نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و چهارم، شماره ۷۲، بهار ۱۴۰۳

# برآورد مراحل فنولوژی کلزا با استفاده از شاخص‌های گیاهی سنجش‌ازدور و تصاویر دیجیتال دوربین عکاسی

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

**صفحات**: ۲۵۰-۲۳۱

**اکبر میراحمدی**: دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی کشاورزی، گروه جغرافیایی طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران[۱].
**Email:** a_mirahmadi@yahoo.com
**حجت اله 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 سنجش‌ازدور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، 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 سنجش‌ازدور NDVI، EVI، Greenness و Brightness حاصل از سنجنده OLI و شاخص GCC حاصل از تصاویر دوربین دیجیتال، برای برآورد مراحل فنولوژی گیاه کلزا و از فیلتر ساویتزکی- 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 سنجش‌ازدور (سبزینگی، رکود، بلوغ و پیری) را به‌خوبی نمایش می‌دهند اما شاخص Greenness، مرحله رکود را به‌خوبی 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، سنجش‌ازدور، لندست ۸، دوربین دیجیتال.

---

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

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

**مقدمه**

فنولوژی، مطالعه و بررسی چرخه‌های زندگی گیاهان و جانوران و تعامل آن‌ها با آب‌وهوا و دیگر محرک‌های محیطی است (ما و همکاران[۱]، ۲۰۱۳: ۱). مطالعه‌ی تغییرات مکانی و زمانی فنولوژی پوشش گیاهی به طیف گسترده‌ای از حوزه‌های کاربردی مانند تجزیه‌وتحلیل تغییرات آب‌وهوا (کلیلند و همکاران[۲]، ۲۰۰۷: ۲)، پایش کشاورزی (دانکان و همکاران[۳]، ۲۰۱۵: ۱۳) و پژوهش‌های زیست‌محیطی (پتورلی 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 آب‌وهوایی شده است (وو و همکاران[۶]، ۲۰۱۶: ۲). دیده‌بانی فنولوژی گیاهان به‌صورت سنتی، استفاده از مشاهدات مکرر بصری 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) سنجش‌ازدور ماهواره‌ای (میلاس و همکاران[۸]، ۲۰۱۳: ۱) جمع‌آوری می‌شود. دانه کلزا با تولید ۱۶ درصد روغن 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 به‌صورت کدبندی اولین بار توسط هارپر و برکنکامپ[۱۱] (۶۷۵:۱۹۷۵) در کانادا صورت گرفت. معروف‌ترین و معتبرترین روش کدگذاری مراحل رشد و نمو کلزا توسط انجمن کلزای کانادا 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، گلدهی و رسیدن (خوشحال و براتیان، ۱۳۸۸: ۲).

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

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

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

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 رایج‌ترین شاخص‌های گیاهی برای پایش فنولوژی گیاهان می‌باشند (وو و همکاران[۴]، ۲۰۱۷: ۲). شاخص EVI به ساختار تاج‌پوشش[۵] گیاه مانند سطح برگ، نوع تاج‌پوشش 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 نیم‌خشک پویائی گسترده‌تری دارد (هیوت و همکاران[۶]، ۲۰۰۲: ۱۶).

تبدیل 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 وقایع فنولوژی بر اساس داده‌های سنجش‌ازدور توسعه‌یافته است. بیشتر روش‌ها برای تشخیص وقایع 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 وقایع فنولوژیک بر پایه مجموعه‌ای از قوانین و روابط. مرحله اول شامل ساخت سری زمانی هر شاخص بر پایه داده‌های سنجش‌ازدور و فیلتر کردن داده‌ها برای کاهش اختلال و تولید سری زمانی هموارتر است. در مرحله دوم، برای تمایز وقایع فنولوژیکی، سری زمانی تولید شده بر پایه قوانین معینی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. رایج‌ترین روش‌ها برای این مرحله، روش آستانه، روش نرخ تغییر انحنا، روش تجزیه‌وتحلیل هارمونیک، روش میانگین متحرک و روش حداکثر 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 به‌عنوان آستانه برای شروع فصل[۱۱] (SOS) در نظر گرفته است، وایت و نمانی[۱۲] (۲۰۰۶: ۳) آستانه NDVI را میانگین حداقل و حداکثر مقدار NDVI محاسبه کردند که به‌طورکلی مطابق با زمان حداکثر 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

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

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 به‌عنوان دوره‌هایی تعریف می‌شوند که رشد پوشش گیاهی به‌سرعت افزایش یا کاهش می‌یابد (یو و همکاران[۲]، ۲۰۱۳: ۳). دش و همکاران[۳] (۲۰۱۰: ۴) با استفاده از مشتق‌گیری SOS را نقطه تحدب منحنی در شروع چرخه رشد گیاه و EOS را نقطه تقعر منحنی در پایان چرخه رشد گیاه می‌دانند. روش آستانه به‌طور خاص شروع فعالیت فتوسنتزی در بهار را مشخص می‌کند درحالی‌که 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 متمرکز 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 سری‌زمانی 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 فنولوژی‌های دیده‌بانی شده می‌باشد.

