد روش آستانه‌گذاری مثلثی، اضافه برآورد پوشش سایه‌انداز نسبت به واقعیت زمینی، به‌وضوح دیده می‌شود.

برای مقایسه عملکرد روش‌های مختلف جداسازی، مقادیر پوشش سایه‌انداز برآوردشده برای تکرارهای مختلف میانگین گرفته شد و یک مجموعه معرف تیمار تنش به‌وجود آمد. شکل‌های (۵) و (۶)، به‌ترتیب، برآورد پوشش سایه‌انداز در سطوح مختلف تنش خشکی و نیتروژن را برای روش‌های مختلف جداسازی نشان می‌دهد.

بخش ابتدایی، میانی و انتهایی تقسیم شد. جدول (۱)، تقسیم‌بندی دوره کشت را به سه مرحله مذکور نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

شکل (۴)، یک نمونه از نتایج ایجاد ماسک باینری را با استفاده از شاخص گیاهی تمایز ExG و روش‌های مختلف آستانه‌گذاری نشان می‌دهد. تصاویر از چپ به راست، مربوط به مرحله ابتدایی، میانی و انتهایی رشد می‌شود. با توجه به شکل (۴)، افزایش پوشش

Table 1. Sugar beet growth stages in presented study

Date	Growth Stage	Number of days	Canopy cover (%)
2018/01/18 – 2018/02/12	Initial	25	0 – 36.24
2018/02/13 – 2018/02/26	Mid	14	36.24 – 82.12
2018/02/27 – 2018/03/29	End	31	82.12 – 97.93

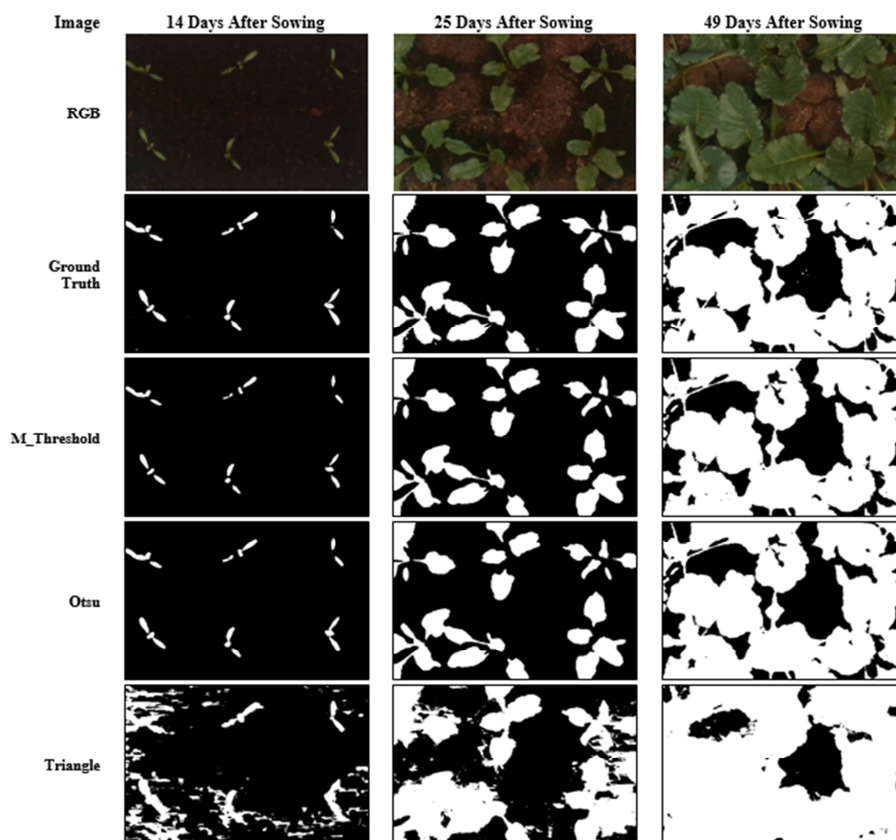


Figure 4. Binary Mask created for low water treatment with ExG index and different thresholding methods

مقایسه صحت روش‌های مختلف پردازش تصویر در برآورد پوشش سایه‌انداز گیاه چغندر قند با استفاده از تصاویر دوربین دیجیتال

