

برآورد مراحل فنولوژی کلزا با استفاده از شاخص‌های گیاهی سنجش از دور و تصاویر دیجیتال دوربین عکاسی

دریافت مقاله: ۹۹/۱/۲۹ پذیرش نهایی: ۹۹/۶/۳۰

صفحات: ۲۳۱-۲۵۰

اکبر میراحمدی: دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی کشاورزی، گروه جغرافیایی طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

Email: a_mirahmadi@yahoo.com

حجت‌الله یزدان‌پناه: دانشیار آب‌وهواشناسی کشاورزی، گروه جغرافیایی طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

Email: h.yazdanpanah@geo.ui.ac.ir

مهدی مومنی: دانشیار سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

Email: momeni@eng.ui.ac.ir

چکیده

در سالیان اخیر، مطالعه فنولوژی محصولات زراعی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای گسترش فراوانی یافته است. امروزه داده‌های سنجنده OLI از ماهواره لندست ۸ با تفکیک مکانی ۳۰ متر، تشخیص مراحل فنولوژی گیاهان را در مقیاس محلی فراهم کرده است. در این پژوهش، از شاخص‌های سنجش از دور NDVI، EVI، Brightness و Greenness حاصل از سنجنده OLI و شاخص GCC حاصل از تصاویر دوربین دیجیتال، برای برآورد مراحل فنولوژی گیاه کلزا و از فیلتر ساوینزکی- گولی برای برطرف کردن داده‌های پرت و تولید منحنی‌های هموار سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی استفاده شد. نتایج نشان داد که منحنی‌های حاصل از شاخص‌های NDVI، EVI، GCC هر چهار مرحله فنولوژی سنجش از دور (سیزینگی، رکود، بلوغ و پیری) را به خوبی نمایش می‌دهند اما شاخص Greenness، مرحله رکود را به خوبی نمایش نمی‌دهد. منحنی حاصل از شاخص Brightness رفتاری عکس با دیگر منحنی‌ها از خود نشان می‌دهد. بر اساس آزمون همبستگی پیرسون داده‌های شاخص GCC با داده‌های شاخص NDVI و Brightness همبستگی دارند. برای برآورد شروع فصل و پایان فصل از روش‌های آستانه نسبی، نرخ تغییر و مشتق اول استفاده شد و نتایج نشان داد که روش مشتق اول و آستانه نسبی به ترتیب با میانگین اختلاف ۱۸ و ۱۹ روز در برآورد شروع فصل و روش نرخ تغییر با میانگین اختلاف ۸ روز در برآورد پایان فصل بهترین عملکرد را دارند. همچنین شاخص Brightness با میانگین اختلاف ۱۶ روز و شاخص EVI با میانگین اختلاف ۷ روز به ترتیب در برآورد شروع فصل و پایان فصل بهترین عملکرد را دارند.

کلیدواژگان: کلزا، فنولوژی، شاخص‌های گیاهی، سنجش از دور، لندست ۸، دوربین دیجیتال.

۱. نویسنده مسئول: اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی محیطی، گروه جغرافیای طبیعی

مقدمه

فنولوژی، مطالعه و بررسی چرخه‌های زندگی گیاهان و جانوران و تعامل آن‌ها با آب‌وهوا و دیگر محرك‌های محیطی است (ما و همکاران^۱، ۲۰۱۳: ۱). مطالعه‌ی تغییرات مکانی و زمانی فنولوژی پوشش گیاهی به طیف گسترده‌ای از حوزه‌های کاربردی مانند تجزیه و تحلیل تغییرات آب‌وهوا (کلیند و همکاران^۲، ۲۰۰۷: ۲)، پایش کشاورزی (دانکان و همکاران^۳، ۲۰۱۵: ۱۳) و پژوهش‌های زیست‌محیطی (پتولی و همکاران^۴، ۲۰۱۴: ۱۰) کمک می‌کند. فنولوژی محصولات زراعی، علاوه بر آب‌وهوا تحت تأثیر روش‌های مدیریت زراعی از جمله تاریخ کاشت و نوع رقم انتخابی است (احمد و همکاران^۵، ۲۰۱۷: ۷). برآورد دقیق فنولوژی انواع گیاهان در سراسر جهان تبدیل به یک وظیفه و ضرورت فوری برای درک بهتر مبادله کربن در زمینه تغییرات آب‌وهوای شده است (وو و همکاران^۶، ۲۰۱۶: ۲). دیده‌بانی فنولوژی گیاهان به صورت سنتی، استفاده از مشاهدات مکرر بصیر برای تشخیص زمان‌بندی رویدادهای خاص مانند گل‌دهی، است که توسط کارکنان آموزش دیده در باغ‌های فنولوژیکی یا داوطلبانه انجام می‌گیرد (وریلینگ و همکاران^۷، ۲۰۱۸: ۱). مشاهدات فنولوژیکی با استفاده از دو رویکرد اصلی: (۱) شبکه‌های مشاهدات زمینی و (۲) سنجش‌از دور ماهواره‌ای (میلاس و همکاران^۸، ۲۰۱۳: ۱) جمع‌آوری می‌شود. دانه کلزا با تولید ۱۶ درصد رونگ گیاهی در سال ۲۰۱۷ بعد از سویا در رتبه دوم جهانی جای گرفت (وژنیاک و همکاران^۹، ۲۰۱۹: ۲). همچنین تقاضای رو به رشد برای سوخت‌های زیستی سطح زیر کشت کلزا را افزایش داده است (هی و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۷: ۱). مراحل رشد و نمو گیاه کلزا به صورت کدبندی اولین بار توسط هارپر و برکنکامپ^{۱۱} (۱۹۷۵: ۶۷۵) در کانادا صورت گرفت. معروف‌ترین و معتبرترین روش کدگذاری مراحل رشد و نمو کلزا توسط انجمن کلزا انجام گرفت و در آن دوره زندگی کلزا به ۶ مرحله تقسیم شده است و با کدهای صفر تا ۵ نشان داده شده است و به ترتیب عبارت‌اند از: جوانه‌زنی، سبز شدن، روزت، غنچه‌دهی، گلدنهی و رسیدن (خوشحال و براتیان، ۱۳۸۸: ۲).

به دلیل پوشش گسترده و نمونه‌های زمانی قابل تکرار که ماهواره‌ها از پس آن بر می‌آیند، داده‌های سنجش‌از دور، دارای پتانسیل بالائی به منظور پایش بهنگام گیاهی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی هستند (زانگ و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۳: ۱). ماهواره لندست ۸ با تفکیک مکانی ۳۰ متر، کاوش و کشف عوامل مؤثر بر فنولوژی

^۱- Ma et al^۲- Cleland et al^۳- Duncan et al^۴- Pettorelli et al^۵- Ahmad et al^۶- Wu et al^۷- Vrieling et al^۸- Melaas et al^۹- Wozniak et al^{۱۰}- He et al^{۱۱}- Harper & Berkenkamp^{۱۲}- Zhang et al

گیاهان را در مقیاس‌های کوچک محلی (برای نمونه: توپوگرافی، کاربری زمین، جزایر گرمایی شهرها و اثرات ساحل) فراهم کرده است (میلاس و همکاران^۱، ۲۰۱۳: ۲). شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی^۲ (NDVI) و شاخص بارزسازی شده پوشش گیاهی^۳ (EVI) از رایج-ترین شاخص‌های گیاهی برای پیش فنولوژی گیاهان می‌باشند (وو و همکاران^۴، ۲۰۱۷: ۲). شاخص EVI به ساختار تاج پوشش^۵ گیاه مانند سطح برگ، نوع تاج پوشش و فیزیولوژی گیاه حساس است، بنابراین در مناطق با پوشش گیاهی متراکم و مرطوب دامنه پویاتری دارد. شاخص NDVI به ساختار کلروفیل در گیاه حساس است و در مناطق نیمه خشک پویائی گستردۀ تری دارد (هیوت و همکاران^۶، ۲۰۰۲: ۱۶).

تبديل تسلدکپ^۷ (TCT) برای ترسیم و ارزیابی تغییرات شهری و پوشش گیاهی توسط ماهواره‌های مختلف توسعه داده شده است (ساماراویکراما و همکاران^۸، ۲۰۱۷: ۱). روش‌های فراوانی برای شناسایی و قایع فنولوژی بر اساس داده‌های سنجش‌از دور توسعه یافته است. بیشتر روش‌ها برای تشخیص و قایع کلیدی فنولوژی شامل دو مرحله اساسی می‌باشد؛ (۱) گسترش شاخص‌های گیاهی استخراج شده از داده‌های ماهواره به سری زمانی (۲) استفاده از سری زمانی برای تعیین و قایع فنولوژیک بر پایه مجموعه‌ای از قوانین و روابط. مرحله اول شامل ساخت سری زمانی هر شاخص بر پایه داده‌های سنجش‌از دور و فیلتر کردن داده‌ها برای کاهش اختلال و تولید سری زمانی هموارتر است. در مرحله دوم، برای تمایز و قایع فنولوژیکی، سری زمانی تولید شده بر پایه قوانین معینی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. رایج‌ترین روش‌ها برای این مرحله، روش آستانه، روش نرخ تغییر اanhنا، روش تجزیه و تحلیل هارمونیک، روش میانگین متحرک و روش حداقل شیب و نقطه‌ی عطف می‌باشد. روش آستانه یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها می‌باشد و انواع مختلفی دارد (یو و همکاران^۹، ۲۰۱۳: ۳). مثلاً لوید^{۱۰} (۱۹۹۰: ۶) مقدار ۰/۰۹۹ را برای NDVI به عنوان آستانه برای شروع فصل^{۱۱} (SOS) در نظر گرفته است، وايت و نمانی^{۱۲} (۲۰۰۶: ۳) آستانه NDVI را میانگین حداقل و حداقل مقدار NDVI محاسبه کردند که به طور کلی مطابق با زمان حداقل افزایش و کاهش مقدار NDVI می‌باشد. در روش دیگری برای آستانه شروع فصل مقدار معینی مشخص می‌شود مثلاً رضا و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۷: ۳) شروع فصل را زمانی از

