

پتانسیل سنجی شاخص‌های طیفی منتج از سنجنده‌های OLI و سنتینل-2 جهت برآورد پوشش گیاهی در مراحل مختلف رشد کلزا

نعیم لویمی^{۱*}، اسداله اکرم^۲، نیکروز باقری^۳، علی حاج‌احمد^۴

۱. مربی پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران (n1584m@yahoo.com)
۲. دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (aakram@ut.ac.ir)
۳. استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (nikroozbagheri@yahoo.com.au)
۴. استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (hajiahmad@ut.ac.ir)

چکیده

کلزا با توجه به وجود گل‌های زرد آن دارای رنگ متفاوتی نسبت به سایر محصولات زراعی است، لذا تشخیص شاخص‌های طیفی مرتبط با آن ضروری به نظر می‌رسد. این تحقیق در سال زراعی ۹۵-۹۶ با ارزیابی تصاویر سنجنده‌های OLI و سنتینل-2 در مراحل قبل، ابتدا و اوج گل‌دهی و نیز رسیدگی سبز و خشک مزارع کلزا صورت گرفت. پس از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تعدادی شاخص‌های طیفی استخراج شد و تغییرات شاخص‌های آماری آن‌ها محاسبه و ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که تغییرات میانگین شاخص‌های طیفی در مراحل مختلف رشد در هر دو سنجنده، از روند کاملاً مشابه تبعیت می‌کند. همچنین روند تغییرات انحراف معیار و ضریب تغییرات شاخص‌های طیفی در مراحل رشد مختلف در دو سنجنده، با وجود اختلاف کم، شباهت زیادی دارد. بر اساس نتایج تحلیل‌ها، بهترین زمان جهت برآورد پوشش گیاهی (زیست توده) توسط هر شاخص طیفی، از میان مراحل مختلف رشد، کسب حداکثر آن شاخص در آن زمان تشخیص داده شد. همچنین در زمان مورد نظر، پتانسیل سنجی شاخص‌های طیفی جهت برآورد پوشش گیاهی، بر اساس داشتن ضریب تغییرات بیشتر ارزیابی گردید. بر این اساس بهترین زمان جهت برآورد پوشش گیاهی توسط شاخص‌های طیفی گروه NDVI (شامل NDVI، EVI، EVI2، GARI، GNDVI، MTVI2 و RVI)، مرحله رسیدگی سبز، و برای شاخص‌های طیفی گروه NDVI (شامل NDVI، BNDVI، NDVI و MTVI1) مرحله اوج گل‌دهی به‌دقت آمد. همچنین از میان شاخص‌های گروه NDVI در مرحله رسیدگی سبز، RVI و EVI، و از میان شاخص‌های گروه NDVI در مرحله اوج گل‌دهی، MTVI1 و NDVI، دارای پتانسیل بیشتری برای برآورد پوشش گیاهی تشخیص داده شدند.

کلمات کلیدی: کلزا، مراحل رشد، شاخص‌های طیفی، سنجنده OLI، سنجنده سنتینل-2

*نویسنده مسئول: n1584m@yahoo.com

پتانسیل سنجی شاخص‌های طیفی منتج از سنجنده‌های OLI و سنتینل-2 جهت برآورد پوشش گیاهی در مراحل مختلف رشد کلزا

مقدمه

طی چهار دهه اخیر کشت جهانی کلزا به سرعت رشد کرده و از رتبه ششم محصولات روغن گیاهی به رتبه دوم، بعد از سویا، ارتقاء یافته است؛ از لحاظ روغن گیاهی نیز کلزا بعد از سویا و نخل پالم سوم می‌باشد [9]. دانه کلزا دارای میزان روغن بالا و نیز کنجاله آن غنی از پروتئین می‌باشد به طوری که دانه کلزا 38-45 درصد روغن، و کنجاله آن 34-38 درصد پروتئین دارد [9]. مصرف سرانه روغن خوراکی کشور حدود 16 کیلوگرم برآورده شده و نیاز داخلی حدود یک میلیون تن می‌باشد که بیش از 91 درصد آن از خارج وارد می‌شود [1]. در حال حاضر تعداد محدودی دانه‌های روغنی در کشور ما مورد توجه قرار می‌گیرد که از جمله آن‌ها و بر اساس بیشترین سطح زیر کشت می‌توان به سویا، آفتابگردان، کلزا و گلرنگ اشاره نمود [3]. توسعه کشت سویا، آفتابگردان، کنجد و گلرنگ در کشور ما با مشکلاتی روبرو است [1]. از این رو وزارت جهاد کشاورزی برای تأمین نیاز داخلی روغن خوراکی کشور برنامه حمایتی برای افزایش توسعه کشت کلزا در کشور را تدوین نموده است که باعث افزایش سطح زیر کشت این محصول در سال‌های اخیر شده است [4].

شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی شامل روابط ریاضی مختلف هستند که برای تحلیل اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای جهت تعیین صفات و ویژگی‌های گیاه همچون میزان زیست توده و یا عملکرد، مورد استفاده قرار می‌گیرند [6]. در واقع هر یک از این شاخص‌ها با ترکیب باندهای طیفی متفاوت برای تخمین متغیرهای بیوفیزیکی گیاهی به کار می‌روند. اطلاعات باندهای مختلف سنجنده‌ها در قالب شاخص‌های طیفی و نسبت‌های طیفی نقش عمده‌ای در این زمینه ایفا می‌کنند [27]. مطالعات زیادی به ارتباط بین داده‌های طیفی ناشی از محصول و صفات متعدد بیولوژیکی و فیزیولوژیکی دست یافته‌اند [17، 20، 25، 34 و 36]. در مورد کاربردهای کلزا پژوهشگران زیادی برای تعیین ویژگی‌های زراعی آن همچون زیست توده [24] و عملکرد [33]، و نیز خواص دیگر آن همچون روغن و پروتئین [28]، کلروفیل برگ‌ها [15] و میزان پروتئین و اسید آمینه [26]، از روش‌های طیفی استفاده کردند.