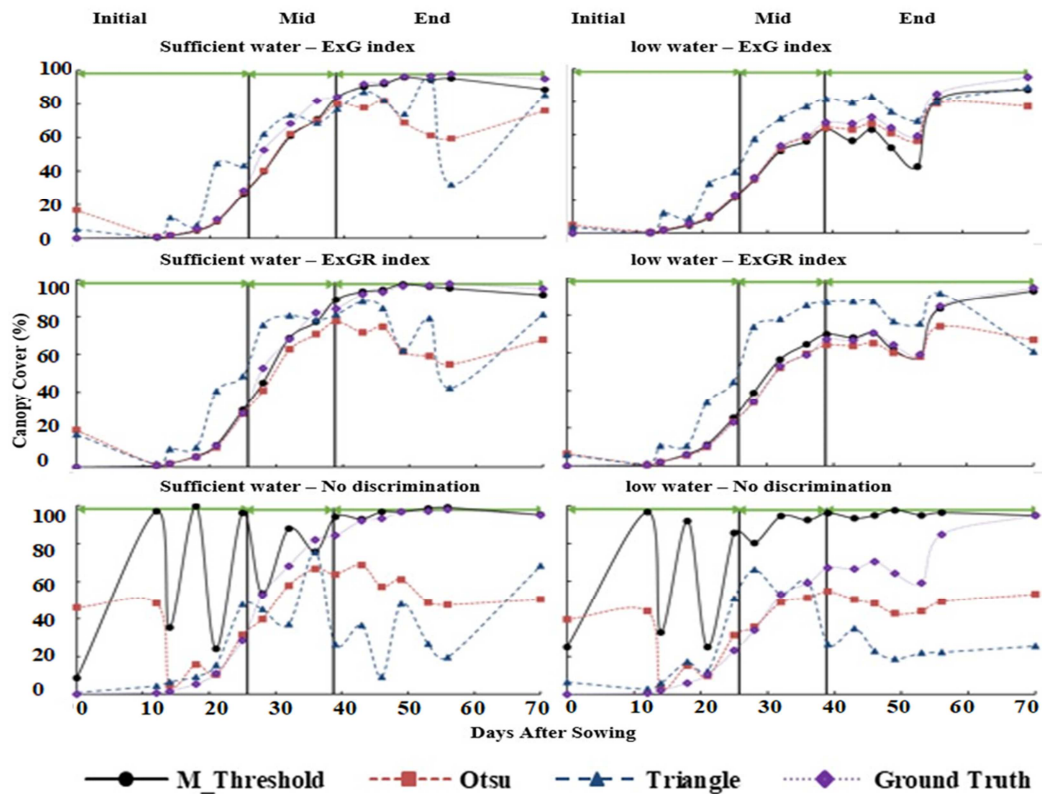


Figure 5. Changes in the estimation of sugar beet Canopy Cover under drought stress