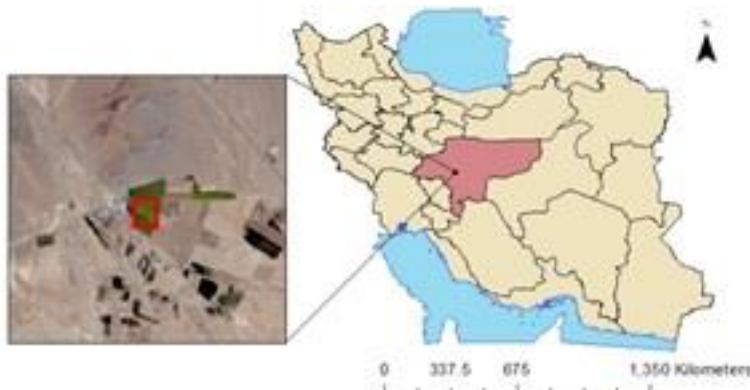
^{۱۴} Melaas et al^{۱۵}-Normalized Difference Vegetation Index^{۱۶}- Enhanced Vegetation Index^{۱۷}- Wu et al^{۱۸}- Canopy^{۱۹}- Huete et al^{۲۰}- Tasseled Cap Transformation^{۲۱}- Samarawickrama et al^{۲۲}- You et al^{۲۳}- Lloyd^{۲۴}- Start of Season^{۲۵}- White & Nemani^{۲۶}- Reza et al

سال می‌دانند که مقدار NDVI نسبی از ۰/۵ فراتر رود. در روش حداکثر شیب، شروع فصل (SOS) و پایان فصل^۱ (EOS) به ترتیب به عنوان دوره‌هایی تعريف می‌شوند که رشد پوشش گیاهی به سرعت افزایش یا کاهش می‌یابد (یو و همکاران، ۲۰۱۳: ۳). دش و همکاران^۲ (۲۰۱۰: ۴) با استفاده از مشتق‌گیری SOS را نقطه تحبد منحنی در شروع چرخه رشد گیاه و EOS را نقطه تقریباً منحنی در پایان چرخه رشد گیاه می‌دانند. روش آستانه به طور خاص شروع فعالیت فتوسننتزی در بهار را مشخص می‌کند در حالی که روش حداکثر شیب اساساً زمانی را نشان می‌دهد که افزایش شدید در مقدار شاخص گیاهی وجود داشته باشد.

بیشتر پژوهش‌های گذشته برای استخراج پارامترهای فنولوژی متتمرکز بر مناطقی با وسعت جغرافیایی زیاد بوده‌اند که در آن‌ها پوشش گیاهی ناهمگن و مخلوطی از انواع گیاهان مرتعی، زراعی و جنگلی وجود دارد. در نتیجه تعیین پارامترهای فنولوژیکی مانند SOS/EOS اگر غیرممکن نباشد کاری دشوار است. هدف از این پژوهش تولید داده‌های سری زمانی شاخص‌های گیاهی، با تفکیک مکانی ۳۰ متر ماهواره لندست ۸ در محدوده‌ی جغرافیایی کوچک و با پوشش گیاهی همگن بهمنظور استخراج دقیق‌تر اطلاعات فنولوژیکی گیاه کلزا و ارزیابی دقت شاخص‌های گیاهی سنجش‌ازدور به کمک فنولوژیکی‌های دیده‌بانی شده می‌باشد.

روش تحقیق معرفی محدوده مورد مطالعه

مزروعه کشاورزی این پژوهش در ۴۰ کیلومتری شمال شهر اصفهان و در نزدیکی روستای مورچه‌خورت، با مساحت حدود ۱۰۰ هکتار و ارتفاع ۱۷۳۹ از سطح دریا و در گستره بین طول‌های "۱۴°۵۱' و "۱۳°۱۴' و "۱۶°۳۳' و "۱۵°۵۸' درجه شرقی و عرض‌های "۵۳°۳۳' و "۵۵°۳۲' درجه شمالی قرار دارد شکل (۱).



شکل (۱). منطقه مورد مطالعه به همراه تصویر RGB (ادغام سه باند قرمز، سبز و آبی برای تولید تصویر رنگی) سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ از مزرعه - منبع: نگارندگان

^{۱۷}- End of Season

^{۱۸}- You et al

^{۱۹}- Dash et al

داده و روش کار

داده‌های فنولوژیکی گیاه کلزا

در این پژوهش مراحل فنولوژی گیاه کلزا در مزرعه موردمطالعه به صورت مشاهدات بصری و با کمک تصاویر دوربین گوشی هوشمند هوآووی مدل TAG-L21 از مرحله کاشت- ۲۵ شهریور ۱۳۹۵ - تا مرحله برداشت - ۲۰ خردادماه ۱۳۹۶ - در هفته دو بار در روزهای شنبه و سه‌شنبه حدود ساعت ۱۱:۳۰ استخراج شد. این مراحل به ترتیب عبارت‌اند از کاشت، رزت، رکود، رویش مجدد، گل‌دهی، تشکیل غلاف و رسیدن شکل (۲).



شکل (۲). مراحل فنولوژی گیاه کلزا: (کاشت) a - (رزت) b - (رکود) c - (رویش مجدد) d - (گل‌دهی) e - (تشکیل غلاف) f - (رسیدن) g

تصاویر ماهواره لندهست ۸ (سنجدنه OLI)

تصاویر ماهواره لندهست ۸ و سنجدنه OLI مربوط به گذر شماره ۱۶۴ و ردیف ۳۷ را از زمان کشت تا زمان برداشت محصول کلزا - شامل ۱۵ تصویر سالم - از تارنمای سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۱ دانلود گردید. این داده‌ها دارای سطح پردازش L1T^۲ هستند که تصحیحات هندسی در آن‌ها اعمال شده است (میری و همکاران، ۱۳۹۶: ۳). تصحیح اتمسفری با استفاده از الگوریتم FLAASH^۳ توسط نرم‌افزار ENVI^۴ انجام گرفت. برای محاسبه شاخص‌های گیاهی، مقدار عددی پیکسل^۵ (DN) باید به تصویر بازتابش بالای اتمسفر^۶ (TOA) تبدیل شوند.

تصاویر دیجیتال گوشی هوشمند

در این پژوهش از دوربین ۱۳ مگاپیکسلی گوشی هوشمند هوآووی مدل TAG-L21 برای جمع‌آوری تصاویر RGB با فرمت JPEG استفاده شد. تراز سفیدی^۷ و نوردهی^۸ دوربین در حالت خودکار تنظیم شد. در زمان عکس‌برداری برای جلوگیری از ورود مستقیم پرتوهای خورشید، دوربین در جهت شمال قرار می‌گرفت (وریلینگ و همکاران، ۲۰۱۸، ۲: ۲؛ سنت پیتر و همکاران، ۲۰۱۸، ۱: ۴). همه تصاویر از یک منظره و با زاویه دید یکسان و از ارتفاع ۱/۸ متری از سطح مزرعه کلزا گرفته شدند. تمام تصاویر سالم در دوره رشد و نمو گیاه کلزا

^۱- <https://earthexplorer.usgs.gov/>

^۲- Level 1 Terrain-corrected

^۳- Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes, FLAASH

^۴- The Environment For Visualizing Image, ENVI

^۵- Digital Number, DN

^۶- Top Of Atmosphere, TOA

^۷- White balance

^۸- exposure

^۹- Vrieling et al

^{۱۰}- St. Peter et al

که شامل ۶۸ عدد تصویر می‌باشد، در تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند. از تصاویر جمع‌آوری شده، محدوده ثابت و معینی که فقط شامل زمین زراعی کلزا بود، برش داده شد. قسمت برش خورده در نرم‌افزار متلب^۱ و جعبه‌ابزار پردازش تصاویر فراخوانده شد و لایه‌های قرمز، سبز و آبی تصاویر دیجیتال جدا شدند. سپس شاخص رنگ سبز تعديل شده^۲ (GCC) بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد:

$$\text{GCC} = G / (R + G + B) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن R , G , B به ترتیب شامل اعداد رقومی کانال‌های قرمز، سبز و آبی موجود در تصاویر با فرمت JPEG می‌باشد (هافکنر و همکاران، ۲۰۱۹: ۳). برای کاهش اختلال، داده‌های پرت شناسایی و حذف شدند، سپس میانگین مقادیر GCC محاسبه شد.

شاخص‌های گیاهی^۳ (NDVI)

شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)

شاخص NDVI شاخصی پایه برای تعیین دیگر متغیرهای پوشش گیاهی است که برتری آن نسبت به دیگر شاخص‌ها این است که تفاضل بین بیشینه جذب در ناحیه قرمز ناشی از رنگدانه‌های کلروفیل و بیشینه بازتاب در ناحیه فروسرخ ناشی از ساختار سلولی برگ را مشخص می‌کند (مباشری و رنجبر، ۱۳۹۶: ۶). این شاخص بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲) ρ_{nir} بازتاب^۴ در ناحیه فروسرخ نزدیک و ρ_{red} بازتاب در ناحیه قرمز است. از دیدگاه نظری مقدار این شاخص در محدوده -۱ و +۱ است ولی در عمل کمتر از ۱ و بیشتر از -۱ است (اصغری و امامی: ۱۳۹۸: ۲۰۰). مقدار این شاخص برای پوشش گیاهی انبوه و متراکم به‌سوی عدد یک میل می‌کند ولی آب، برف و ابرها با مقدار منفی مشخص می‌شوند. خاک‌های بایر و سنگ‌ها که واکنش طیفی مشابه در دو باند مورد استفاده دارند با مقدار نزدیک به صفر دیده می‌شوند (توکر، ۱۹۷۸: ۱۳۰؛ فرخزاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۴).