امروزه یکی از مهم‌ترین موضوعات سنجش از دور، ارزیابی شاخص‌های طیفی برحسب میزان حساسیت آن‌ها به ویژگی‌های بیوفیزیکی گیاهان و عوامل مؤثر در بازتاب‌های طیفی پوشش محصول است [2]. در دهه‌های اخیر با توجه به این حساسیت‌ها، و به منظور بهبود شاخص‌های طیفی و ارائه شاخص‌های جدید برای اصلاح اثرات خاک و اتمسفر، تلاش‌های زیادی صورت گرفته است [2].

مطالعه 4 ساله روی 150 ژرم پلاس کلزا به منظور بررسی امکان به کارگیری حسگر سبزینه‌سنج¹ دستی برای تشخیص ژرم پلاس‌های با عملکرد بالا بر اساس پوشش گیاهی محصول در طول دوره رشد، نشان داد که بالاترین میزان همبستگی بین عملکرد و شاخص NDVI در زمان 210-320 روز رشد، با ضریب همبستگی (R) در محدوده 0/7 است [13]. بر اساس طیف سنجی زمینی (نصب طیف سنج بر پلاتفرم متحرک) برای اولین بار برای برآورد عملکرد آن شاخص جدیدی بنام NDYI تعریف شد [33]. این شاخص در سطح مزارع و به وسیله تصاویر سنجنده مودیس نیز ارزیابی شد. در تمام ارزیابی‌های صورت گرفته، در پلات‌ها با کمک طیف سنج و نیز در مزارع با به کارگیری تصاویر مودیس، این شاخص

1. GreenSeeker

نتایج بهتری کسب کرد. اهمیت این شاخص جدید به این دلیل است که تمام مطالعات قبل صورت گرفته برای سنجش محصول کلزا توسط سنجنده‌های ماهواره‌ها، مقادیر رابطه پایینی بین عملکرد و شاخص‌های طیفی گیاهی معمول همچون NDVI را گزارش داده بودند. این مسئله ناشی از تفاوت ظاهر محصول کلزا با محصولات دیگر می‌باشد که پوشش گیاهی کلزا از میانه رشد به بعد به رنگ زرد تغییر می‌کند درحالی‌که پوشش گیاهی محصولات دیگر تا قبل از رسیدگی کامل، سبز می‌باشد. به همین دلیل مطالعات قبلی علت ارتباط کم عملکرد و شاخص NDVI را ناشی از رنگ پوشش گیاهی زرد گل‌های کلزا عنوان کردند [10]. در مطالعه مذکور [33] در مورد اهمیت باند آبی در پوشش گیاهی زرد کلزا شرح کاملی آمده است. بدین شکل که رنگ زرد حاصل جمع بازتاب سبز و قرمز است. گلبرگ‌های کلزا رنگ آبی را جذب کرده و از رنگ‌های مرئی فقط سبز و قرمز بازتاب می‌شود که به شکل زرد مشاهده می‌شود. در واقع تفاوت شاخص NDVI با سایر شاخص‌های معمول، در کم شدن باند Blue در رابطه آن است.

در مقایسه شاخص‌های طیفی از ماهواره‌های لندست 8، سنجنده OLI، و لندست 7، سنجنده ETM+، نتیجه گرفته شد که به وسیله سنجنده OLI پارامترهای بیوفیزیکی از جمله زیست توده خشک و تر بهتر تخمین می‌شود. این مطالعه روی محصولات گندم، جو و کلزا صورت گرفت [7].

به دلیل عمر کوتاه سنجنده سنتینل-2، مطالعات محدودی در زمینه پایش محصولات کشاورزی از جمله پیش‌بینی عملکرد محصولات توسط آن صورت گرفته شده است. ارزیابی 19 مزرعه ذرت در کشورهای برزیل و آمریکا به وسیله این سنجنده نشان داد که ضریب تبیین (R^2) عملکرد این محصول و شاخص NDVI در دو استان مختلف مورد مطالعه 0/68 و 0/59، و در مجموع کل مناطق مورد مطالعه 0/32 بوده است [31].

یکی از کارهای بنیادی، پتانسیل سنجی شاخص‌ها با توجه به نوع پدیده و صفات مورد مطالعه است. در این کار، قبل از نمونه‌برداری مزرعه‌ای یا آزمایشگاهی و صرف هزینه و زمان، شاخص‌های طیفی که احتمال ارتباط بیشتری با پدیده و صفت مورد نظر دارند، شناسایی می‌شوند تا در مطالعات بعدی تمرکز اصلی روی آن‌ها صورت پذیرد. همچنین با توجه به ارتباط قوی بین بازتاب پوشش گیاهی محصولات با صفاتی همچون عملکرد و زیست توده، تحلیل شاخص‌های طیفی برای تخمین میزان این صفات برای محصولات مختلف بسیار مفید می‌باشد.

در کل مطالعات کمی در مورد پتانسیل و حساسیت شاخص‌های طیفی منتج از پوشش گیاهی کلزا در مراحل مختلف رشد آن انجام شده است. تحقیقات محدود صورت گرفته در مورد صفات کلزا همچون زیست توده و عملکرد نیز اکثراً با استفاده از ماهواره‌های با تفکیک مکانی پایین همچون مودیس صورت گرفته است. این تحقیق به بررسی میزان تغییرات شاخص‌های طیفی در مراحل مختلف رشد کلزا پرداخته است. همچنین این کار با استفاده از دو سنجنده OLI و سنتینل-2 با توجه با رزولوشن متفاوت آن‌ها و جهت اطمینان از نتایج انجام گردید.