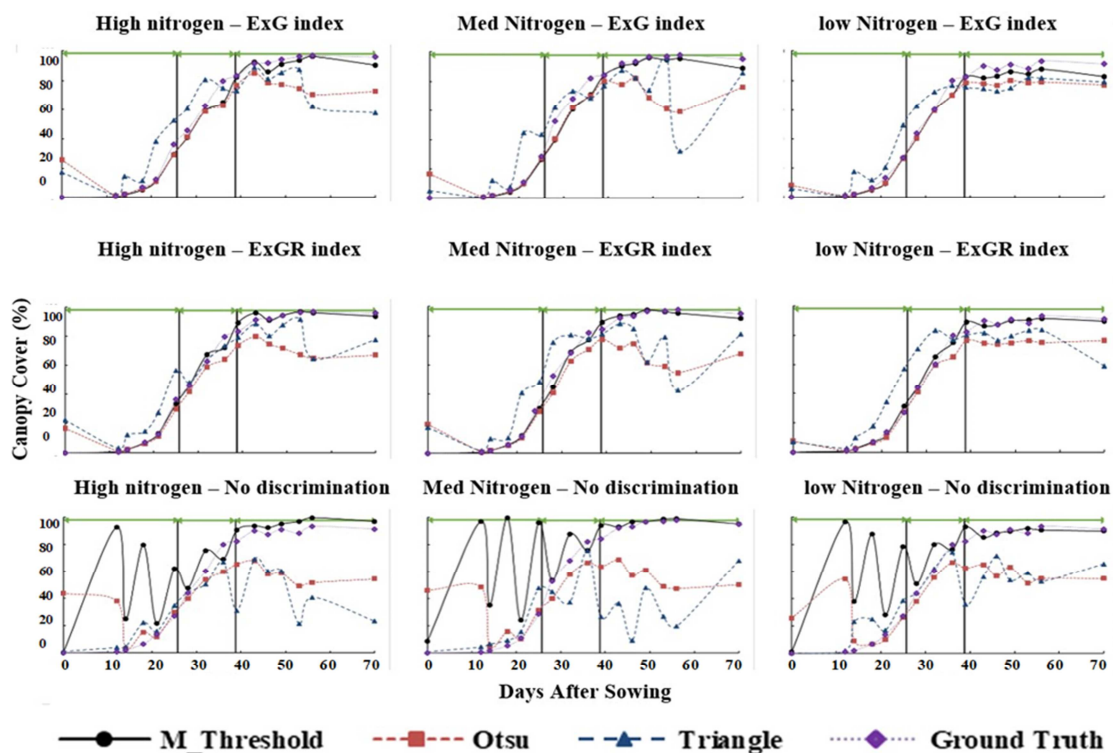


Figure 6. Changes in the estimation of sugar beet Canopy Cover under nitrogen stress

میزان همگرایی نسبت به مقادیر واقعی بدون استفاده از شاخص تمایز را الگوریتم Otsu و در مرحله میانی رشد نشان می‌دهد.

در سطح زیاد و متوسط نیتروژن، با استفاده از شاخص تمایز ExG و ExGR و با استفاده از آستانه‌گذاری خودکار مثلثی و Otsu در مرحله انتهایی رشد، نسبت به مقادیر واقعی، ناهمگرایی مشاهده می‌شود، درحالی‌که آستانه‌گذاری انتخابی (غیرخودکار) بیش‌ترین همگرایی به داده واقعی را در این مرحله نشان می‌دهد. در همین سطوح تنش، و با استفاده از شاخص‌های ExG و ExGR، بیش برآورد روش آستانه‌گذاری مثلثی از اواسط مرحله ابتدایی تا مرحله میانی رشد، قابل ملاحظه است.

در سطح کم نیتروژن و با استفاده از شاخص‌های تمایز ExG و ExGR روند همگرایی قابل ملاحظه‌ای از روش‌های مختلف آستانه‌گذاری می‌توان مشاهده کرد. همانند سطوح متوسط و زیاد تنش نیتروژن، از اواسط مرحله ابتدایی تا مرحله میانی، روش آستانه‌گذاری مثلثی، نسبت به مقادیر واقعی، بیش برآورد نشان می‌دهد.

همانند تنش خشکی، روش جداسازی بدون استفاده از شاخص تمایز، حتی با استفاده از آستانه‌گذاری‌های خودکار Otsu و مثلثی روند منظمی را نشان نمی‌دهد و در مقایسه با مقادیر واقعی خطای قابل توجهی را نشان می‌دهد. بدون استفاده از شاخص تمایز، الگوریتم آستانه‌گذاری Otsu در مرحله میانی رشد، بیش‌ترین همگرایی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در مراحل ابتدایی رشد گیاه که تعداد پیکسل‌های پس‌زمینه غالب است، در حالتی‌که از شاخص‌های گیاهی تمایز استفاده نشود، روش آستانه‌گذاری انتخابی، بهتر از روش‌های خودکار جواب خواهد داد که دلیل اصلی آن، تعیین حد آستانه، به روش سعی و خطا می‌باشد. در واقع بهترین نتیجه براساس

مشاهده می‌شود که تنها روش آستانه‌گذاری انتخابی (M_Threshold) است که با استفاده از روش تمایز ExG و ExGR در روز صفر، برآوردی از پوشش سایه‌انداز نداشته است، در حالی‌که سایر روش‌های آستانه‌گذاری (آستانه‌گذاری Otsu و مثلثی) در روز صفر (در حالی‌که هنوز گیاه کاشته نشده است) برآورد اشتباه از پوشش سایه‌انداز دارند. مقادیر واقعی پوشش سایه‌انداز به مقادیر به‌دست‌آمده از طریق روش‌های آستانه‌گذاری انتخابی و Otsu نزدیک‌تر می‌باشند و روش آستانه‌گذاری مثلثی اختلاف بیش‌تری نسبت به مقادیر واقعی دارد. علاوه بر این، روش آستانه‌گذاری مثلثی نوسان بیش‌تری نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر خطای بیش‌تر این روش باشد.