شاخص بارزسازی شده پوشش گیاهی (EVI)

در حقیقت یک NDVI تغییر یافته است که در آن فاکتور تنظیم خاک (L) و دو ضریب C_1 و C_2 لحاظ می‌گردد. این شاخص از رابطه (۳) به دست می‌آید.

^۱- Matlab

^۲-Green chromatic Coordination, GCC

^۳-Hufkens et al

^۴-Vegetation Index, VI

^۵- Reflectance

^۶- Tucker

$$\text{EVI} = G (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + (C_1 \times \rho_{\text{red}} - C_2 \times \rho_{\text{blue}}) + L \quad (3)$$

که در آن L فاکتور تنظیم خاک، C_1 و C_2 ضرایبی هستند که برای تصحیح اثرات پخش آئروسل‌ها استفاده می‌شوند. ρ_{nir} ، ρ_{red} ، ρ_{blue} بیانگر بازتاب در طول موج‌های به ترتیب آبی ($0.52 - 0.45$ میکرومتر)، قرمز ($0.65 - 0.7$ میکرومتر) و فروسرخ ($0.7 - 0.8$ میکرومتر) می‌باشد. به طور معمول، $G = 2/5$ ، $C_1 = 6/5$ ، $C_2 = 7/5$ و $L = 1$ می‌باشد (ماتسوشیتا و همکاران^۱، ۲۰۰۷؛ تارنمای سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۲).

تبديل تسلدکپ (TCT)

تبديل تسلدکپ یک ترکیب خطی از باندهای ماهواره (در ماهواره لندست ۸ از باند ۲ تا باند ۷) است. سه شاخص به طور معمول در تسلدکپ استفاده می‌شود. شاخص اول، روشنایی^۳ است و مقدار روشنایی خاک را پایش می‌کند. شاخص دوم، سبزینگی^۴ است و فتوسنترز فعل گیاهی برای استخراج شاخص سبزینگی استفاده می‌شود. شاخص سوم، معمولاً به عنوان شاخص رطوبت^۵ تفسیر می‌شود که در آن ارتباط بین خاک و رطوبت تاج پوشش گیاهان توصیف می‌شود. شاخص‌های تسلدکپ از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شوند (ساماراویکراما و همکاران^۶، ۲۰۱۷):

$$\text{Tas}_i = (C_2 \times \text{band}_2) + (C_3 \times \text{band}_3) + (C_4 \times \text{band}_4) + (C_5 \times \text{band}_5) + (C_6 \times \text{band}_6) + (C_7 \times \text{band}_7) \quad (4)$$

که در آن i یکی از شاخص‌های سه‌گانه تسلدکپ، C ضریب متناظر با شاخص تسلدکپ و باندهای ماهواره لندست ۸ (جدول ۱) و band نیز مقدار بازتابش بالای اتمسفر (TOA) باندهای موردنظر از ماهواره لندست ۸ می‌باشد. مقادیر ضرایب برای باندهای ماهواره لندست ۸ و برای شاخص‌های تسلدکپ در جدول (۱) اشاره شده است. در این پژوهش از شاخص رطوبت استفاده نشده است.

جدول (۱). ضرایب متناظر باندهای ماهواره لندست ۸ برای محاسبه شاخص‌های تسلدکپ

شاخص تسلدکپ	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷
روشنایی	-۰.۳۰۲۹	-۰.۲۷۸۶	-۰.۴۷۳۳	-۰.۵۵۹۹	-۰.۵۰۸	-۰.۱۸۷۲
سبزینگی	-۰.۲۹۴۱	-۰.۲۴۳	-۰.۵۴۲۴	-۰.۷۷۲۶	-۰.۰۷۱۳	-۰.۱۶۰۸
رطوبت	-۰.۱۵۱۱	-۰.۱۹۷۳	-۰.۳۲۸۳	-۰.۳۴۰۷	-۰.۷۱۱۷	-۰.۴۵۵۹

منبع: (بیگ و همکاران^۷، ۲۰۱۴؛^۶ ۲۰۱۴؛^۸ ۲۰۱۴؛^۹ ۲۰۱۴؛^{۱۰} ۲۰۱۴؛^{۱۱} ۲۰۱۴؛^{۱۲} ۲۰۱۴؛^{۱۳} ۲۰۱۴؛^{۱۴} ۲۰۱۴؛^{۱۵} ۲۰۱۴؛^{۱۶} ۲۰۱۴؛^{۱۷} ۲۰۱۴؛^{۱۸} ۲۰۱۴؛^{۱۹} ۲۰۱۴؛^{۲۰} ۲۰۱۴؛^{۲۱} ۲۰۱۴؛^{۲۲} ۲۰۱۴؛^{۲۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴} ۲۰۱۴؛^{۲۵} ۲۰۱۴؛^{۲۶} ۲۰۱۴؛^{۲۷} ۲۰۱۴؛^{۲۸} ۲۰۱۴؛^{۲۹} ۲۰۱۴؛^{۳۰} ۲۰۱۴؛^{۳۱} ۲۰۱۴؛^{۳۲} ۲۰۱۴؛^{۳۳} ۲۰۱۴؛^{۳۴} ۲۰۱۴؛^{۳۵} ۲۰۱۴؛^{۳۶} ۲۰۱۴؛^{۳۷} ۲۰۱۴؛^{۳۸} ۲۰۱۴؛^{۳۹} ۲۰۱۴؛^{۴۰} ۲۰۱۴؛^{۴۱} ۲۰۱۴؛^{۴۲} ۲۰۱۴؛^{۴۳} ۲۰۱۴؛^{۴۴} ۲۰۱۴؛^{۴۵} ۲۰۱۴؛^{۴۶} ۲۰۱۴؛^{۴۷} ۲۰۱۴؛^{۴۸} ۲۰۱۴؛^{۴۹} ۲۰۱۴؛^{۵۰} ۲۰۱۴؛^{۵۱} ۲۰۱۴؛^{۵۲} ۲۰۱۴؛^{۵۳} ۲۰۱۴؛^{۵۴} ۲۰۱۴؛^{۵۵} ۲۰۱۴؛^{۵۶} ۲۰۱۴؛^{۵۷} ۲۰۱۴؛^{۵۸} ۲۰۱۴؛^{۵۹} ۲۰۱۴؛^{۶۰} ۲۰۱۴؛^{۶۱} ۲۰۱۴؛^{۶۲} ۲۰۱۴؛^{۶۳} ۲۰۱۴؛^{۶۴} ۲۰۱۴؛^{۶۵} ۲۰۱۴؛^{۶۶} ۲۰۱۴؛^{۶۷} ۲۰۱۴؛^{۶۸} ۲۰۱۴؛^{۶۹} ۲۰۱۴؛^{۷۰} ۲۰۱۴؛^{۷۱} ۲۰۱۴؛^{۷۲} ۲۰۱۴؛^{۷۳} ۲۰۱۴؛^{۷۴} ۲۰۱۴؛^{۷۵} ۲۰۱۴؛^{۷۶} ۲۰۱۴؛^{۷۷} ۲۰۱۴؛^{۷۸} ۲۰۱۴؛^{۷۹} ۲۰۱۴؛^{۸۰} ۲۰۱۴؛^{۸۱} ۲۰۱۴؛^{۸۲} ۲۰۱۴؛^{۸۳} ۲۰۱۴؛^{۸۴} ۲۰۱۴؛^{۸۵} ۲۰۱۴؛^{۸۶} ۲۰۱۴؛^{۸۷} ۲۰۱۴؛^{۸۸} ۲۰۱۴؛^{۸۹} ۲۰۱۴؛^{۹۰} ۲۰۱۴؛^{۹۱} ۲۰۱۴؛^{۹۲} ۲۰۱۴؛^{۹۳} ۲۰۱۴؛^{۹۴} ۲۰۱۴؛^{۹۵} ۲۰۱۴؛^{۹۶} ۲۰۱۴؛^{۹۷} ۲۰۱۴؛^{۹۸} ۲۰۱۴؛^{۹۹} ۲۰۱۴؛^{۱۰۰} ۲۰۱۴؛^{۱۰۱} ۲۰۱۴؛^{۱۰۲} ۲۰۱۴؛^{۱۰۳} ۲۰۱۴؛^{۱۰۴} ۲۰۱۴؛^{۱۰۵} ۲۰۱۴؛^{۱۰۶} ۲۰۱۴؛^{۱۰۷} ۲۰۱۴؛^{۱۰۸} ۲۰۱۴؛^{۱۰۹} ۲۰۱۴؛^{۱۱۰} ۲۰۱۴؛^{۱۱۱} ۲۰۱۴؛^{۱۱۲} ۲۰۱۴؛^{۱۱۳} ۲۰۱۴؛^{۱۱۴} ۲۰۱۴؛^{۱۱۵} ۲۰۱۴؛^{۱۱۶} ۲۰۱۴؛^{۱۱۷} ۲۰۱۴؛^{۱۱۸} ۲۰۱۴؛^{۱۱۹} ۲۰۱۴؛^{۱۲۰} ۲۰۱۴؛^{۱۲۱} ۲۰۱۴؛^{۱۲۲} ۲۰۱۴؛^{۱۲۳} ۲۰۱۴؛^{۱۲۴} ۲۰۱۴؛^{۱۲۵} ۲۰۱۴؛^{۱۲۶} ۲۰۱۴؛^{۱۲۷} ۲۰۱۴؛^{۱۲۸} ۲۰۱۴؛^{۱۲۹} ۲۰۱۴؛^{۱۳۰} ۲۰۱۴؛^{۱۳۱} ۲۰۱۴؛^{۱۳۲} ۲۰۱۴؛^{۱۳۳} ۲۰۱۴؛^{۱۳۴} ۲۰۱۴؛^{۱۳۵} ۲۰۱۴؛^{۱۳۶} ۲۰۱۴؛^{۱۳۷} ۲۰۱۴؛^{۱۳۸} ۲۰۱۴؛^{۱۳۹} ۲۰۱۴؛^{۱۴۰} ۲۰۱۴؛^{۱۴۱} ۲۰۱۴؛^{۱۴۲} ۲۰۱۴؛^{۱۴۳} ۲۰۱۴؛^{۱۴۴} ۲۰۱۴؛^{۱۴۵} ۲۰۱۴؛^{۱۴۶} ۲۰۱۴؛^{۱۴۷} ۲۰۱۴؛^{۱۴۸} ۲۰۱۴؛^{۱۴۹} ۲۰۱۴؛^{۱۵۰} ۲۰۱۴؛^{۱۵۱} ۲۰۱۴؛^{۱۵۲} ۲۰۱۴؛^{۱۵۳} ۲۰۱۴؛^{۱۵۴} ۲۰۱۴؛^{۱۵۵} ۲۰۱۴؛^{۱۵۶} ۲۰۱۴؛^{۱۵۷} ۲۰۱۴؛^{۱۵۸} ۲۰۱۴؛^{۱۵۹} ۲۰۱۴؛^{۱۶۰} ۲۰۱۴؛^{۱۶۱} ۲۰۱۴؛^{۱۶۲} ۲۰۱۴؛^{۱۶۳} ۲۰۱۴؛^{۱۶۴} ۲۰۱۴؛^{۱۶۵} ۲۰۱۴؛^{۱۶۶} ۲۰۱۴؛^{۱۶۷} ۲۰۱۴؛^{۱۶۸} ۲۰۱۴؛^{۱۶۹} ۲۰۱۴؛^{۱۷۰} ۲۰۱۴؛^{۱۷۱} ۲۰۱۴؛^{۱۷۲} ۲۰۱۴؛^{۱۷۳} ۲۰۱۴؛^{۱۷۴} ۲۰۱۴؛^{۱۷۵} ۲۰۱۴؛^{۱۷۶} ۲۰۱۴؛^{۱۷۷} ۲۰۱۴؛^{۱۷۸} ۲۰۱۴؛^{۱۷۹} ۲۰۱۴؛^{۱۸۰} ۲۰۱۴؛^{۱۸۱} ۲۰۱۴؛^{۱۸۲} ۲۰۱۴؛^{۱۸۳} ۲۰۱۴؛^{۱۸۴} ۲۰۱۴؛^{۱۸۵} ۲۰۱۴؛^{۱۸۶} ۲۰۱۴؛^{۱۸۷} ۲۰۱۴؛^{۱۸۸} ۲۰۱۴؛^{۱۸۹} ۲۰۱۴؛^{۱۹۰} ۲۰۱۴؛^{۱۹۱} ۲۰۱۴؛^{۱۹۲} ۲۰۱۴؛^{۱۹۳} ۲۰۱۴؛^{۱۹۴} ۲۰۱۴؛^{۱۹۵} ۲۰۱۴؛^{۱۹۶} ۲۰۱۴؛^{۱۹۷} ۲۰۱۴؛^{۱۹۸} ۲۰۱۴؛^{۱۹۹} ۲۰۱۴؛^{۲۰۰} ۲۰۱۴؛^{۲۰۱} ۲۰۱۴؛^{۲۰۲} ۲۰۱۴؛^{۲۰۳} ۲۰۱۴؛^{۲۰۴} ۲۰۱۴؛^{۲۰۵} ۲۰۱۴؛^{۲۰۶} ۲۰۱۴؛^{۲۰۷} ۲۰۱۴؛^{۲۰۸} ۲۰۱۴؛^{۲۰۹} ۲۰۱۴؛^{۲۱۰} ۲۰۱۴؛^{۲۱۱} ۲۰۱۴؛^{۲۱۲} ۲۰۱۴؛^{۲۱۳} ۲۰۱۴؛^{۲۱۴} ۲۰۱۴؛^{۲۱۵} ۲۰۱۴؛^{۲۱۶} ۲۰۱۴؛^{۲۱۷} ۲۰۱۴؛^{۲۱۸} ۲۰۱۴؛^{۲۱۹} ۲۰۱۴؛^{۲۲۰} ۲۰۱۴؛^{۲۲۱} ۲۰۱۴؛^{۲۲۲} ۲۰۱۴؛^{۲۲۳} ۲۰۱۴؛^{۲۲۴} ۲۰۱۴؛^{۲۲۵} ۲۰۱۴؛^{۲۲۶} ۲۰۱۴؛^{۲۲۷} ۲۰۱۴؛^{۲۲۸} ۲۰۱۴؛^{۲۲۹} ۲۰۱۴؛^{۲۳۰} ۲۰۱۴؛^{۲۳۱} ۲۰۱۴؛^{۲۳۲} ۲۰۱۴؛^{۲۳۳} ۲۰۱۴؛^{۲۳۴} ۲۰۱۴؛^{۲۳۵} ۲۰۱۴؛^{۲۳۶} ۲۰۱۴؛^{۲۳۷} ۲۰۱۴؛^{۲۳۸} ۲۰۱۴؛^{۲۳۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۱۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۱۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۲۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۱۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۲۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۱۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۲۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۱۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۶} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۷} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۸} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۲۹} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۳۰} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۳۱} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۳۲} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۳۳} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۳۴} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۳۵} ۲۰۱۴؛^{۲۴۲۳۳۳۳۶}