مواد و روش‌ها

مکان و شرایط تحقیق

این پژوهش در سال زراعی 1395-1396 در شهرستان کرخ، مزرعه آزمایشی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، با عرض جغرافیایی 35 درجه و 47 دقیقه و 48 ثانیه شمالی و طول جغرافیایی 50 درجه و 55 دقیقه و 58 ثانیه شرقی انجام شد. در این سال زراعی، در زمین مذکور، کشت کلزا، در سه مزرعه با مساحت 1/8، 2/6 و 2 هکتار انجام گرفت، که به-عنوان محل این آزمایش انتخاب شدند. سه مزرعه از نظر میزان شن و ریگ (سنگلاخی بودن) تفاوت زیادی داشتند

به طوری که یک مزرعه عاری از شن و ریگ بوده و در مقابل مزرعه دیگر دارای شن و ریگ بسیار زیاد می باشد و مزرعه سوم از این نظر در شرایط متوسط بود (شکل 1). با توجه به تأثیر احتمالی میزان سنگلاخ بر پوشش گیاهی، و در نتیجه بر بازتاب های باندهای سنجنده ها، دامنه تغییرات شاخص های طیفی گسترده تر شده و در نتیجه تحلیل ها از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار خواهد بود.

هر سه مزرعه از نظر زمان کاشت و رسیدگی های زراعی در طول رشد شرایط مشابه داشتند. عملیات کاشت به وسیله خطی کار و میزان 8 کیلوگرم در هکتار در 19 مهرماه صورت گرفت و عملیات آبیاری، کوددهی و سم پاشی در طول رشد و بافاصله کوتاه و گاه در یک روز برای سه مزرعه انجام شد. بنابراین مراحل رشد سه مزرعه مورد ارزیابی از نظر زمانی نزدیک به هم بود. به طوری که مراحل مهم رشد همچون گل دهی که دوره بیش از 45 روزه داشت بافاصله دو تا چهار روز در سه مزرعه شروع و پایان یافت.



مزرعه یک: دارای شن و ریگ متوسط

مزرعه دو: دارای شن و ریگ زیاد

مزرعه یک: بدون شن و ریگ

شکل 1- شرایط سه مزرعه مورد ارزیابی از نظر میزان شن و ریگ

اولین آبیاری مزارع در 20-22 مهر صورت گرفت. مزارع بعد از سبز شدن و در مرحله 4-6 برگی چندین بار به طور متناوب زیر برف رفتند. مجموع روزهای زیر برف محصول 25-30 روز بود. در اواسط بهمن برف ها کم کم آب شدند و مراحل رشد دوباره از سر گرفته شد. در این مدت آبیاری و رسیدگی ها ادامه یافت که در نهایت با اتمام مراحل رشد، محصول در اول تیر ماه برداشت شد.

مراحل رشد مورد ارزیابی

در این مطالعه پنج مرحله مهم رشد کلزا شامل مرحله قبل از شروع گل دهی (قبل از ساقه رفتن)، ابتدای گل دهی (ابتدای ساقه رفتن)، اوج گل دهی، رسیدگی سبز (کامل شدن غلاف) و رسیدگی خشک مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل 2). مرحله قبل از شروع گل دهی معادل مرحله قبل از ساقه دهی و از مراحل رویشی است. چهار مرحله دیگر نیز از مراحل زایشی است؛ بدین شکل دو مرحله ابتدای گل دهی و اوج آن همان دوره گل دهی است و نیز دو مرحله رسیدگی سبز و خشک در دوره رسیدگی تعریف می شود. مراحل اولیه همچون جوانه زنی و چندبرگی ابتدایی به دلیل پوشش کم گیاه در آن زمان و اختلاط زیاد بازتاب سایر پدیده ها مثل خاک با بازتاب محصول، و ایجاد خطا در شاخص های طیفی مورد ارزیابی قرار نگرفت. از طرفی از مرحله گل دهی، به دلیل اهمیت آن، دو مرحله ابتدا و اوج گل دهی مورد بررسی قرار گرفت.



ج- اوج گل‌دهی



ب- ابتدای گل‌دهی



الف- قبل از شروع گل‌دهی



ه- رسیدگی خشک



د- رسیدگی سبز

شکل 2- نمایی از شرایط محصول کلزا در مراحل رشد مورد ارزیابی

پردازش تصاویر ماهواره‌ای و استخراج اطلاعات

همان‌طور که گفته شد پردازش تصاویر به صورت رقومی، و گاه آنالوگ، صورت می‌گیرد. در این مطالعه به علت ماهیت پژوهش، پردازش داده‌های سنجنش از دور، تصاویر سنجنده‌ها، به شکل رقومی صورت گرفت. در واقع پردازش تصاویر مهم‌ترین مرحله در سنجنش از دور است. خطاهای هندسی، رادیومتریکی و اتمسفری باید به حداقل برسد تا نتایج استخراجی از باندها و شاخص‌های طیفی نزدیک به واقعیت و محدود به پدیده مورد مطالعه باشد. در این مطالعه تصاویری انتخاب شده‌اند که از نظر شرایط ابر و مه، روی منطقه محل تحقیق، مشکلی نداشتند و این در فرآیند تصحیحات و کم کردن خطای اتمسفری نقش مهمی دارد. همچنین تصاویر هر دو سنجنده زمین مرجع هستند و در نتیجه خطای هندسی بسیار کمتر است. به‌طور کلی برای کاهش همه خطاهای مورد اشاره برای هر سنجنده از روش‌ها و الگوریتم‌های توصیه شده استفاده شده است که به آن پرداخته می‌شود. تصاویر مربوطه از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا¹ اخذ شد و صحت پردازش آن‌ها بر اساس منحنی‌های طیفی سه پدیده گیاه، آب و خاک ارزیابی شد.