## روش تحقیق

### معرفی محدوده موردمطالعه

مزرعه 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 ″۵۵ ′۱۲ °۵۱ و ″۱۴ ′۱۳ °۵۱ درجه شرقی و عرض‌های ″۱۶ ′۵۳ °۳۳ و ″۵۸ ′۵۵ °۳۳ درجه شمالی قرار دارد شکل (۱).




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

[۲۷]- End of Season
[۲۸]- You et al
[۲۹]- Dash et al

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

## داده و روش کار

### داده‌های فنولوژیکی گیاه کلزا

در این پژوهش مراحل فنولوژی گیاه کلزا در مزرعه موردمطالعه به‌صورت 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 لندست ۸(سنجنده OLI)

تصاویر ماهواره لندست ۸ و سنجنده 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[۹]، ۲۰۱۸: ۲؛ سنت پیتر و همکاران[۱۰]، ۲۰۱۸: 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
۱- Vrieling et al
۲- St. Peter et al

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

که شامل ۶۸ عدد تصویر می‌باشد، در تجزیه‌وتحلیل مورداستفاده قرار گرفتند. از تصاویر جمع‌آوری‌شده، 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 تعدیل شده[۲] (GCC) بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد؛

$$GCC = G / (R+ G + B)$$ 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 (هافکنز و همکاران[۳]، ۲۰۱۹: ۳). برای کاهش اختلال، داده‌های پرت شناسایی و حذف شدند، سپس میانگین مقادیر GCC محاسبه شد.

**شاخص‌های گیاهی[۴] (VI)**

**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، ۶:۱۳۹۶). این شاخص بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

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

در رابطه (۲) $\rho_{nir}$ بازتاب[۵] در ناحیه فروسرخ نزدیک و $\rho_{red}$ 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 مورداستفاده دارند با مقدار نزدیک به صفر دیده می‌شوند ( توکر[۶]، ۱۹۷۸: ۱۳۰؛ فرخزاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۴).

**شاخص بارزسازی شده پوشش گیاهی (EVI)**

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.

---

۳- Matlab
۴-Green chromatic Coordination, GCC
۵-Hufkens et al
۶-Vegetation Index, VI
۷- Reflectance
۸- Tucker

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

$$EVI= G (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L$$ رابطه (۳)

که در آن L فاکتور تنظیم خاک، $C_1$ و $C_2$ ضرایبی هستند که برای تصحیح اثرات پخش آئروسل‌ها استفاده می‌شوند. $\rho_{blue}$، $\rho_{red}$، $\rho_{nir}$ بیانگر بازتاب در طول‌موج‌های به ترتیب آبی (۰/۵۲ – ۰/۴۵ میکرومتر)، قرمز (۰/۷ – ۰/۶ میکرومتر) و فروسرخ (۱/۱ – ۰/۷ میکرومتر) می‌باشد. به‌طورمعمول، G=۲/۵، $C_1$=۶ ، $C_2$=۷/۵ و L=۱ می‌باشد (ماتسوشیتا و همکاران[۱]، ۲۰۰۷: ۳؛ تارنمای سازمان زمین‌شناسی آمریکا[۲]).

**تبدیل تسلدکپ (TCT)**

تبدیل تسلدکپ یک ترکیب خطی از باندهای ماهواره (در ماهواره لندست ۸ از باند ۲ تا باند ۷) است.
سه شاخص به‌طورمعمول در تسلدکپ استفاده می‌شود. شاخص اول، روشنایی[۳] است و مقدار روشنایی خاک را پایش می‌کند. شاخص دوم، سبزینگی[۴] است و فتوسنتز فعال گیاهی برای استخراج شاخص سبزینگی استفاده می‌شود. شاخص سوم، معمولاً به‌عنوان 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: ۴):

$$Tas\ i = (C_2 \times band_2) + (C_3 \times band_3) + (C_4 \times band_4) + (C_5 \times band_5) + (C_6 \times band_6) + (C_7 \times band_7)$$ رابطه (۴)

که در آن Tas 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 | ۰/۷۲۷۶ | ۰/۰۷۱۳ | -۰/۱۶۰۸ |
| رطوبت | ۰/۱۵۱۱ | ۰/۱۹۷۳ | ۰/۳۲۸۳ | ۰/۳۴۰۷ | -۰/۷۱۱۷ | -۰/۴۵۵۹ |