در سطح کم‌آبیاری، با استفاده از شاخص تمایز ExG و ExGR یک کاهش ناگهانی در مرحله انتهایی رشد مشاهده شده است. هم‌چنین در سطح آبیاری کافی، با استفاده از شاخص ExG و ExGR و آستانه‌گذاری مثلثی یک کاهش ناگهانی در مرحله انتهایی رشد قابل مشاهده است.

در حالتی‌که از شاخص تمایز استفاده نشده است، روند منظمی حتی با استفاده از آستانه‌گذاری‌های خودکار قابل مشاهده نیست. با استفاده از آستانه‌گذاری‌های خودکار در مرحله ابتدایی و میانی، همگرایی قابل توجهی از روند برآورد پوشش سایه‌انداز نسبت به مقادیر واقعییت زمینی مشاهده می‌شود، اما در مرحله انتهایی بین مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های مذکور با مقادیر واقعییت زمینی اختلاف زیادی وجود دارد. در همین حالت که از شاخص تمایز استفاده نشده است، یک روند نامنظم و اشتباه از برآورد پوشش سایه‌انداز با استفاده از آستانه‌گذاری انتخابی وجود دارد. اگرچه همگرایی قابل توجهی نسبت به مقادیر واقعی در مراحل ابتدایی و میانی قابل مشاهده نیست، اما مقادیر به‌دست‌آمده در مرحله انتهایی، همگرایی قابل توجهی را به مقادیر واقعی نشان می‌دهد. بیش‌ترین

مقایسه صحت روش‌های مختلف پردازش تصویر در برآورد پوشش سایه‌انداز گیاه چغندر قند با استفاده از تصاویر دوربین دیجیتال

آستانه‌گذاری خودکار در مراحل میانی و انتهایی رشد توانسته‌اند برآوردهای بسیار بهتری از پوشش گیاهی را نسبت به مراحل ابتدایی رشد داشته باشند. با هدف تشخیص بهترین روش برای برآورد پوشش سایه‌انداز، نه روش جداسازی از منظر صحت آماری مورد بررسی قرار گرفتند که در جدول (۲) نشان داده شده است.

تغییرات دستی حد آستانه تعیین شد. برای این منظور از یک حلقه در کد برنامه استفاده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در شرایط عدم استفاده از شاخص‌های گیاهی تمایز، روش‌های خودکار نتوانسته‌اند بین پیکسل‌های خاک و برگ تفاوت قائل شوند. با رشد گیاه و افزایش پوشش سایه‌انداز گیاه، انحراف معیار پیکسل‌ها در تصویر بیشتر شده و به همین دلیل روش‌های

Table 2. The results of the analysis of the accuracy calculations of the combined segmentation algorithms