استخراج مراحل اصلی فنولوژی گیاه کلزا با بررسی بصری^۱ منحنی‌های تولید شده از سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی

در مزرعه موردپژوهش عوارض انسان‌ساخت مانند مجتمع گاوداری، جاده آسفالت، استخر ذخیره آب، جاده‌های خاکی دسترسی به نقاط مختلف مزرعه و مزارع مجاور بدون کشت گیاه کلزا وجود دارد، بنابراین پیکسل‌های با تراکم گیاهی بیشتر از ۵۰ در صد به عنوان زمین زراعی محسوب شدند و پیکسل‌های مساوی یا کمتر از ۵۰ در صد به عنوان زمین با بر محسوب شدند و حذف شدند (یو و همکاران، ۲۰۱۳: ۷). در مرحله بعد، برای ساخت سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی، داده‌های پرت با استفاده از فیلتر ساویتزکی - گولی^۲ حذف و منحنی هموار شاخص‌های گیاهی، تولید شد. این فیلتر بسطی از روش جابجایی میانگین و بر اساس میانگین‌گیری از نقاط همسایگی و سپس تطبیق بر روی منحنی چندجمله‌ای و هموارسازی پیکها بر روی طیف می‌باشد (جامرمی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۸).

چرخه سالانه فنولوژی گیاهان، بر پایه سری‌های زمانی داده‌های سنجش‌از دور، از چهار مرحله کلیدی انتقالی استنباط می‌شوند و بر اساس آن فازهای مهم فنولوژیکی گیاهان مشخص می‌شوند. زمان‌های کلیدی عبارت‌اند از (۱) سبزینگی^۳: زمان شروع فعالیت‌های فتوسنتری؛ (۲) بلوغ^۴: زمانی که در آن سطح سبز گیاه و فعالیت‌های فتوسنتری به حد اکثر می‌رسد؛ (۳) پیری^۵: زمانی که در آن فعالیت‌های فتوسنتری و سطح برگ سبز شروع به کاهش سریع می‌کند؛ (۴) رکود^۶: زمانی که در آن فعالیت‌های فیزیولوژیکی نزدیک صفر می‌شود (زانگ و همکاران، ۲۰۰۳: ۲). مراحل فنولوژیکی گیاه با بررسی بصری (زانگ و همکاران، ۲۰۰۳: ۳) و بالحظ کردن کاهش و با افزایش مقدار شاخص‌های گیاهی به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای در زمان چرخه زندگی گیاه برآورد می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵: ۶). از آنجایی که بیشترین مقدار فعالیت گیاه معمولاً در حدود بلوغ روی می‌دهد، قابل قبول است که زمان بیشینه مقدار شاخص گیاهی در منحنی را به عنوان زمان بلوغ در نظر بگیریم. در زمان کاشت و جوانه‌زنی کلزا، بیشتر مساحت مزرعه از پوشش گیاهی تهی است، بنابراین می‌توان استدلال کرد که کمینه مقدار شاخص گیاهی در زمان سبزینگی روی می‌دهد. در زمان پیری به علت کاهش فعالیت‌های فتوسنتری، انتظار می‌رود شیب منحنی شاخص گیاهی بعد از مرحله بلوغ، حالت نزولی داشته باشد و در زمان رکود، گیاه فعالیت فیزیولوژیکی ندارد و انتظار می‌رود شیب منحنی شاخص گیاهی تغییر قابل توجهی نداشته باشد.

استخراج پارامترهای فنولوژی کلزا از سری‌های زمانی هموار شده (بر اساس روابط و قوانین)

- ^۱- Visual Inspection
- ^۲- You et al
- ^۳- Savitzky – Golay filter
- ^۴- Green up
- ^۵- Maturity
- ^۶- Senescence
- ^۷- Dormancy
- ^۸- Zhang et al
- ^۹- Wang et al

کلزا در منطقه موردپژوهش در اوخر تابستان و اوایل پاییز کشت و در اوخر بهار برداشت می‌شود. چرخه‌ی زندگی کلزا حدوداً ۲۵۰ تا ۲۷۰ روز است. در عمل، SOS زمان سبز شدن برگ‌ها پس از رکود و خواب زمستانی (گیو و همکاران^۱، ۲۰۱۶: ۳) و EOS زمان کاهش سریع فعالیت فتوستنتزی و سطح برگ سبز تعریف می‌شود (هان و همکاران^۲، ۲۰۲۰: ۵). در این پژوهش، از روش‌های آستانه نسبی، نرخ تغییر و مشتق اول برای استخراج SOS/EOS استفاده می‌شود. در روش آستانه نسبی از رابطه (۵) برای استخراج پارامترهای فنولوژیکی استفاده می‌شود.

$$VI_{Ratio} = VI - VI_{min} / VI_{max} - VI_{min} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن VI مقدار شاخص گیاهی، VI_{min} و VI_{max} کمینه و بیشینه مقدار شاخص گیاهی ثبت شده در طول زندگی گیاه می‌باشد. شروع فصل، زمانی از سال می‌باشد که در آن مقدار آستانه نسبی در حال صعود به ۰/۵ برسد. بر همین اساس، پایان فصل زمانی از سال می‌باشد که در آن مقدار آستانه نسبی در حال نزول به ۰/۵ برسد (وو و همکاران^۳، ۲۰۱۷: ۳).