پردازش تصاویر سنجنده OLI

1. earthexplorer.usgs.gov



در این مطالعه برای پردازش تصاویر سنجنده OLI و استخراج اطلاعات آن از نرم‌افزار ENVI5.3 استفاده شد. همچنین عملیات پیش‌پردازش تصاویر این سنجنده همچون تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری بر اساس الگوریتم فلش^۱ انجام گردید. این کار برای همه تصاویر پنج مرحله مورد ارزیابی انجام شد. بعد از انجام تصحیحات، تصویر هر یک از مزارع به‌طور جدا جدا برش داده شد و میزان کمی هر باند برای پیکسل‌ها همراه با موقعیت مراکز آن‌ها از طریق نسخه کلاسیک ENVI استخراج شد. در این تحقیق از سه باند محدوده مرئی (آبی، سبز و قرمز) و نیز باند مادون‌قرمز نزدیک این سنجنده که همگی دارای تفکیک مکانی 30 متر می‌باشد، برای محاسبه شاخص‌های طیفی مورد مطالعه استفاده شد.

پردازش تصاویر سنجنده سنتینل-2

در این تحقیق پردازش تصاویر سنجنده سنتینل-2 و استخراج اطلاعات آن به‌وسیله نرم‌افزارهای ENVI5.3 و SNAP انجام شد. در ابتدا برای انجام عملیات پیش‌پردازش تصاویر این سنجنده همچون تصحیحات اتمسفری از برنامه Sen2Cor استفاده گردید. این برنامه توسط سایت پشتیبان ماهواره‌های سنتینل^۲ برای انجام پیش‌پردازش تصاویر سنجنده سنتینل-2 ارائه شده است. بعد از آن تصویر مورد نظر در نرم‌افزار SNAP باز شده و در فرمت استاندارد ENVI ذخیره گردید تا بدین ترتیب باز شدن تصویر تصحیح شده در نرم‌افزار ENVI5.3 ممکن باشد. در نهایت همانند تصاویر سنجنده OLI، تصویر هر یک از مزارع به‌طور جدا جدا برش داده شد و میزان کمی هر باند برای پیکسل‌ها همراه با موقعیت مراکز آن‌ها از طریق نسخه کلاسیک ENVI استخراج شد. در این تحقیق از سه باند محدوده مرئی و نیز باند مادون‌قرمز نزدیک این سنجنده که همگی دارای تفکیک مکانی 10 متر می‌باشد، برای محاسبه شاخص‌های طیفی استفاده شد.

تعداد پیکسل‌ها و چگونگی انتخاب آن‌ها

این تحقیق بر اساس تغییرات شاخص‌های طیفی در پیکسل‌های سه مزرعه مورد ارزیابی بنا شده است. لذا تمام پیکسل‌ها که از حاشیه مزارع فاصله مناسبی داشتند و با پدیده‌های حاشیه اختلاط نداشتند، برای پردازش مناسب هستند. به‌هر حال با توجه به لزوم تأثیر یکسان هر یک از سه مزرعه مورد ارزیابی که از نظر شرایط سنگلاخی متفاوت بودند، در تحلیل آماری، پیکسل‌ها در هر سه مزرعه برای هر سنجنده، به تعداد مساوی و به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. بدین شکل از سنجنده OLI، با توجه به بزرگ بودن پیکسل‌های آن و محدودیت سطح مزارع، 10 پیکسل برای هر مزرعه، 30 پیکسل برای کل سه مزرعه، و از سنجنده سنتینل-2، با توجه به کوچک بودن نسبی پیکسل‌های آن، 40 پیکسل برای هر مزرعه، 120 پیکسل برای کل سه مزرعه، انتخاب شدند.

شاخص‌های مورد ارزیابی

شاخص‌های زیادی در سنجش از دور بر اساس ترکیبی از نسبت باندها تعریف شده‌اند که هر کدام در زمینه‌ای همچون تشخیص پوشش گیاهی، تخمین میزان زیست‌توده یا عملکرد، و گاه در زمینه‌های تخصصی‌تر همچون برآورد بقایای محصولات و تشخیص خاک‌ورزی حفاظتی از خاک‌ورزی مرسوم نتایج بهتری داشته‌اند. در این تحقیق شاخص‌هایی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که در زمینه‌های زیست‌توده یا عملکرد محصولات زراعی کاربرد بیشتری داشته‌اند. بدین شکل

2. FLAASH Atmospheric Correction
3. European Space Agency (ESA)



شاخص‌های طیفی متداول و پر کاربرد همچون NDVI و RVI، در کنار شاخص جدیدی همچون NDYI که در مطالعات اخیر در زمینه کلزا مورد توجه قرار گرفته، ارزیابی شده‌اند. در کل ده شاخص طیفی شامل BNDVI، EVI، EVI2، GARI، GNDVI، NDVI، NDYI، MTVI1، MTVI2 و RVI مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که تعدادی از آن‌ها همانند EVI، EVI2، MTVI1 و MTVI2 در روابط آن‌ها به جای دو باند، سه باند طیفی دخیل داده شده است (جدول 1). به طور کلی سعی شده است که علاوه بر موارد مذکور، شاخص‌های مورد مطالعه، تمام حوزه‌های طیفی آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز را تحت پوشش قرار دهند. به هر حال هر یک از ده شاخص مورد مطالعه با توجه به استخراج باندهای طیفی که در قبل ذکر شد، بر اساس رابطه آن‌ها که در جدول 1 آمده است، برای پیکسل‌های مورد ارزیابی محاسبه گردید.