Method	Growth Stage	Accuracy (%)		RMSE(%)	R ²
		σ (%)	μ (%)		
ExGMT	initial	15.74	71.78	0.25	0.98
	mid	6.92	89.65	2.50	0.96
	end	6.23	94.71	13.39	0.94
	total	13.65	87.24 ^a	5.64	0.99
ExGO	initial	5.97	91.06	0.26	0.98
	mid	7.62	90.59	2.54	0.95
	end	10.69	83.74	14.80	0.11
	total	9.45	87.52 ^a	11.97	0.95
ExGT	initial	22.00	43.10	14.00	0.65
	mid	12.14	77.40	16.63	0.74
	end	15.19	84.12	17.74	0.00
	total	23.89	71.39 ^b	16.64	0.77
ExGRMT	initial	6.25	91.46	0.23	0.98
	mid	4.36	92.76	2.81	0.95
	end	1.91	97.64	17.81	0.93
	total	4.95	94.69 ^a	2.97	0.99
ExGRO	initial	7.64	91.38	0.22	0.98
	mid	8.01	91.23	2.93	0.94
	end	12.03	79.63	18.77	0.01
	total	11.62	85.64 ^a	12.91	0.93
ExGRT	initial	12.94	35.70	13.48	0.85
	mid	17.42	74.03	22.50	0.70
	end	14.29	82.73	18.43	0.09
	total	24.68	67.87 ^b	18.49	0.73
NDMT	initial	19.67	15.50	25.53	0.24
	mid	25.39	69.78	5.94	0.01
	end	10.67	92.89	29.94	0.02
	total	36.77	66.09 ^b	24.52	0.28
NDO	initial	35.57	46.64	23.26	0.23
	mid	6.72	85.13	6.03	0.94
	end	9.78	63.73	30.99	0.06
	total	24.12	64.88 ^{bc}	24.54	0.67
NDT	initial	24.49	43.85	9.21	0.39
	mid	18.70	79.78	14.31	0.31
	end	19.77	43.32	48.84	0.06
	total	26.15	53.18 ^c	34.50	0.30

Means followed by the same lower case letters in the columns do not differ significantly by the Tukey test ($p < 0.05$).

یکسان را جدا می‌کنند و مطابق حدود آستانه، تصویر را به دو بخش سیاه و سفید (باینری) تبدیل می‌کنند.

در این مطالعه، پوشش گیاهی محصول چغندر قند با استفاده از سه روش تمایز با شاخص ExG، تمایز با شاخص ExGR و بدون تمایز و با سه روش آستانه‌گذاری خودکار Otsu، آستانه‌گذاری خودکار مثلثی و آستانه‌گذاری انتخابی با حد آستانه ۰/۱ برآورد شد. نتایج مطالعه، حاکی از دقت بالای الگوریتم‌های جداسازی در برآورد پوشش سایه‌انداز تحت تنش خشکی و نیتروژن بود. در حالتی که جداسازی برگ‌ها از خاک اتفاق نیفتاده است، روند منظمی حتی با استفاده از آستانه‌گذاری‌های خودکار قابل مشاهده نبود (جز در یکی از مراحل رشد) که نشان‌دهنده خطای این روش در برآورد و تأثیر منفی پیکسل‌های ناخواسته خاک می‌باشد. در میان روش‌های آستانه‌گذاری، روش آستانه‌گذاری مثلثی، نوسان بیش‌تری نشان داد و نسبت به سایر روش‌های آستانه‌گذاری برآورد بیش‌تری در ابتدای دوره کشت داشت. همچنین این روش، افت ناگهانی در برآورد پوشش سایه‌انداز در انتهای دوره کشت نشان داد. بر خلاف این روش، روش‌های آستانه‌گذاری انتخابی و Otsu بیش‌ترین صحت و کم‌ترین خطا را نسبت به مقادیر واقعیت زمینی پوشش سایه‌انداز نشان دادند. نتایج حاصل از این پژوهش که برای تصاویر RGB گرفته شد با استفاده از پهپاد با دقت مکانی مشابه قابل استفاده است.

تشکر و قدردانی

برای انجام پردازش‌ها و اندازه‌گیری سطح پوشش گیاهی، از ابزارهای آزمایشگاه آبیاری گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) استفاده شد. همچنین از آقای مهندس سید غلامرضا بابایی، مسئول محترم آزمایشگاه بابت کمک‌هایی بی‌دریغ ایشان، تشکر و قدردانی می‌گردد.

با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که روش ترکیبی برآورد پوشش سایه‌انداز ExGRMT بالاترین میزان صحت (۹۴/۶۹ درصد) را در بین تمامی روش‌های استفاده‌شده در این مطالعه داراست. این روش همچنین، کم‌ترین میزان RMSE را در مقایسه با مقادیر واقعی پوشش سایه‌انداز داشته است (۱۷/۸۱ درصد). ضریب رگرسیونی R^2 بالای این روش (۰/۹۹)، نزدیکی برآوردهای حاصل از این روش را با مقادیر حقیقی بیان می‌کند.