منبع: (بیگ و همکاران[۷]، ۲۰۱۴: ۶)

۱- Matsushita et al
۲-https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-enhanced-vegetation-index?qt science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
۳- Brightness
۴- Greenness
۵- wetness
۶- Samarawickrama et al
۱- Baig et al

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

**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 به‌عنوان زمین زراعی محسوب شدند و پیکسل‌های مساوی یا کمتر از ۵۰ در صد به‌عنوان زمین بایر محسوب شدند و حذف شدند (یو و همکاران[۲]، ۲۰۱۳: ۷). در مرحله بعد، برای ساخت سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی، داده‌های پرت با استفاده از فیلتر ساویتزکی - گولی[۳] 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 (جاجرمی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۸).

چرخه سالانه فنولوژی گیاهان، بر پایه سری‌های زمانی داده‌های سنجش‌ازدور، از چهار مرحله کلیدی انتقالی استنباط می‌شوند و بر اساس آن فازهای مهم فنولوژیکی گیاهان مشخص می‌شوند. زمان‌های کلیدی عبارت‌اند از (۱) سبزینگی[۴]: زمان شروع فعالیت‌های فتوسنتزی؛ (۲) بلوغ[۵]: زمانی که در آن سطح سبز گیاه و فعالیت‌های فتوسنتزی به حداکثر می‌رسد؛ (۳) پیری[۶]: زمانی که در آن فعالیت‌های فتوسنتزی و سطح برگ سبز شروع به کاهش سریع می‌کند؛ (۴) رکود[۷]: زمانی که در آن فعالیت‌های فیزیولوژیکی نزدیک صفر می‌شود (ژانگ و همکاران[۸]، ۲۰۰۳: ۲). مراحل فنولوژیکی گیاه با بررسی بصری (ژانگ و همکاران[۹]، ۲۰۰۳: ۳) و با لحاظ کردن کاهش و یا افزایش مقدار شاخص‌های گیاهی به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای در زمان چرخه زندگی گیاه برآورد می‌شود (وانگ و همکاران[۱۰]، ۲۰۱۵: ۶). ازآنجایی‌که بیشترین مقدار فعالیت گیاه معمولاً در حدود بلوغ روی می‌دهد، قابل‌قبول است که زمان بیشینه مقدار شاخص گیاهی در منحنی را به‌عنوان 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 فتوسنتزی، 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 قابل‌توجهی نداشته باشد.

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

---

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

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

کلزا در منطقه موردپژوهش در اواخر تابستان و اوایل پاییز کشت و در اواخر 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 فتوسنتزی 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.

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

که در آن VI مقدار شاخص گیاهی، $VI_{min}$ و $VI_{max}$ کمینه و بیشینه مقدار شاخص گیاهی ثبت‌شده 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.

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

که در آن $VI_{RC}$ مقدار نرخ تغییر در زمان (i) شاخص گیاهی، VI(i) مقدار 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 به‌عنوان SOS تعیین می‌شود. همچنین کمینه مقدار نرخ تغییر شاخص گیاهی مشخص و سپس روز متناظر با آن بعلاوه یک (i + 1) را به‌عنوان EOS تعیین می‌شود (هان و همکاران[۳]، 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 به‌عنوان SOS و تقعر منحنی در پایان چرخه زندگی گیاه به‌عنوان EOS محسوب می‌شود (بوت و همکاران[۴]، ۲۰۱۱: ۳).

$$d(VI) / d(t) = VI(i) -VI(i-1) / t(i) – t(i-1)$$ 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.