جدول 1- شاخص‌های طیفی مورد مطالعه برای پیش‌بینی عملکرد کلزا در این تحقیق

منبع	رابطه	اختصار	شاخص گیاهی
[33]	$(NIR - Blue) / (NIR + Blue)$	BNDVI	Blue Normalized Difference Vegetation Index
[19]	$2.5(NIR - Red) / [(NIR + 6Red - 7.5Blue + 1)]$	EVI	Enhanced Vegetation Index
[21]	$2.5(NIR - Red) / [(NIR + 2.4Red + 1)]$	EVI2	2-band Enhanced Vegetation Index
[12]	$(NIR - Green) / (NIR + Green)$	GNDVI	Green Normalization Difference Vegetation Index
[16]	$[NIR - (Green - (Blue - Red))] / [NIR + (Green - (Blue - Red))]$	GARI	Green Atmospherically Resilient Index
[30]	$(NIR - Red) / (NIR + Red)$	NDVI	Normalization Difference Vegetation Index
[33]	$(Green - Blue) / (Green + Blue)$	NDYI	Normalized Difference Yellowness Index
[18]	$1.2[1.2(NIR-G)-2.5(Red-G)]$	MTVI1	Modified Triangular Vegetation Index 1
[18]	$[1.8(NIR-G)-3.75(Red-G)] / [((2NIR+1)^2 - (6NIR-5(Red))^{0.5}) - 0.5]$	MTVI2	Modified Triangular Vegetation Index 2
[11]	NIR / Red	RVI	Ratio Vegetation Index

زمان برداشت تصاویر سنجنده‌ها

در این پژوهش طی رشد محصول کلزا، با بازدیدهای مداوم از مزارع، دامنه زمانی مربوط به پنج مرحله رشد مورد ارزیابی مشخص شد. بدین شکل مرحله قبل از شروع گل دهی (قبل از ساقه رفتن) در نیمه دوم اسفند، ابتدای گل دهی (ابتدای ساقه رفتن) در نیمه اول فروردین، اوج گل دهی در اواخر فروردین تا اوایل اردیبهشت، رسیدگی سبز (کامل شدن غلاف) در دهه سوم اردیبهشت و رسیدگی خشک در دهه سوم خرداد به وقوع پیوست. همان‌طور که گفته شد به دلیل شرایط یکسان و رسیدگی‌های هم‌زمان، مراحل رشد مورد ارزیابی شده به شکل نزدیک به هم از نظر زمانی در سه مزرعه صورت گرفت و بنابراین برای هر مرحله رشد یک تاریخ تصویر، از هر سنجنده برای سه مزرعه در نظر گرفته شد. با توجه به مشخص شدن دامنه زمانی پنج مرحله رشد، بهترین تصاویر فاقد ایر و مه هر دو سنجنده که در دامنه زمانی این مراحل بوده، انتخاب شدند (جدول 2).



جدول 2- تاریخ تصاویر پردازش شده دو سنجنده برای هر مرحله رشد

سنجنده سنتینل-2		سنجنده OLI		مرحله رشد
تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	
2017/3/14	1395/12/24	2017/3/10	1395/12/20	قبل از گل دهی
2017/4/3	1396/1/14	2017/3/26	1396/1/6	ابتدای گل دهی
2017/4/23	1396/2/3	2017/4/20	1396/1/31	اوج گل دهی
2017/5/13	1396/2/23	2017/5/13	1396/2/23	رسیدگی سبز
2017/6/12	1396/3/22	2017/6/14	1396/3/24	رسیدگی خشک

همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود تاریخ تصاویر همه مراحل رشد در هر دو سنجنده، در دامنه زمانی مراحل رشد مورد ارزیابی قرار گرفته و نزدیک به هم هستند. البته در مرحله ابتدای گل دهی فاصله تاریخ اخذ تصاویر دو سنجنده کمی بیش از بقیه مراحل می‌باشد و لذا در این مرحله تراکم گل‌ها در تاریخ اخذ تصویر سنجنده سنتینل-2 نسبت به سنجنده OLI، کمی بیشتر است ولی با توجه به وجود هوای خنک در نیمه اول فروردین و افزایش بطنی گل‌دهی در این فاصله و نیز فاصله زمانی زیاد تا اوج گل‌دهی، هر دو تاریخ برای مرحله ابتدای گل‌دهی تعریف شده‌اند.

پردازش‌های آماری تحقیق

بعد از پردازش تصاویر دو سنجنده OLI و سنتینل-2، و استخراج اعداد باندهای متناظر پیکسل‌های مورد ارزیابی برای دو سنجنده، هر یک از شاخص‌های طیفی، با توجه به روابط آن‌ها، در نرم‌افزار اکسل محاسبه گردید. این کار برای هر یک از پنج مرحله رشد قبل از شروع گل‌دهی (قبل از ساقه رفتن)، ابتدای گل‌دهی (ابتدای ساقه رفتن)، اوج گل‌دهی، رسیدگی سبز (کامل شدن غلاف) و رسیدگی خشک به‌طور جداگانه محاسبه شد. سپس برای مجموع داده‌های مربوط به شاخص‌های طیفی در پیکسل‌های سه مزرعه، محاسبه شاخص‌های آماری همچون میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای هر یک از مراحل رشد، به‌طور جداگانه، صورت گرفت. لذا تحلیل پتانسیل و حساسیت شاخص‌های طیفی، با توجه به تغییرات شاخص‌های آماری آن‌ها در مراحل مختلف رشد انجام گردید.