در روش نرخ تغییر از رابطه (۶) برای تشخیص مراحل فنولوژیکی استفاده می‌شود.

$$VI_{RC} = VI(i+1) - VI(i) / VI(i) \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن VI_{RC} مقدار نرخ تغییر در زمان (i) شاخص گیاهی در زمان (i) و $VI(i+1)$ مقدار شاخص گیاهی در زمان (i+1) می‌باشد. در این روش، بیشینه مقدار نرخ تغییر شاخص گیاهی مشخص و سپس روز متناظر با آن به عنوان SOS تعیین می‌شود. همچنین کمینه مقدار نرخ تغییر شاخص گیاهی مشخص و سپس روز متناظر با آن بعلاوه یک (i + 1) را به عنوان EOS تعیین می‌شود (هان و همکاران^۴، ۲۰۲۰: ۶).

در روش سوم از مشتق اول سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی استفاده می‌شود و پس از ترسیم منحنی، تحدب منحنی در شروع چرخه زندگی گیاه به عنوان SOS و تقریباً منحنی در پایان چرخه زندگی گیاه به عنوان EOS محاسبه می‌شود (بوت و همکاران^۵، ۲۰۱۱: ۳).

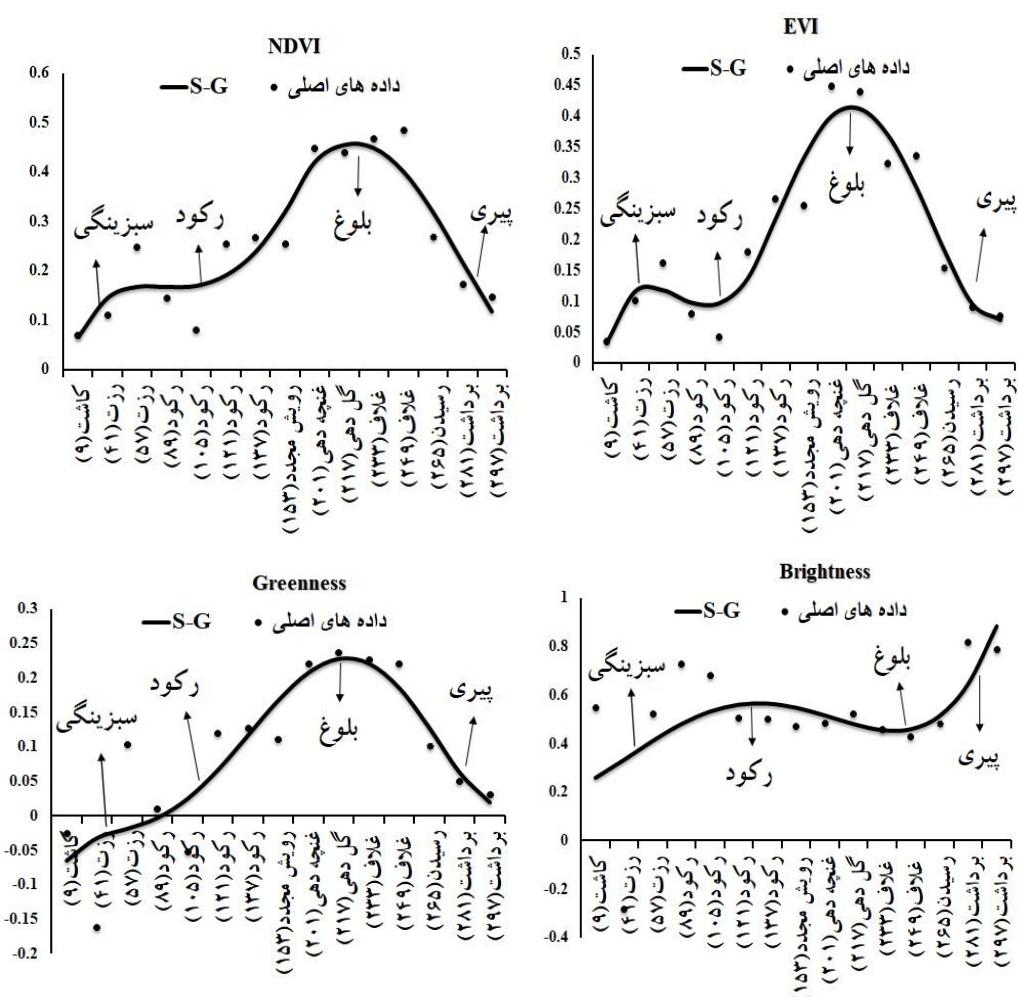
$$d(VI) / d(t) = VI(i) - VI(i-1) / t(i) - t(i-1) \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه (۷)، $d(VI)$ دیفرانسیل شاخص گیاهی و $d(t)$ دیفرانسیل زمان می‌باشد. $VI(i)$ مقدار شاخص گیاهی در زمان (i) و $VI(i-1)$ مقدار شاخص گیاهی در زمان (i-1)، $t(i)$ زمان (i) و $t(i-1)$ زمان (i-1) می‌باشد.

^۱- Guo et al
^۲- Han et al
^۳- Wu et al
^۴- Butt et al

نتایج

فنولوژی گیاه کلزا با بررسی بصری سری زمانی شاخص‌های گیاهی سنجش از دور و مشاهدات میدانی بررسی بصری منحنی‌های تولید شده از سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی شکل (۳) نشان می‌دهد که در بین چهار شاخص، شاخص NDVI بیشترین و شاخص Brightness کمترین مطابقت را با مشاهدات میدانی دارند. قله و قعر منحنی شاخص Brightness با دیگر منحنی‌ها حالت وارون و معکوس دارد. با توجه به اینکه این شاخص روشنایی خاک را اندازه‌گیری می‌کند، در زمان‌های که مزرعه دارای بیشترین سطح پوشش گیاهی است، کمترین مقادیر را نشان می‌دهد. مرحله سبزینگ در همه منحنی، به صورت صعودی قابل تشخیص است. در منحنی Greenness مقادیر منفی بدین علت است که مزرعه دارای پوشش گیاهی بسیار کمی می‌باشد. مرحله رکود در منحنی NDVI با شبیب تقریباً نزدیک به صفر نمایش داده است و در منحنی EVI شبیب منفی پیدا می‌کند. مرحله رکود در منحنی Brightness متفاوت با دیگر شاخص‌ها، به صورت قله موج نشان داده شده است. در منحنی Greenness مرحله رکود برخلاف دیگر منحنی شاخص‌ها، شبیب مثبت است. به دلیل وجود پوشش گیاهی سبزرنگ کلزا در مزرعه، با وجود توقف فعالیت‌های فتوسنتری، شبیب منحنی همچنان مثبت است. مرحله بلوغ که حداقل فعالیت فتوسنتری را نشان می‌دهد، نیز در هر چهار منحنی به خوبی قابل تشخیص است، البته در منحنی Brightness این مرحله برخلاف سه منحنی دیگر به صورت قعر نمایش داده شده است. مرحله پیری، در منحنی‌های EVI، NDVI، Greenness بعد از مرحله بلوغ با شبیب منفی مشخص است. مرحله پیری در منحنی Brightness با شبیب مثبت نمایش داده شده است. برای شاخص‌های گیاهی سنجش از دور، مقدار دامنه، انحراف استاندارد و واریانس در جدول (۲) و میانگین عددی شاخص‌های گیاهی، برای مراحل چهارگانه فنولوژی سنجش از دور در جدول (۳)، نمایش داده شده است.



شکل (۳). منحنی هموار شده شاخص‌های گیاهی سنجش از دور توسط مدل S-G و مراحل اصلی فنولوژی سنجش از دور کلزا (محور افقی شامل مراحل فنولوژی دیده‌بانی شده و اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده تعداد روز بعد از مرحله کاشت می‌باشد)

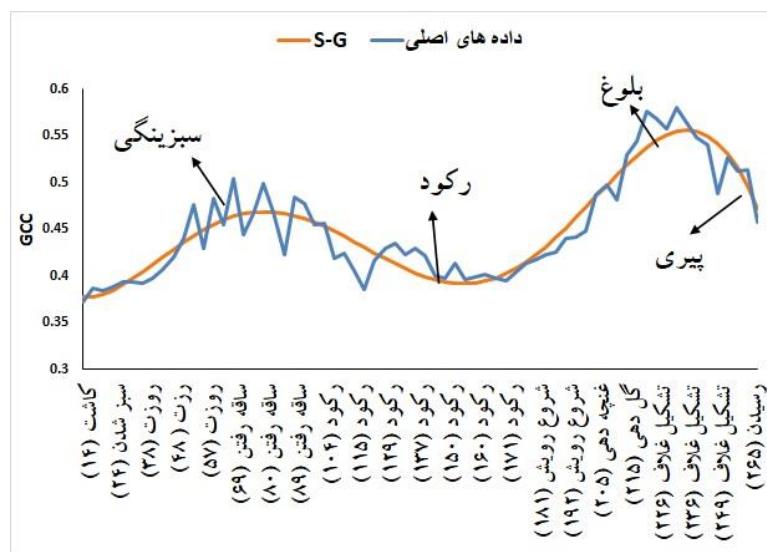
جدول (۲). مقادیر دامنه، انحراف استاندارد، حداقل و حداکثر شاخص‌های گیاهی مورد استفاده

شاخص	دامنه	حداقل	حدود استاندارد	واریانس
NDVI	۰/۳۹	۰/۱۲۷	۰/۰۱۶	
EVI	۰/۳۸	۰/۱۲۹	۰/۰۱۷	
Greenness	۰/۳	۰/۰۹۸	۰/۰۱۰	
Brightness	۰/۶۲	۰/۱۴۰	۰/۰۲۰	