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

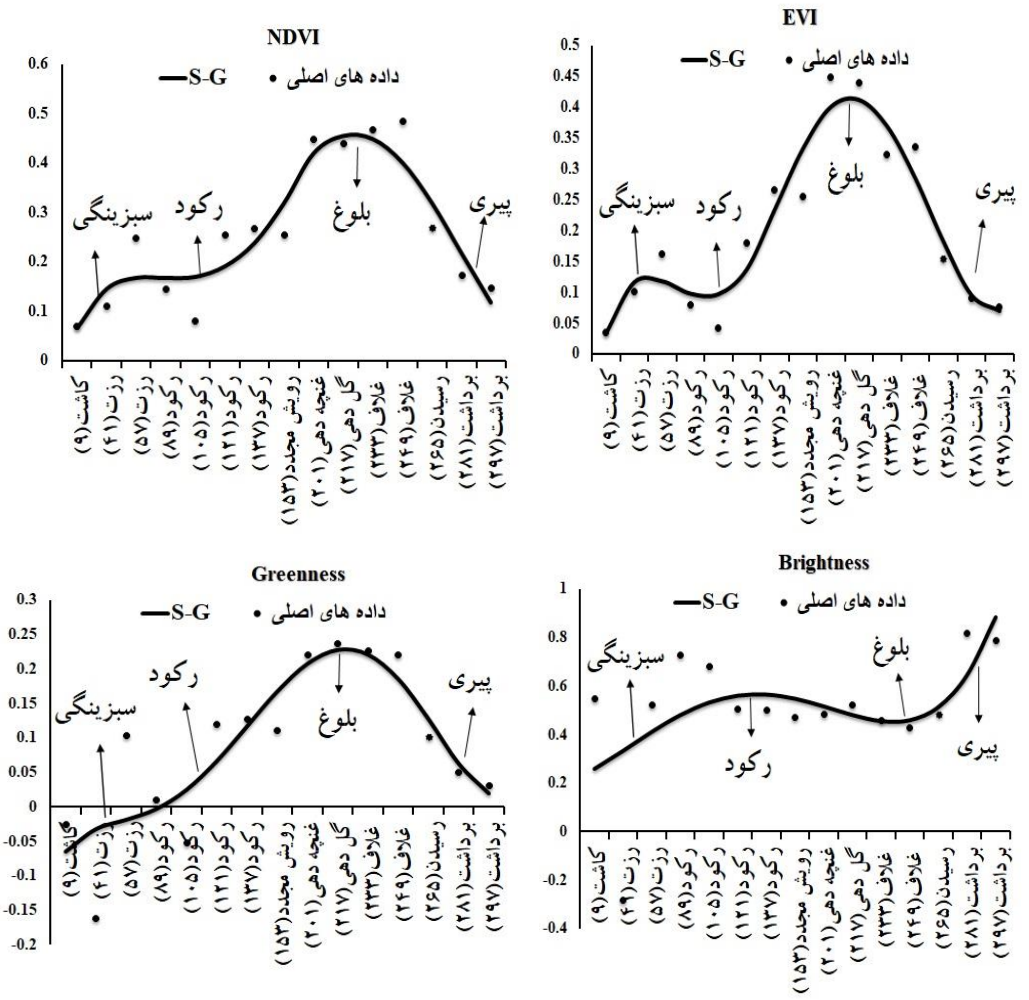
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

## نتایج

### فنولوژی گیاه کلزا با بررسی بصری سری زمانی شاخص‌های گیاهی سنجش‌ازدور 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 سبزینگی در همه منحنی، به‌صورت صعودی قابل‌تشخیص است. در منحنی Greenness مقادیر منفی بدین علت است که مزرعه دارای پوشش گیاهی بسیار کمی می‌باشد. مرحله رکود در منحنی NDVI با شیب تقریباً نزدیک به صفر نمایش داده شده است و در منحنی EVI شیب منفی پیدا می‌کند. مرحله رکود در منحنی Brightness متفاوت با دیگر شاخص‌ها، به‌صورت قله موج نشان داده شده است. در منحنی Greenness مرحله رکود برخلاف دیگر منحنی شاخص‌ها، شیب مثبت است. به دلیل وجود پوشش گیاهی سبزرنگ کلزا در مزرعه، با وجود توقف فعالیت‌های فتوسنتزی، شیب منحنی همچنان مثبت است. مرحله بلوغ که حداکثر فعالیت فتوسنتزی را نشان می‌دهد، نیز در هر چهار منحنی به‌خوبی قابل‌تشخیص است، البته در منحنی Brightness این مرحله بر خلاف سه منحنی دیگر به‌صورت قعر نمایش داده شده است. مرحله پیری، در منحنی‌های NDVI، EVI، Greenness بعد از مرحله بلوغ با شیب منفی مشخص است. مرحله پیری در منحنی Brightness با شیب مثبت نمایش داده شده است. برای شاخص‌های گیاهی سنجش‌ازدور، مقدار دامنه، انحراف استاندارد و واریانس در جدول (۲) و میانگین عددی شاخص‌های گیاهی، برای مراحل چهارگانه فنولوژی سنجش‌ازدور در جدول (۳)، نمایش داده شده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]