نتایج و بحث

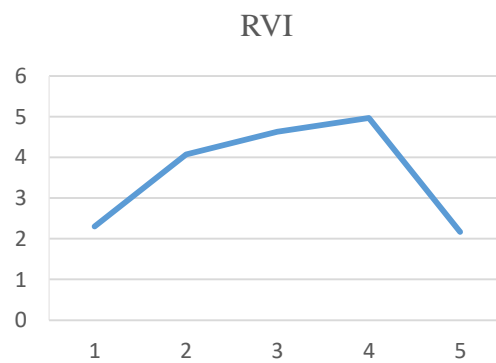
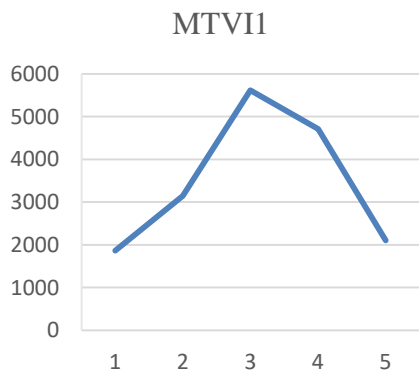
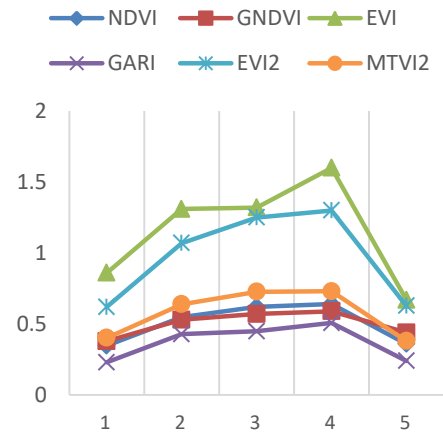
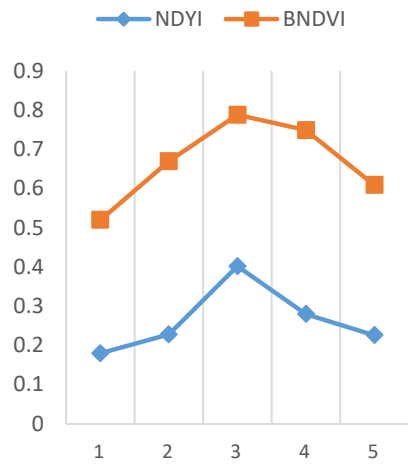
مقایسه میانگین

مقایسه میانگین شاخص‌های طیفی نشان داد که روند تغییرات این شاخص‌ها در مراحل مختلف رشد در هر دو سنجنده OLI و سنتینل-2، با وجود تفاوت کمی، از روند کاملاً مشابه تبعیت می‌کند (شکل‌های 3 و 4). یادآور می‌شود که دو شاخص RVI و MTVI با توجه به دامنه اعداد آن‌ها و تفاوت آن‌ها با سایر شاخص‌ها از این لحاظ، به‌طور جداگانه رسم شده‌اند. تشابه روند تغییرات همه ده شاخص مورد ارزیابی در پنج مرحله رشد، در دو سنجنده، نشان‌دهنده فرایند صحیح پردازش تصاویر، و نیز قوت نتیجه به‌دقت آمده مربوط به روند تغییرات شاخص‌های طیفی در مراحل رشد کلزا می‌باشد. به‌طور مشخص و با توجه به روند تغییرات میانگین شاخص‌های طیفی در مراحل مختلف رشد کلزا، آن‌ها را می‌توان در دودسته متفاوت تقسیم‌بندی نمود: دسته اول شاخص‌های طیفی گروه NDVI (شامل NDVI، EVI، EVI2، GARI،



GNDVI، MTVI2 و RVI) و دسته دوم شاخص‌های طیفی گروه NDVI (شامل NDVI، BNDVI و MTVI1). بر این اساس، گروه NDVI از روند افزایشی در طول مراحل رشد از مرحله قبل از گل‌دهی تا رسیدگی سبز (چهار مرحله اول رشد) تبعیت می‌کنند اما در مرحله رسیدگی خشک مقادیر آن‌ها دچار کاهش می‌یابند (قسمت‌های الف شکل‌های 3 و 4). در مقابل، شاخص‌های گروه NDVI دارای روند افزایشی فقط در سه مرحله اول رشد یعنی از مرحله قبل از گل‌دهی تا اوج گل‌دهی بوده و در دو مرحله آخر رشد یعنی رسیدگی سبز و رسیدگی خشک، روند تغییرات آن‌ها کاهشی می‌شود (قسمت‌های ب شکل‌های 3 و 4).