هم‌چنین مشاهده می‌شود روش NDT کم‌ترین میزان صحت (۵۳/۱۸ درصد) را در میان تمامی روش‌ها به خود اختصاص داده است. در تمامی مراحل رشد، روش ExGRMT صحیح‌ترین روش می‌باشد. هم‌چنین در مراحل ابتدایی و میانی، روش NDMT، کم‌ترین صحت و در مرحله انتهایی رشد، روش NDT کم‌ترین صحت را دارد.

به‌طورکلی، نشان داده شده است که مطالعات جداسازی پوشش سایه‌انداز با استفاده از شاخص‌های گیاهی تمایز و الگوریتم‌های آستانه‌گذاری، همانند این مطالعه، از صحت و سرعت بالای پردازش برخوردارند (Aureliano Netto *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2015; Lee & Lee, 2011; Riehle *et al.*, 2020).

نتیجه‌گیری

برآورد پوشش سایه‌انداز گیاه، می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر، با سرعت و دقت بالایی انجام شود. برآورد پوشش سایه‌انداز، زمانی بهینه می‌شود که پیکسل‌های ناخواسته تصویر توسط الگوریتم‌های تعیین منطقه مورد نظر (ROI) و تمایز (Discrimination) (نظیر پس‌زمینه و خاک بدون پوشش) حذف شود. روش‌های آستانه‌گذاری، پیکسل‌های دارای روشنایی

پی‌نوشت‌ها

1. Image Processing
 2. Segmentation
 3. Background
 4. Thresholding
 5. Clustering
 6. Canopy cover
 7. Excess Green index
 8. Modified Excess Green index
 9. Normalized Green
 10. Excess Green minus excess Red index
 11. Normalized Difference Index
 12. Manual Thresholding
 13. Red-Green-Blue
 14. Lindau Eschikon
 15. ExG & M_Threshold
 16. ExG & Otsu
 17. ExG & Triangle
 18. ExGR & M_Threshold
 19. ExGR & Otsu
 20. ExGR & Triangle
 21. No_Discrimination & M_Threshold
 22. No_Discrimination & Otsu
 23. No_Discrimination & Triangle
 24. Root Mean Square Error
 25. Ground Truth
 26. Analysis of Variance
 27. Tukey Test
 28. Region of Interest
 29. Binary Mask
 30. Pre-Processing
 31. Rotation
 32. Vegetation Discrimination indices
 33. Gray
 34. Noise
 35. Maximum Triangle Distance
3. An, J., Li, W., Li, M., Cui, S., & Yue, H. (2019). Identification and classification of maize drought stress using deep convolutional neural network. *Symmetry*, 11(2), 1-14. <https://doi.org/10.3390/sym11020256>
 4. Aureliano Netto, A. F., Nogueira Martins, R., Aquino de Souza, G. S., Araújo, G. D. M., Hatum de Almeida, S. L., & Agnolette Capelini, V. (2018). Segmentation of rgb images using different vegetation indices and thresholding methods. *Nativa*, 6(4), 389. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i4.5405>
 5. Coy, A., Rankine, D., Taylor, M., Nielsen, D. C., & Cohen, J. (2016). Increasing the accuracy and automation of fractional vegetation cover estimation from digital photographs. *Remote Sensing*, 8(7), 21-25. <https://doi.org/10.3390/rs8070474>
 6. Ghosal, S., Blystone, D., Singh, A. K., Ganapathysubramanian, B., Singh, A., & Sarkar, S. (2018). An explainable deep machine vision framework for plant stress phenotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(18), 4613-4618. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716999115>
 7. Kamali, H., Zand-Parsa, S., & Zare, M. (2017). Estimation of canopy cover, leaf area index and leaf nitrogen content in sugar beet using digital photography. *Journal of Sugar beet*, 32(2), 123-133. <https://doi.org/10.22092/jsb.2016.107217> (In Persian)
 8. Khanna, R., Schmid, L., Walter, A., Nieto, J., Siegwart, R., & Liebisch, F. (2019). A spatio-temporal spectral framework for plant stress phenotyping. *Plant Methods*, 15(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0398-8>
 9. Kim, S.-H., Ryu, C.-S., Kang, Y.-S., & Min, Y.-B. (2015). Improved plant image segmentation method using vegetation indices and automatic thresholds. *Journal of Agriculture & Life Science*, 49(5), 333-341. <https://doi.org/10.14397/jals.2015.49.5.333>
 10. Kisalaei, A., Golmohammadzadeh, F., Rasouli Sharabiani, V., & Golmohammadi, A. (2014). Application of image processing in precision agriculture. *3rd National Conference On Organic and Conventional Agriculture*. (In Persian)
 11. Latifoltojar, S., Jafari, A., Nassiri, S. M., & Sharifi, H. (2014). Estimation of sugar beet yield based on crop canopy cover using image processing patterns. *Journal of Agricultural Machinery*, 4(2), 275-284. (In Persian)