**شکل (۳). منحنی هموار شده شاخص‌های گیاهی سنجش‌ازدور توسط مدل S-G و مراحل اصلی فنولوژی سنجش‌ازدور 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 مورداستفاده**

| شاخص | دامنه | انحراف 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 |

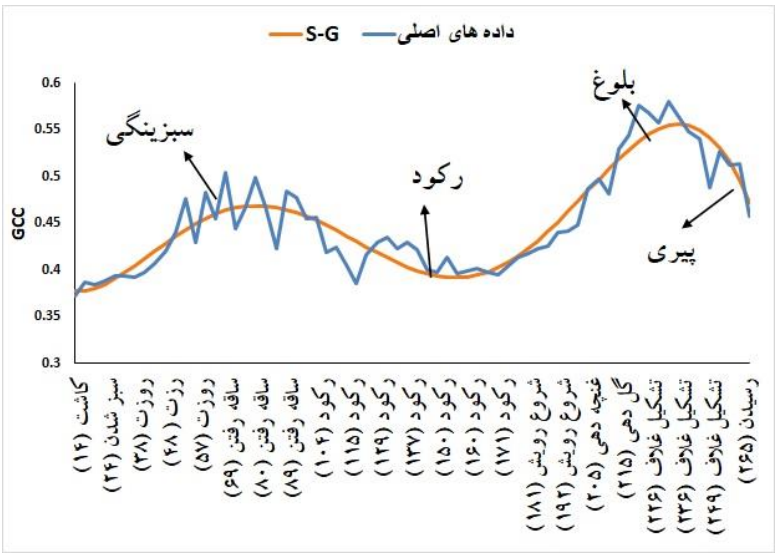
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

جدول (۳). میانگین عددی شاخص‌های استفاده‌شده در مراحل چهارگانه فنولوژی سنجش‌ازدور

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

**فنولوژی 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 فنولوژیکی 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 فنولوژی‌های مشاهداتی گیاه کلزا مطابقت بسیار زیادی دارد. مرحله سبزینگی شامل مراحل کاشت، سبز شدن، روزت و ساقه رفتن و با شیب مثبت قابل‌تشخیص است. مرحله رکود نیز هم‌زمان با شیب نزولی منحنی شروع می‌شود و در زمان مثبت شدن دوباره شیب، خاتمه می‌یابد. مرحله بلوغ که بیشترین فعالیت‌های فتوسنتزی رخ می‌دهد با مراحل گل‌دهی و تشکیل غلاف مطابقت دارد. مرحله پیری با شیب منفی در زمان رسیدن محصول کلزا و بعد از مرحله بلوغ رخ داده است. برآورد مناسب شاخص GCC از مراحل فنولوژی، به خاطر فراوانی تصاویر دیجیتال تهیه‌شده از مزرعه و کمتر بودن تأثیر عوامل محیطی مانند رطوبت اتمسفر و ابرناکی می‌باشد.

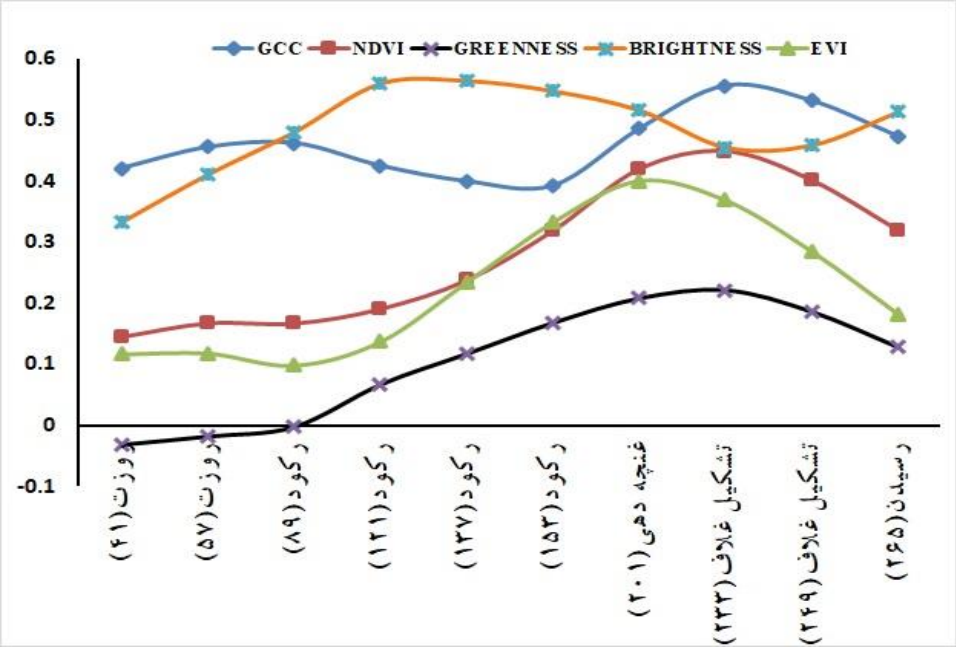



شکل (۴). منحنی هموار شده سری زمانی شاخص GCC توسط مدل S-G و فنولوژی‌های دیدبانی شده کلزا