به‌طور عام اساس پایه‌گذاری شاخص‌های طیفی گیاهی برای نشان دادن میزان پوشش گیاهی است. هرچه مقدار میزان تراکم پوشش گیاهی بیشتر باشد، میزان کمی این شاخص‌ها بیشتر می‌شود. برای مثال مقدار شاخص NDVI بین -1 تا +1 می‌باشد که اعداد منفی نشان‌دهنده عدم وجود پوشش گیاهی است و اعداد مثبت و نزدیک‌تر به مثبت 1 نشان از تراکم بیشتر پوشش گیاهی و سبزی‌نگی است [5]. دلیل این مسئله بیشتر مربوط به اختلاط سایر پدیده‌ها خصوصاً خاک با بازتاب نوری ناشی از اندام‌های سبز گیاه همچون برگ و ساقه است. هر چه تراکم محصول بیشتر باشد این اختلاط کمتر است و در نتیجه، شاخص‌ها اعداد بیشتری را نشان می‌دهند. لذا به‌طور معمول در مورد محصولات سبز همچون گندم شاخص‌های طیفی روند افزایشی با طی کردن مراحل رشد و توسعه پوشش سبز گیاه طی می‌کنند و همین‌طور در مرحله رسیدگی خشک به دلیل تغییر رنگ پوشش گیاهی محصول از سبز به خاکستری روشن این روند حالت کاهشی می‌گیرد. اما در مورد محصول کلزا، پوشش گیاهی آن در دو مرحله گل‌دهی و رسیدگی خشک شاهد تغییر رنگ است. همان‌طور که ذکر شد در مرحله ابتدای گل‌دهی و نیز اوج آن با وجود تغییر رنگ پوشش گیاهی در اثر گل‌های زرد کلزا، روند افزایشی شاخص‌های طیفی گروه NDVI متوقف نشده و این گروه فقط در اثر تغییر رنگ در زمان رسیدگی خشک کاهش یافته است. به نظر می‌رسد دلیل اصلی این مسئله مرتبط با ماهیت روابط این شاخص‌ها است به‌طوری‌که این شاخص‌ها با میزان پوشش گیاهی همه اجزای گیاه اعم از برگ و ساقه و گلبرگ رابطه مستقیمی دارند. در حالی‌که در مرحله رسیدگی خشک به دلیل تغییر رنگ همه اجزای گیاه و نیز از دست دادن آب و خشک شدن اندام‌ها و نیز کم شدن حجم پوشش گیاهی شاهد کاهش این روند هستیم. البته شاخص‌های طیفی گروه NDVI به این شکل عکس‌العمل نشان ندادند و همان‌طور که گفته شد روند افزایش آن‌ها فقط تا مرحله اوج گل‌دهی ادامه داشت و پس از آن حالت نزولی پیدا کرده است. در واقع بالاترین مقادیر شاخص‌های طیفی گروه NDVI در مرحله اوج گل‌دهی ثبت شده است. این مسئله به‌طور مشخص به حساسیت شاخص‌های طیفی گروه NDVI به رنگ زرد ارتباط دارد. در واقع گلبرگ‌های زرد کلزا و پوشش زرد محصول در مرحله اوج گل‌دهی از یک طرف، و ماهیت روابط این شاخص‌ها و حساسیت آن‌ها به رنگ زرد در این مسئله دخیل هستند.



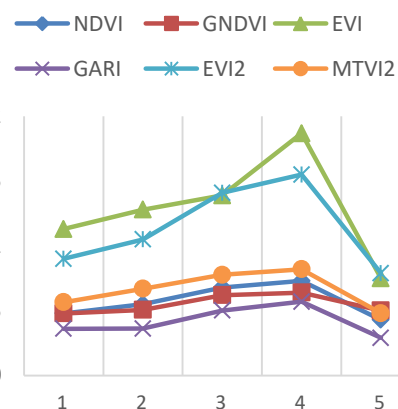
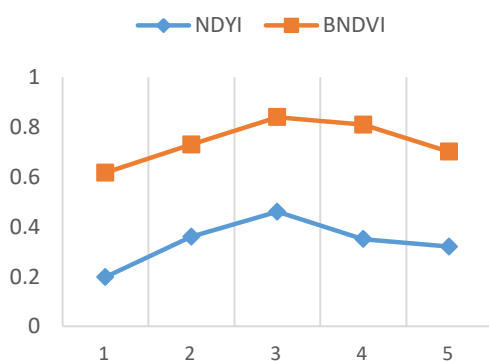
ب- شاخص‌های گروه NDVI

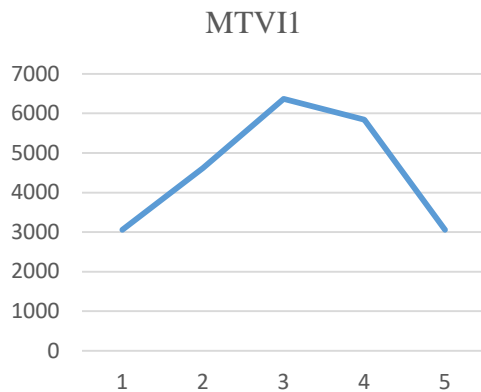
الف- شاخص‌های گروه NDVI

شکل - مقایسه تغییرات میانگین شاخص‌های طیفی منتج از سنجنده

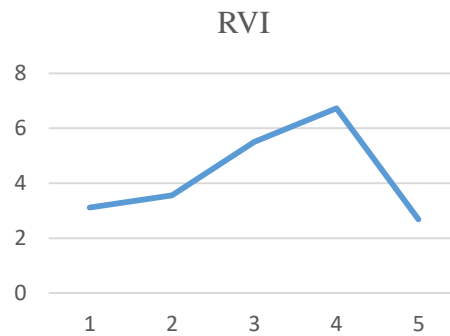
Error! No text of specified style in document. در OLI در مراحل مختلف رشد کلزا*

* اعداد 1، 2، 3، 4 و 5 به ترتیب مراحل قبل از گل‌دهی، ابتدای گل‌دهی، اوج گل‌دهی، رسیدگی سبز و رسیدگی خشک





ب- شاخص‌های گروه NDVI



الف- شاخص‌های گروه NDVI

شکل -Error! No text of specified style in document. مقایسه تغییرات میانگین شاخص‌های طیفی منتج از سنجنده