جدول (۳). میانگین عددی شاخص‌های استفاده شده در مراحل چهارگانه فنولوژی سنجش از دور

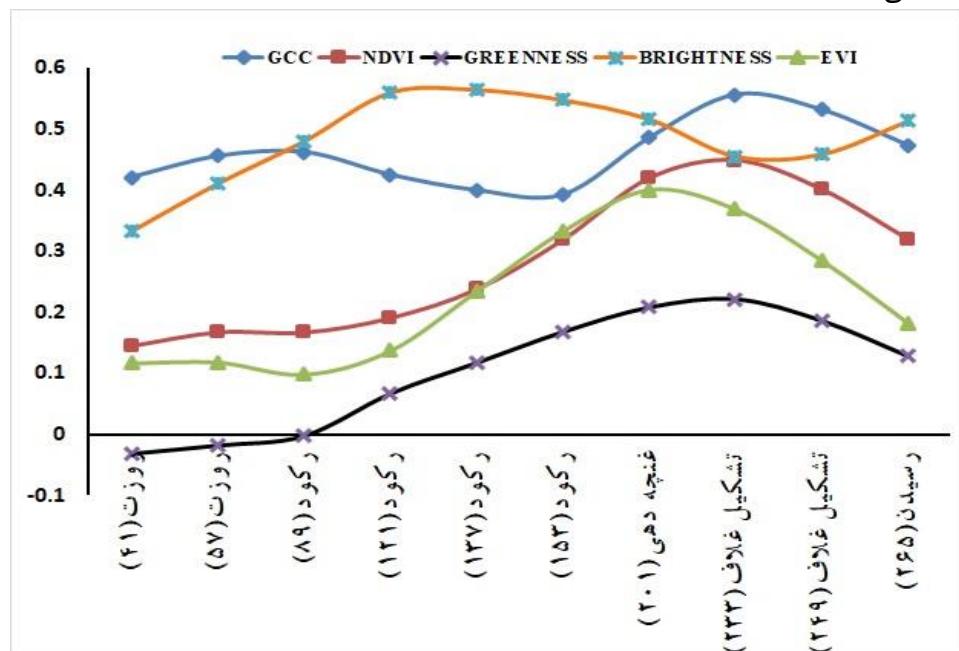
Brightness	Greenness	EVI	NDVI	مراحل فنولوژی
۰/۲۶۱۸	-۰/۰۲۷۹	۰/۰۹۹	۰/۱۴۲۵	سبزینگی
۰/۶۰۲۱	۰/۰۵۰۹	۰/۱۴۱۷	۰/۱۸۷۳	رکود
۰/۴۷۱۵	۰/۲۲۵۴	۰/۳۸۶۳	۰/۴۶	بلغ
۰/۶۹۳۹	۰/۰۶۰۵	۰/۱۰۶۸	۰/۱۹۶۳	پیری

فناولوژی گیاه کلزا با استفاده از سری زمانی شاخص GCC و مشاهدات میدانی شاخص GCC توسط رابطه (۱) برای ۶۸ تصویر دوربین دیجیتال، محاسبه شد و با مراحل فناولوژیکی گیاه کلزا مقایسه شد شکل (۴). برای کاهش اختلال، داده‌های GCC با استفاده از مدل S-G هموار شده‌اند. بررسی بصری منحنی هموار شده شاخص GCC نشان می‌دهد که این شاخص با فناولوژی‌های مشاهداتی گیاه کلزا مطابقت بسیار زیادی دارد. مرحله سبزینگی شامل مراحل کاشت، سبز شدن، روزت و ساقه رفتن و با شبیث مثبت قابل تشخیص است. مرحله رکود نیز هم‌زمان با شبیث نزولی منحنی شروع می‌شود و در زمان مثبت شدن دوباره شبیث، خاتمه می‌یابد. مرحله بلوغ که بیشترین فعالیت‌های فتوسنتری رخ می‌دهد با مراحل گل‌دهی و تشکیل غلاف مطابقت دارد. مرحله پیری با شبیث منفی در زمان رسیدن محصول کلزا و بعد از مرحله بلوغ رخ داده است. برآورد مناسب شاخص GCC از مراحل فناولوژی، به خاطر فراوانی تصاویر دیجیتال تهیه شده از مزرعه و کمتر بودن تأثیر عوامل محیطی، مانند رطوبت اتمسفری و اپراتوری، می‌باشد.



شکل (۴). منحنی هموار شده سری زمانی شاخص GCC توسط مدل S-G و فنولوژی‌های دیدبانی شده کلزا

مقایسه شاخص‌های گیاهی سنجش‌از دور با شاخص GCC حاصل از تصاویر دوربین دیجیتال برای مقایسه شاخص GCC، با سایر شاخص‌های سنجش‌از دور گیاهی، ۱۰ تصویر ماهواره‌ای و ۱۰ تصویر گوشی هوشمند در روزهای مشابه از مزرعه کلزا، انتخاب شدند. سپس منحنی سری زمانی هر شاخص بر اساس این ۱۰ تصویر رسم شد شکل (۵). برای ارزیابی مقادیر شاخص GCC و مقادیر شاخص‌های سنجش‌از دور از آزمون همبستگی پیرسون (r) با سطح معنی داری $0.05 < P$ در مراحل مختلف فنولوژی استفاده گردید (جدول ۴). در این آزمون ابتدا مقدار سطح معنی داری دو متغیر بررسی می‌شود، اگر سطح معنی داری کمتر از مقدار مفروض باشد به این معنی است که بین دو متغیر همبستگی وجود دارد، سپس شدت و جهت همبستگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمون همبستگی پیرسون نشان داد که بین شاخص GCC و شاخص NDVI در مراحل بلوغ و پیری همبستگی وجود دارد و جهت رابطه بین دو متغیر ثابت و شدت همبستگی به دست آمده بسیار قوی می‌باشد. در مراحل سبزینگی و رکود شاخص GCC با شاخص Brightness دارای همبستگی می‌باشد و جهت رابطه بین دو متغیر ثابت و شدت همبستگی به دست آمده بسیار قوی (لیانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۹: ۹) می‌باشد.



شکل (۵). منحنی هموار شده سری زمانی شاخص GCC و شاخص‌های ماهواره‌ای سنجش‌از دور - حاصل از ده جفت تصویر ماهواره‌ای و دیجیتال عکاسی در یک روز معین از مزرعه - (محور افقی شامل مراحل فنولوژی دیده‌بانی شده و اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده تعداد روز بعد از مرحله کاشت می‌باشد)

جدول (۴). ضریب همبستگی پیرسون (r) و سطح معنی داری (P) بین شاخص **GCC** و شاخص های سنجش از دور ماهواره ای در مراحل مختلف فنولوژی

Greenness		Brightness		EVI		NDVI		
P	r	P	r	P	r	P	r	
•/١٨٢	•/٩٥٩	•/٠٥٠	•/٩٦٧	•/٧٨١	•/٣٣٧	•/٤٧٦	•/٧٣٣	سیزینگی
•/٠٩٢	-•/٩٠٨	•/٠١٩	•/٩٨١	•/١١٩	-•/٨٨١	•/٠٧٤	-•/٩٢٦	رکود
•/٢٧٩	•/٩٠٦	•/٩٩٧	-•/٤٥٨	•/٧٤٦	•/٣٨٩	•/٠٤٨	•/٩٩٢	بلوغ
•/٠٥٦	•/٩٩٦	•/١٥٥	-•/٩٧١	•/١٠٨	•/٩٨٦	•/٠٤١	•/٩٩٧	پیری

استخراج پارامترهای فنولوژیکی، کلزا بر اساس روابط

(۱) در روز ۱۵۳ و پایان فصل SOS بر اساس فنولوژی‌های دیده‌بانی شده در مزرعه کلزا مورد مطالعه، شروع فصل (به دست آمده از روش‌های EOS و SOS) در روز ۲۵۰ بعد از کاشت کلزا روی می‌دهند. اختلاف بین EOS (حائل از فنولوژی دیده‌بانی، در جدول (۵) قید شده است) و SOS مورد استفاده در این پژوهش (شکل ۶) با فراهم کرده است. SOS توسط روش مشتق اول، با مقدار اختلاف ۵ روز بهترین برآورد را برای Brightness شاخص با روش نرخ تغییر، بهترین برآورد را دارند با Brightness با روش مشتق اول و EVI شاخص‌های EOS در برآورد با میانگین اختلاف ۱۶ روز و روش مشتق Brightness با SOS (بدون اختلاف)، به صورت میانگین، در برآورد با میانگین اختلاف ۷ روز EVI شاخص EOS اول با میانگین اختلاف ۱۸ روز بهترین عملکرد را داشته‌اند. در برآورد شاخص‌های SOS و روش نرخ تغییر با میانگین اختلاف ۸ روز بهترین عملکرد را داشته‌اند. تمام برآوردهای دیده‌بانی شده حالت زودرس دارند. میزان میانگین خطای شاخص‌های گیاهی SOS سنجش‌ازدور نسبت به خطای SOS نسبت به EOS سنجش‌ازدور مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد که تمام شاخص‌ها در برآورد کمتری دارند (جدول (۵)).