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

**مقایسه شاخص‌های گیاهی سنجش‌ازدور با شاخص GCC حاصل از تصاویر دوربین دیجیتال**

برای مقایسه شاخص GCC، با سایر شاخص‌های سنجش‌ازدور 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 سنجش‌ازدور از آزمون همبستگی پیرسون (r) با سطح معنی‌داری P< ۰/۰۵ در مراحل مختلف فنولوژی استفاده گردید (جدول ۴). در این آزمون ابتدا مقدار سطح معنی‌داری دو متغیر بررسی می‌شود، اگر سطح معنی‌داری کمتر از مقدار مفروض باشد به این معنی است که بین دو متغیر همبستگی وجود دارد، سپس شدت و جهت همبستگی موردبررسی 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 مثبت و شدت همبستگی به‌دست‌آمده بسیار قوی می‌باشد. در مراحل سبزینگی و رکود شاخص GCC با شاخص Brightness دارای همبستگی می‌باشد و جهت رابطه بین دو متغیر مثبت و شدت همبستگی به‌دست‌آمده بسیار قوی (لیانگ و همکاران[۱]، ۲۰۱۹: ۹) می‌باشد.




**شکل (۵). منحنی هموار شده سری زمانی شاخص GCC و شاخص‌های ماهواره‌ای سنجش‌ازدور - 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)**

۱- Liang et al

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

**جدول (۴). ضریب همبستگی پیرسون (r) و سطح معنی‌داری (P) بین شاخص GCC و شاخص‌های سنجش‌ازدور ماهواره‌ای در مراحل مختلف فنولوژی**

| | NDVI | | EVI | | Brightness | | Greenness | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | r | P | r | P | r | P | r | P |
| سبزینگی | ۰/۷۳۳ | ۰/۴۷۶ | ۰/۳۳۷ | ۰/۷۸۱ | ۰/۹۶۷ | ۰/۰۵۰ | ۰/۹۵۹ | ۰/۱۸۲ |
| رکود | -۰/۹۲۶ | ۰/۰۷۴ | -۰/۸۸۱ | ۰/۱۱۹ | ۰/۹۸۱ | ۰/۰۱۹ | -۰/۹۰۸ | ۰/۰۹۲ |
| بلوغ | ۰/۹۹۲ | ۰/۰۴۸ | ۰/۳۸۹ | ۰/۷۴۶ | -۰/۴۵۸ | ۰/۶۹۷ | ۰/۹۰۶ | ۰/۲۷۹ |
| پیری | ۰/۹۹۷ | ۰/۰۴۱ | ۰/۹۸۶ | ۰/۱۰۸ | -۰/۹۷۱ | ۰/۱۵۵ | ۰/۹۹۶ | ۰/۰۵۶ |

**استخراج پارامترهای فنولوژیکی کلزا بر اساس روابط**

) در روز ۱۵۳ و پایان فصل SOS بر اساس فنولوژی‌های دیده‌بانی شده در مزرعه کلزای موردمطالعه، شروع فصل ( به‌دست‌آمده از روش‌های EOS و SOS) در روز ۲۵۰ بعد از کاشت کلزا روی می‌دهند. اختلاف بین EOS( . حاصل از فنولوژی دیده‌بانی، در جدول (۵) قید شده استEOS و SOSمورداستفاده در این پژوهش (شکل ۶) با فراهم کرده است. SOS توسط روش مشتق اول، با مقدار اختلاف ۵ روز بهترین برآورد را برای Brightnessشاخص با روش نرخ تغییر، بهترین برآورد را دارند Brightnessبا روش مشتق اول و EVI شاخص‌های EOSدر برآورد با میانگین اختلاف ۱۶ روز و روش مشتق Brightness شاخص SOS(بدون اختلاف). به‌صورت میانگین، در برآورد با میانگین اختلاف ۷ روز EVI شاخص EOSاول با میانگین اختلاف ۱۸ روز بهترین عملکرد را داشته‌اند. در برآورد شاخص‌های گیاهی SOSو روش نرخ تغییر با میانگین اختلاف ۸ روز بهترین عملکرد را داشته‌اند. تمام برآوردهای دیده‌بانی شده حالت زودرس دارند. میزان میانگین خطای شاخص‌های گیاهی SOSسنجش‌ازدور نسبت به خطای SOS نسبت به EOSسنجش‌ازدور مورداستفاده 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 برحسب روز (علامت منفی بیان‌کننده زودرس بودن و علامت مثبت بیان‌کننده دیررس بودنSOS/EOS می‌باشد و مفهوم ریاضی ندارند، در نتیجه برای محاسبه میانگین از قدر مطلق اعداد استفاده شد).**