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Abdullah, S. L. S., Hambali, H., & Jamil, N. (2012). Segmentation of natural images using an improved thresholding-based technique. *Procedia Engineering*, 41(Iris), 938-944. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.266>
2. Al-amri, S. S., Kalyankar, N. V., & D., K. S. (2010). *Image Segmentation by Using Threshold Techniques*, 2. <http://arxiv.org/abs/1005.4020>

12. 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. <https://doi.org/10.1007/s12892-011-0029-z>
13. Meyer, G. E., & Neto, J. C. (2008). Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.009>
14. Moosavi, S. G. R., Ramazani, S. H. R., Hemayati, S. S., & Gholizade, H. (2017). Effect of drought stress on root yield and some morpho-physiological traits in different genotypes of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 20(3), 167-174. <https://doi.org/10.1007/s12892-017-0009-0>
15. Noda, K., Ezaki, N., Takizawa, H., Mizuno, S., & Yamamoto, S. (2006). Detection of plant saplessness with image processing. *International Joint Conference SICE-ICASE*, p. 4856-4860.
16. Orak, H., Abdanan Mehdizeh, S., & Sadi, M. (2018). Predicting sugar beet performance by online image processing. *Journal of Sugar beet*, 34(2), 181-191. <https://doi.org/10.22092/jsb.2019.120670.1178> (In Persian)
17. Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 20(1), 62-66.
18. Poonguzhali, R., & Vijayabhanu, A. (2019). Crop condition assessment using machine learning. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6), 897-900.
19. Ridler, T. W., & Calvard, S. (1978). Picture thresholding using iterative selective method. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, smc-8(8), 630-632.
20. Riehle, D., Reiser, D., & Griepentrog, H. W. (2020). Robust index-based semantic plant/background segmentation for RGB-images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169(December 2019), 105201. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105201>
21. Sadeghzadeh Hemayati, S., Fathollah Taleghani, D., & Fasahat, P. (2017). Effects of drought stress on quantitative and qualitative characteristics, canopy ground cover and wilting score of sugar beet genotypes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 10(3), 363-375. (In Persian)
22. Saxena, L., & Armstrong, L. (2014). A Survey of image processing techniques for agriculture. *Proceedings of Asian Federation for Information Technology in Agriculture*, 401-413. <https://doi.org/10.5120/20052-1983>
23. Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No.66, October 2012*, 505.
24. Story, D., & Kacira, M. (2015). Design and implementation of a computer vision-guided greenhouse crop diagnostics system. *Machine Vision and Applications*, 26(4), 495-506. <https://doi.org/10.1007/s00138-015-0670-5>
25. Thailambal, G., & Yogeshwari, M. (2020). Automatic segmentation of plant leaf disease using improved fast Fuzzy C-Means clustering and adaptive Otsu thresholding. *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*, 7(3), 5447-5462. https://ejmcm.com/article_5513.html
26. Wenhua Mao, Yiming Wang, & Yueqing Wang. (2003, November 15). *Real-time Detection of Between-row Weeds Using Machine Vision*. <https://doi.org/10.13031/2013.15381>
27. Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K., & Mortensen, D. A. (1995). Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 38(1), 259-269. <https://doi.org/10.13031/2013.27838>
28. Yu, Y., Bao, Y., Wang, J., Chu, H., Zhao, N., He, Y., & Liu, Y. (2021). Crop row segmentation and detection in paddy fields based on treble-classification otsu and double-dimensional clustering method. *Remote Sensing*, 13(5), 1-25. <https://doi.org/10.3390/rs13050901>
29. Zack, G. W., Rogers, E., & Latt, S. A. (1977). Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency. *The Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, 25(7), 741-753.