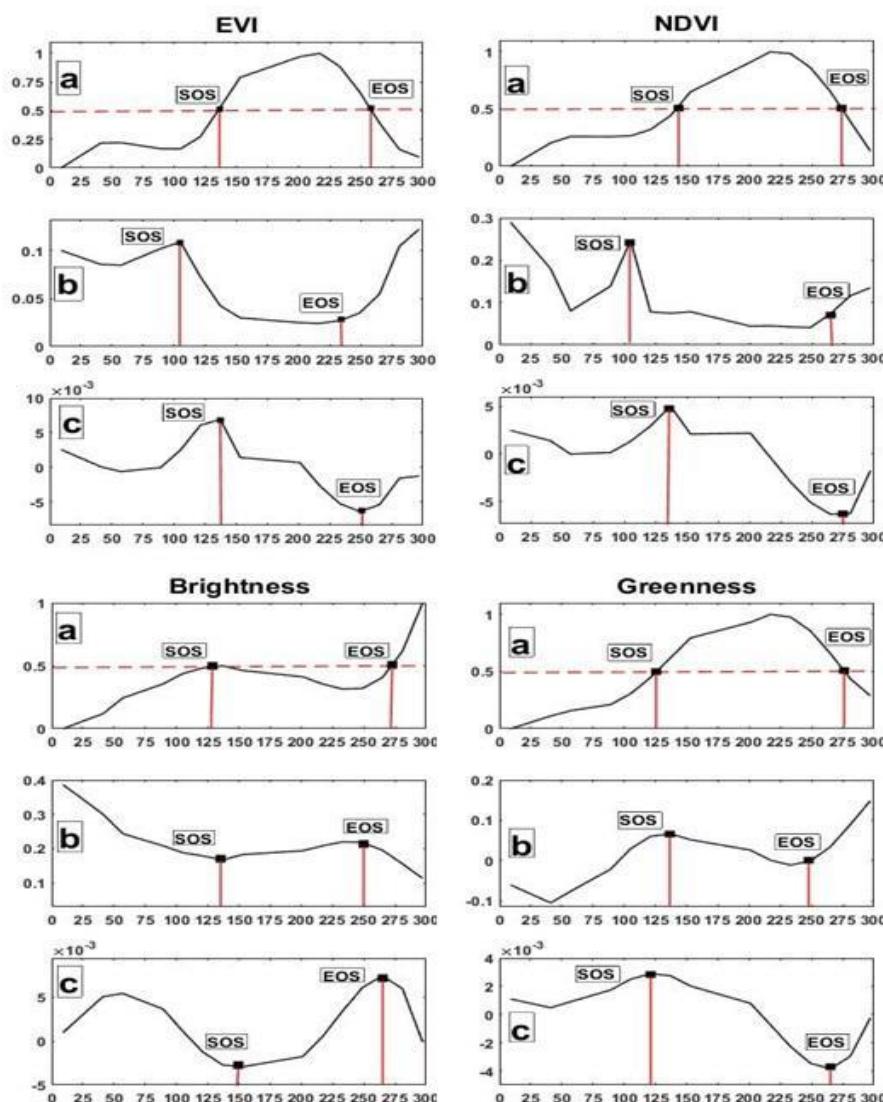
جدول (۵). اختلاف برآورد SOS/EOS توسط روش‌های آستانه‌ی نسبی، نرخ تغییر و مشتق اول با SOS/EOS دیده‌بانی شده بر حسب روز (علامت منفی بیان کننده زودرس بودن و علامت مثبت بیان کننده دیررس بودن) م باشد و مفهوم را پس ندارند، در نتیجه به این محاسبه مبالغگی از قب مطلقه اعداد استفاده شد.

میانگین	Brightness	Greenness	EVI	NDVI		
۱۹	-۲۵	-۲۸	-۱۶	-۷	آستانه نسبی	شروع فصل SOS
۳۳	-۱۸	-۱۶	-۴۹	-۴۹	نرخ تغییر	
۱۸	-۵	-۳۱	-۱۵	-۲۱	مشتق اول	
-	۱۶	۲۵	۲۶/۶	۲۵/۶	میانگین	
۱۹/۵	۲۲	۲۶	۶	۲۴	آستانه نسبی	
۸	.	-۳	-۱۵	۱۴	نرخ تغییر	
۱۳/۵	۱۵	۱۵	.	۲۵	مشتق اول	
-	۱۲/۳	۱۴/۶	۷	۲۱	میانگین	

در جدول (۶) همبستگی بین شاخص‌های گیاهی سنجش‌از دور در مرحله‌های SOS / EOS توسط آزمون همبستگی پیرسون سنجیده شد. نتایج نشان داد که در مرحله SOS هیچ‌کدام از شاخص‌ها با یکدیگر همبستگی ندارند اما در مرحله EOS شاخص EVI و Brightness ($r = 0.99$, $P = 0.02$) و شاخص Greenness و شاخص Brightness ($r = 0.99$, $P = 0.04$) دارای همبستگی قوی می‌باشند.

جدول (۶). ضریب همبستگی پیرسون (r) و سطح معنی‌داری (P) بین شاخص‌های سنجش‌از دور در مرحله‌های SOS / EOS

Greenness	Brightness	EVI	NDVI			
-0.86	-0.16	0.93	*	r	شروع فصل SOS	
0.33	0.89	0.22	*	P		
-0.98	0.19	*	0.93	r		
0.10	0.87	*	0.22	P		
-0.35	*	0.19	-0.16	r		
0.77	*	0.87	0.89	P		
*	-0.35	-0.98	-0.86	r		
*	0.77	0.10	0.33	P		
0.89	0.92	0.93	*	r		
0.29	0.25	0.23	*	P		
0.99	0.99	*	0.93	r	پایان فصل EOS	
0.06	0.02	*	0.23	P		
0.99	*	0.99	0.92	r		
0.04	*	0.02	0.25	P		
*	0.99	0.99	0.89	r		
*	0.04	0.06	0.29	P	Greenness	



شکل (۶). استخراج مراحل فنولوژی (SOS/EOS) گیاه کلزا در مزرعه مورد مطالعه - (اشکال a, b, c به ترتیب مربوط به روش‌های آستانه‌ی نسبی، نرخ تغییر و مشتق اول می‌باشد) - محور افقی تعداد روز بعد از کاشت گیاه را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در برآورد مراحل فنولوژی کلزا از فیلتر G-S برای هموارسازی سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره لندست ۸ و سنجنده OLI استفاده شد و سپس معیارهای با در نظر گرفتن افزایش یا کاهش مقدار شاخص گیاهی برای قضاوت در مورد مرحله‌های سبزینگی، رکود، بلوغ و پیری تعریف شد. تجزیه و تحلیل‌های پژوهش حاضر نشان داد که تشخیص فنولوژی گیاه کلزا با تفکیک مکانی ۳۰ متر حاصل از تصاویر ماهواره لندست ۸ و سنجنده OLI امکان‌پذیر می‌باشد. بررسی بصری منحنی‌های تولید شده از سری

زمانی شاخص‌های گیاهی نشان داد که منحنی شاخص NDVI با مراحل فنولوژی دیده‌بانی شده مطابقت بیشتری دارد. این موضوع با نتایج حاصل از تحقیقات صابرفر و همکاران (۱۳۹۷: ۲۰) و فیروزی و طاووسی (۱۳۹۷: ۱۴) که شاخص گیاهی NDVI را بهترین شاخص در ارزیابی پوشش گیاهی بیان کردند، مطابقت دارد. منحنی شاخص Brightness رفتاری معکوس را نشان می‌دهد، یعنی در منحنی این شاخص، مرحله رکود به صورت قله و مرحله بلوغ به صورت قعر نمایش داده می‌شود. منحنی شاخص Greenness، قادر به تشخیص مرحله رکود نیست. برآورده مراحل فنولوژی کلزا با استفاده از روابط و قوانین نشان داد که شاخص Brightness در برآورد SOS با مقدار اختلاف ۵ روز نسبت به داده‌های فنولوژی دیده‌بانی شده، عملکرد بهتری دارد و در برآورده EOS، شاخص EVI و شاخص Brightness بدون اختلاف نسبت به داده‌های دیده‌بانی شده بهترین عملکرد را دارند. در مجموع، شاخص‌های گیاهی سنجش‌از دور، در برآورده EOS خطای کمتری نسبت به برآورده SOS دارند، همچنین همه برآوردهای SOS حاصل از شاخص‌های گیاهی نسبت به SOS حاصل از مشاهدات میدانی، آغازی زودرس دارند. نتایج به دست آمده مشابه نتایج تحقیق گیو و همکاران^۱ (۲۰۱۶: ۱۳) و سنت پیتر و همکاران^۲ (۲۰۱۸: ۱۲) می‌باشد، در هر دو تحقیق نتایج نشان دادند که SOS داده‌های ماهواره‌ای زودتر از مشاهدات میدانی اتفاق افتاده است. تحقیق سنت پیتر و همکاران (۲۰۱۸) همچنین تأیید می‌کند که شاخص‌های گیاهی مورداً استفاده در تحقیق، EOS را دیررس برآورد می‌کند. شبیه به پژوهش هافکنر و همکاران^۳ (۲۰۱۹: ۸) ما از ارزیابی بصری منحنی شاخص GCC حاصل از تصاویر دوربین‌های دیجیتال استفاده کردیم. نتایج نشان داد که شاخص GCC می‌تواند توالی تکامل و پیشرفت در رشد گیاه کلزا را نمایش دهد. در تأیید پژوهش هافکنر و همکاران (۲۰۱۹: ۸)، نتایج ما نشان داد که بین شاخص EVI و شاخص GCC همبستگی ضعیفی وجود دارد. در مقابل، شبیه پژوهش سنت پیتر و همکاران^۲ (۲۰۱۸: ۱۲) نتایج ما نشان داد که بین شاخص NDVI و شاخص GCC همبستگی وجود دارد. تصاویر دوربین‌های دیجیتال برای پایش و رصد کردن تغییرات فنولوژیکی گیاهان، ابزاری مفیدند. یک مزیت دوربین‌های دیجیتال این است که ارزان قیمت هستند و استفاده از آن‌ها آسان می‌باشد. مزیت دیگر آن‌ها تفکیک بالا در زمان و مکان می‌باشد، به‌گونه‌ای که در مشاهدات مبتنی بر دوربین دیجیتال، مشاهده دقیق یک‌گونه و یا حتی یک برگ امکان‌پذیر است (آید و اوگوما^۴: ۲۰۱۰: ۸). رویکردهای مختلف هموارسازی داده‌ها ممکن است تخمین‌های متفاوتی از SOS/EOS ایجاد کند، همچنین تفاوت در سنجنده‌های ماهواره‌ای نیز باعث تفاوت در برآورده فنولوژی سنجش‌از دور می‌شود. ترکیب متنوعی از سنجنده‌ها و روش‌های هموارسازی داده‌ها نیاز است به کار گرفته شود تا با دقت بیشتری فنولوژی گیاهان زراعی استخراج شود.