| | | NDVI | EVI | Greenness | Brightness | میانگین |
|---|---|---|---|---|---|---|
| شروع فصل SOS | آستانه نسبی | -۷ | -۱۶ | -۲۸ | -۲۵ | ۱۹ |
| | نرخ تغییر | -۴۹ | -۴۹ | -۱۶ | -۱۸ | ۳۳ |
| | مشتق اول | -۲۱ | -۱۵ | -۳۱ | -۵ | ۱۸ |
| | میانگین | ۲۵/۶ | ۲۶/۶ | ۲۵ | ۱۶ | - |
| پایان فصل EOS | آستانه نسبی | ۲۴ | ۶ | ۲۶ | ۲۲ | ۱۹/۵ |
| | نرخ تغییر | ۱۴ | -۱۵ | -۳ | ۰ | ۸ |
| | مشتق اول | ۲۵ | ۰ | ۱۵ | ۱۵ | ۱۳/۵ |
| | میانگین | ۲۱ | ۷ | ۱۴/۶ | ۱۲/۳ | - |

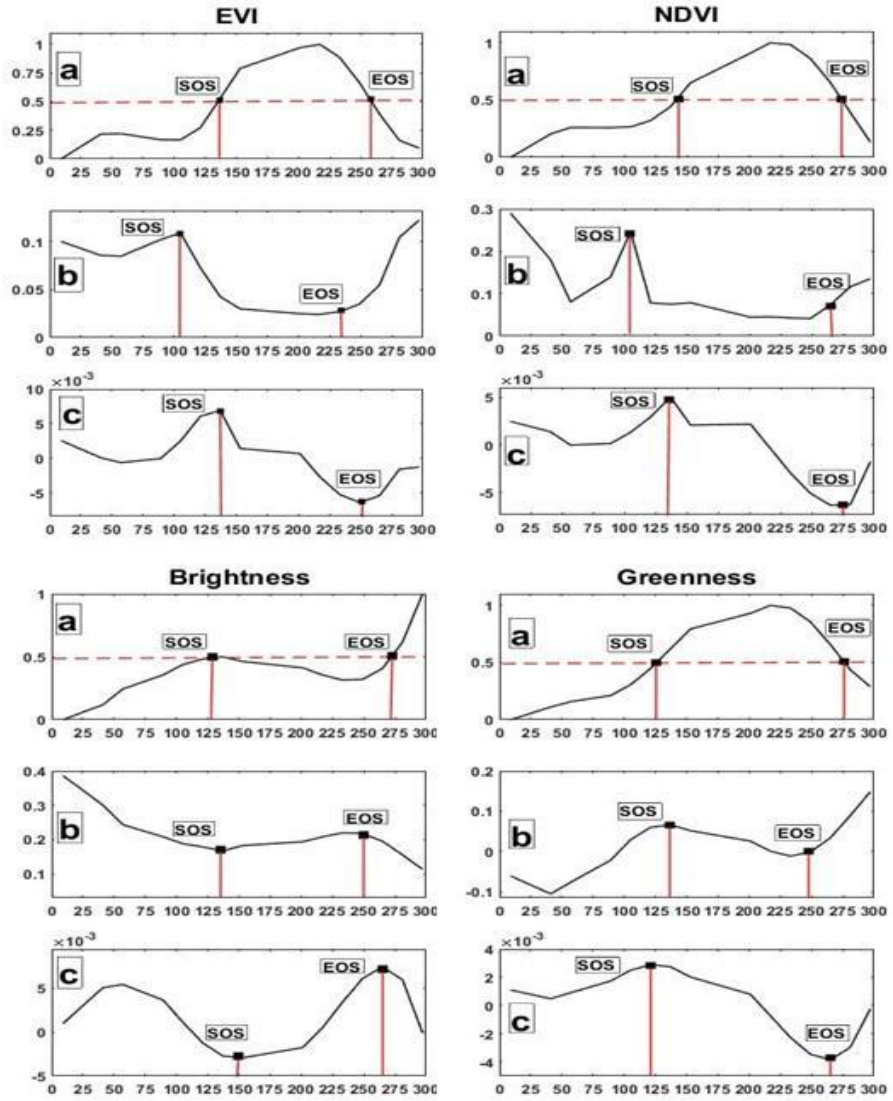
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

در جدول (۶) همبستگی بین شاخص‌های گیاهی سنجش‌ازدور 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 = ۰/۹۹، P =۰/۰۲) و شاخص Greenness و شاخص Brightness (r = ۰/۹۹، P =۰/۰۴) دارای همبستگی قوی می‌باشند.