^۱- Guo et al^۲- St. Peter et al^۳- Hufkens et al^۴- Ide & Oguma

منابع

- اصغری سراسکانرود صیاد؛ امامی هادی. (۱۳۹۸). پایش دمای سطح زمین و بررسی رابطه کاربری اراضی با دمای سطح با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و ETM+ مطالعه موردنی: (شهرستان اردبیل)، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹ (۵۳): ۱۹۵-۲۱۵.
- جاجرمی امیر؛ تقی زاده مسعود؛ سازگارنیا آمنه؛ بهزاد خلیل. (۱۳۹۵). به کارگیری روش‌های پیش‌پردازش داده‌های حاصل از طیف‌سنجی مرئی / مادون‌قرمز نزدیک در تبیین مدلی برای پیش‌گویی ماده جامد محلول و اسیدیته لیموترش، علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۳ (۵۳): ۱۰۳-۱۱۲.
- خوشحال جواد؛ براتیان علی. (۱۳۸۸). برآورد نیازهای حرارتی مراحل فنولوژیکی کلزای پاییزه (ارقام SLM046 و Okapi) در شرایط اقلیمی سرد ایران (مطالعه موردنی شهرکرد)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۰: ۴۴-۳۵.
- فرخزاده بهنوش؛ منصوری شهریز؛ سپهری عادل. (۱۳۹۶). تعیین میزان همبستگی بین شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI با شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI (مطالعه موردنی: مراتع دشتی استان گلستان)، هواشناسی کشاورزی، ۵ (۲): ۶۵-۵۶.
- فیروزی فاطمه؛ طاوی‌تی تقی. (۱۳۹۷). بررسی حساسیت دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI به خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطالعه موردنی: دشت سیستان ایران، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۸ (۱۱۰): ۱۷۹-۱۶۳.
- صابرفر رحیمه؛ فلاحتکار سامره؛ کیا سید حسین. (۱۳۹۷). تحلیل تغییرات شاخصه‌ای پوشش گیاهی در سنجنده‌های ماهواره لنdest (مطالعه موردنی: ارس‌زارهای شرق پارک ملی گلستان و منطقه حفاظت‌شده قرخود)، فصلنامه اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۹ (۱): ۹۷-۹۱.
- مبادری محمدرضا؛ رنجبر سمیرا. (۱۳۹۶). تشخیص مزارع آلوده به بیماری زنگ گندم با استفاده از تصاویر لنdest، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷ (۴۴): ۷-۲۴.
- میری ناصح؛ درویش‌صفت علی‌اصغر؛ ضرغام نصرت‌الله؛ شاکری زاهد. (۱۳۹۶). برآورد شاخص سطح برگ در جنگل‌های زاگرس با داده‌های ماهواره لنdest، ۸، مجله جنگل ایران، ۹ (۱): ۲۹-۴۲.
- Ahmad, S., Abbas, G., Fatima, Z., Khan, R. J., Anjum, M., Ahmed, M., Khan, M.A., Porter, C. H., Hoogenboom, G., (2017), Quantification of the impacts of climate warming and crop management on canola phenology in Punjab, Pakistan, Journal of Agronomy and Crop Science, 203(5): 442-452.
- Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., Tong, Q., (2014), Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance, Remote Sensing Letters, 5(5): 423-431.
- Butt, B., Turner, M. D., Singh, A., Brottem, L., (2011), Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Sahelian West Africa, Remote Sensing of Environment, 115(12): 3367-3376.
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A., Schwartz, M. D., (2007), Shifting plant phenology in response to global change, Trends in Ecology and Evolution, 22(7): 357-365.

- Dash, J., Jeganathan, C., Atkinson, P. M., (2010), **The use of MERIS Terrestrial Chlorophyll Index to study spatio-temporal variation in vegetation phenology over India**, Remote Sensing of Environment, **114**(7):1388-1402.
- Duncan, J., Dash, J., Atkinson, P. M., (2015), **The potential of satellite-observed crop phenology to enhance yield gap assessments in smallholder landscapes**, Frontiers in Environmental Science, **3**(56): 1-16.
- Guo, L., An, N., Wang, K., (2016), **Reconciling the discrepancy in ground-and satellite-observed trends in the spring phenology of winter wheat in China from 1993 to 2008**, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **121**(3): 1027-1042.
- Han, H., Bai, J., Ma, G., Yan, J., (2020), **Vegetation Phenological Changes in Multiple Landforms and Responses to Climate Change**, ISPRS International Journal of Geo-Information, **9**(2): 111.
- Harper, F. R., Berkenkamp, B., (1975), **Revised growth-stage key for Brassica campestris and B. napus**, Canadian Journal of Plant Science, **55**(2): 657-658.
- He, Di., Enli, Wang., Jing, Wang., Julianne, Lilley., Zhongkui, Luo., Xuebiao, Pan., Zhihua, Pan., Ning, Yang., (2017), **Uncertainty in canola phenology modelling induced by cultivar parameterization and its impact on simulated yield**, Agricultural and forest meteorology, **232**: 163-175.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G., (2002), **Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices**, Remote Sensing of Environment, **83**(2): 195-213.
- Hufkens, K., Melaas, E. K., Mann, M. L., Foster, T., Ceballos, F., Robles, M., Kramer, B., (2019), **Monitoring crop phenology using a smartphone based near-surface remote sensing approach**, Agricultural and forest meteorology, **265**: 327-337.
- Ide, R., Oguma, H., (2010), **Use of digital cameras for phenological observations**, Ecological Informatics, **5**(5): 339-347.
- Liang, Y., Abbott, D., Howard, N., Lim, K., Ward, R., Elgendi, M., (2019), **How Effective Is Pulse Arrival Time for Evaluating Blood Pressure? Challenges and Recommendations from a Study Using the MIMIC Database**, Journal of Clinical Medicine, **8**(3): 337.
- Lloyd, D., (1990), **A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery**, Title Remote Sensing, **11**(12): 2269-2279.
- Ma, X., Huete, A., Yu, Q., Coupe, N.R., Davies, K., Broich, M., Ratana, P., Beringer, J., Hutley, L.B., Cleverly, J., Boulain, N., (2013), **Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian Tropical Transect**, Remote Sensing of Environment, **139**: 97-115.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., Qiu, G., (2007), **Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest**, Sensors, **7**(11): 2636-2651.
- Melaas, E. K., Friedl, M. A., Zhu, Z., (2013), **Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM+ data**, Remote Sensing of Environment, **132**: 176-185.
- Pettorelli, N., Laurance, W. F., O'Brien, T. G., Wegmann, M., Nagendra, H., Turner, W., (2014), **Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges**, Journal of Applied Ecology, **51**(4): 839-848.
- Raza, S. M. H., Mahmood, S. A., Khan, A. A., Liesenberg, V., (2018), **Delineation of potential sites for rice cultivation through multi-criteria evaluation (MCE) using remote sensing and GIS**, International Journal of Plant Production, **12**(1): 1-11.

- Samarawickrama, U., Piyaratne, D., Ranagalage, M., (2017), **Relationship between NDVI with Tasseled cap Indices: A Remote Sensing based Analysis**, IJIRT, 3(12): 13-19.
- St Peter, J., Hogland, J., Hebblewhite, M., Hurley, M. A., Hupp, N., Proffitt, K., (2018), **linking phenological indices from digital cameras in Idaho and Montana to MODIS NDVI**, Remote Sensing, 10(10): 1612.
- Tucker, C.J, (1978), **Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation**, Remote Sensing of Environment, 8: 127-150.
- Vrieling, A., Meroni, M., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Wang, T., Zurita-Milla, R., Oosterbeek, K., O'Connor, B., Paganini, M., (2018), **Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island**, Remote Sensing of Environment, 215: 517-529.
- Wang, J., Huang, J.F., Wang, X.Z., Jin, M.T., Zhou, Z., Guo, Q.Y., Zhao, Z.W., Huang, W.J., Zhang, Y., Song, X.D., (2015), **Estimation of rice phenology date using integrated HJ-1 CCD and Landsat-8 OLI vegetation indices time-series images**, Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 16(10): 832-844.
- White, M. A., Nemani, R. R., (2006), **Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology**, Remote Sensing of Environment, 104(1): 43-49.
- Woźniak, E., Waszkowska, E., Zimny, T., Sowa, S., Twardowski, T., (2019), **The Rapeseed Potential in Poland and Germany in the Context of Production, Legislation and Intellectual Property Rights**, Frontiers in plant science, 10:1423.
- Wu, C., Hou, X., Peng, D., Gonsamo, A., Xu, S., (2016), **Land surface phenology of China's temperate ecosystems over 1999–2013: Spatial-temporal patterns, interaction effects, covariation with climate and implications for productivity**, Agricultural and forest meteorology, 216:177-187.
- Wu, C., Peng, D., Soudani, K., Siebicke, L., Gough, C.M., Arain, M.A., Bohrer, G., Lafleur, P.M., Peichl, M., Gonsamo, A., Xu, S., Fang, B., Ge, Q., (2017), **Land surface phenology derived from normalized difference vegetation index (NDVI) at global FLUXNET sites**, Agricultural and Forest Meteorology, 233:171-182.
- You, X., Meng, J., Zhang, M., Dong, T., (2013), **remote sensing based detection of crop phenology for agricultural zones in China using a new threshold method**, Remote Sensing, 5(7):3190-3211.
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C., Gao, F., Reed, B. C., Huete, A., (2003), **Monitoring vegetation phenology using MODIS**, Remote Sensing of Environment, 84(3): 471-475.