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

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NDVI | EVI | Brightness | Greenness |
| شروع فصل SOS | NDVI | r | * | ۰/۹۳ | -۰/۱۶ | -۰/۸۶ |
| | | P | * | ۰/۲۲ | ۰/۸۹ | ۰/۳۳ |
| | EVI | r | ۰/۹۳ | * | ۰/۱۹ | -۰/۹۸ |
| | | P | ۰/۲۲ | * | ۰/۸۷ | ۰/۱۰ |
| | Brightness | r | -۰/۱۶ | ۰/۱۹ | * | -۰/۳۵ |
| | | P | ۰/۸۹ | ۰/۸۷ | * | ۰/۷۷ |
| | Greenness | r | -۰/۸۶ | -۰/۹۸ | -۰/۳۵ | * |
| | | P | ۰/۳۳ | ۰/۱۰ | ۰/۷۷ | * |
| پایان فصل EOS | NDVI | r | ❋ | ۰/۹۳ | ۰/۹۲ | ۰/۸۹ |
| | | P | ❋ | ۰/۲۳ | ۰/۲۵ | ۰/۲۹ |
| | EVI | r | ۰/۹۳ | ❋ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ |
| | | P | ۰/۲۳ | ❋ | ۰/۰۲ | ۰/۰۶ |
| | Brightness | r | ۰/۹۲ | ۰/۹۹ | ❋ | ۰/۹۹ |
| | | P | ۰/۲۵ | ۰/۰۲ | ❋ | ۰/۰۴ |
| | Greenness | r | ۰/۸۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ❋ |
| | | P | ۰/۲۹ | ۰/۰۶ | ۰/۰۴ | ❋ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]




**شکل (۶). استخراج مراحل فنولوژی (SOS/EOS) گیاه کلزا در مزرعه موردمطالعه- (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 S-G 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. تجزیه‌وتحلیل‌های 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

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

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 طاوسی (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 به‌صورت قله و مرحله بلوغ به‌صورت قعر نمایش داده می‌شود. منحنی شاخص Greenness، قادر به تشخیص مرحله رکود نیست. برآورد 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 برآورد EOS، شاخص EVI و شاخص Brightness بدون اختلاف نسبت به داده‌های دیده‌بانی شده بهترین عملکرد را دارند. در مجموع، شاخص‌های گیاهی سنجش‌ازدور، در برآورد EOS خطای کمتری نسبت به برآورد SOS دارند، همچنین همه برآوردهای SOS حاصل از شاخص‌های گیاهی نسبت به SOS حاصل از مشاهدات میدانی، آغازی زودرس دارند. نتایج به‌دست‌آمده 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 SOS مشاهدات میدانی اتفاق افتاده است. تحقیق سنت پیتر و همکاران (۲۰۱۸) همچنین تأیید می‌کند که شاخص‌های گیاهی مورداستفاده در تحقیق، EOS را دیررس برآورد می‌کند. شبیه به پژوهش هافکنز 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 هافکنز 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 ارزان‌قیمت 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 برآورد فنولوژی سنجش‌ازدور 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

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

**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 موردی: (شهرستان اردبیل)**، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹ (۵۳): ۱۹۵-۲۱۵.

جاجرمی امیر؛ تقی زاده مسعود؛ سازگارنیا آمنه؛ بهزاد خلیل. (۱۳۹۵). **به‌کارگیری 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 موردی شهرکرد)**، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۰: ۴۴-۳۵.

فرخزاده بهنوش؛ منصوری شهروز؛ سپهری عادل. (۱۳۹۶). **تعیین میزان همبستگی بین شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI با شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI (مطالعه موردی: مراتع دشتی استان گلستان)**، هواشناسی کشاورزی، ۵(۲): ۶۵- ۵۶.

فیروزی فاطمه؛ طاوسی تقی. (۱۳۹۷). **بررسی حساسیت دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI به خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطالعه موردی: 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 لندست (مطالعه موردی: ارس‌زارهای شرق پارک ملی گلستان و منطقه حفاظت‌شده قرخود)**، فصلنامه اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۹ (۱): ۹۷-۹۱.

مباشری محمدرضا؛ رنجبر سمیرا. (۱۳۹۶). **تشخیص مزارع آلوده به بیماری زنگ گندم با استفاده از تصاویر لندست**، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷ (۴۴): ۷-۲۴.

میری ناصح؛ درویش‌صفت علی‌اصغر؛ ضرغام نصرت اله؛ شاکری زاهد.(۱۳۹۶). **برآورد شاخص سطح برگ در جنگل‌های زاگرس با داده‌های ماهواره لندست 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.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

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 Databas,** 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.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]

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.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.10.3 ]
[ DOI: 10.52547/jgs.24.72.231 ]