سنجینل-2 در مراحل مختلف رشد کلزا*

* اعداد 1، 2، 3، 4 و 5 به ترتیب مراحل قبل از گل‌دهی، ابتدای گل‌دهی، اوج گل‌دهی، رسیدگی سبز و رسیدگی خشک

مقایسه انحراف معیار

بررسی نتایج مربوط به انحراف معیار شاخص‌های طیفی مورد مطالعه دو سنجنده OLI و سنجینل-2 نشان داد که از نظر مقادیر، تفاوت زیادی در مراحل رشد متناظر در دو سنجنده مشاهده می‌شود (جدول 3 و 4). این مسئله با توجه به تعداد متفاوت پیکسل‌های مورد مطالعه دو سنجنده (40 پیکسل در سنجنده OLI و 120 پیکسل در سنجنده سنجینل-2) قابل توجیه می‌شود. اما روند تغییرات انحراف معیار در دو سنجنده در مراحل مختلف رشد با وجود شباهت‌های زیاد، دارای تفاوت‌هایی نیز می‌باشد (جدول 3 و 4). اختلاف‌ها بیشتر مربوط به زمان متفاوت تصویربرداری در دو سنجنده برای هر مرحله رشد است و همچنین می‌تواند مرتبط با تعداد کم پیکسل‌های مورد بررسی در سنجنده OLI، و احتمال خطای بیشتر در این سنجنده باشد.

جدول 3- انحراف معیار شاخص‌های طیفی منتج از سنجنده OLI در مراحل مختلف رشد کلزا

شاخص طیفی	قبل از گل‌دهی	ابتدای گل‌دهی	اوج گل‌دهی	رسیدگی سبز	رسیدگی خشک
EVI	0/5221	0/4577	0/2846	0/3181	0/1901
EVI2	0/3444	0/3762	0/2308	0/2541	0/1617
GNDVI	0/1248	0/1149	0/0604	0/0616	0/0479
GARI	0/1661	0/1522	0/0874	0/0911	0/0724
NDVI	0/1637	0/1483	0/0891	0/0976	0/0793
MTVI2	0/2039	0/1378	0/0851	0/0967	0/1194
RVI	1/0044	1/7659	1/2697	1/4134	0/8082
BNDVI	0/1114	0/1019	0/0752	0/0633	0/1185
NDVI	0/0274	0/0392	0/0689	0/0481	0/0465
MTVII	1311/3	1374/3	1208/6	1020/1	661/4



جدول 4- انحراف معیار شاخص‌های طیفی منتج از سنجنده سنتینل-2 در مراحل مختلف رشد کلزا

شاخص طیفی	قبل از گل‌دهی	ابتدای گل‌دهی	اوج گل‌دهی	رسیدگی سبز	رسیدگی خشک
EVI	0/5506	0/2583	0/1376	0/2257	0/2135
EVI2	0/3071	0/1847	0/1327	0/1312	0/2237
GNDVI	0/0964	0/0647	0/0352	0/0271	0/0536
GARI	0/1445	0/0905	0/0482	0/0447	0/0782
NDVI	0/1367	0/0769	0/0505	0/0449	0/1019
MTVI2	0/1608	0/0704	0/0474	0/0431	0/1461
RVI	1/0761	0/7365	0/7546	1/1099	0/6945
BNDVI	0/0782	0/0473	0/0381	0/0226	0/0772
NDYI	0/0276	0/0544	0/0557	0/0234	0/0752
MTVII	1614/8	1001/2	1001/9	824/3	972/4

مقایسه ضریب تغییرات

بررسی نتایج مربوط به ضریب تغییرات شاخص‌های طیفی مورد مطالعه دو سنجنده OLI و سنتینل-2 نشان داد که از نظر مقادیر، تفاوت زیادی در مراحل رشد متناظر در دو سنجنده مشاهده می‌شود (جداول 5 و 6). این مسئله همانند انحراف معیار و نیز با توجه به متأثر بودن ضریب تغییرات از آن، قابل توجه است. همچنین روند تغییرات ضریب تغییرات در دو سنجنده در مراحل مختلف رشد متناظر همانند انحراف معیار با وجود شباهت‌های کلی، دارای تفاوت‌هایی می‌باشد (جداول 5 و 6) که همانند قبل، اختلاف‌ها، متأثر از زمان متفاوت تصویربرداری در دو سنجنده برای هر مرحله رشد، و نیز تعداد کم پیکسل‌های مورد بررسی در سنجنده OLI، می‌باشد.

جدول 5- ضریب پراکنش شاخص‌های طیفی منتج از سنجنده OLI در مراحل مختلف رشد کلزا

شاخص طیفی	قبل از گل‌دهی	ابتدای گل‌دهی	اوج گل‌دهی	رسیدگی سبز	رسیدگی خشک
EVI	60/2	32/5	21/6	19/8	28/4
EVI2	55/4	35/1	18/4	19/5	25/7
GNDVI	32/9	21/6	10/5	10/3	10/9
GARI	65/4	35/5	19/4	17/9	29/9
NDVI	47/1	27/1	14/2	15/1	22/1
MTVI2	50/6	21/5	11/7	13/2	30/9
RVI	43/6	42/1	27/4	28/4	36/5
BNDVI	21/3	15/2	9/5	8/4	19/5
NDYI	15/1	17/3	17/1	16/9	20/5
MTVII	65/6	43/6	21/5	21/3	31/4

جدول 6- ضریب پراکنش شاخص‌های طیفی منتج از سنجنده سنتینل-2 در مراحل مختلف رشد کلزا

شاخص طیفی	قبل از گل‌دهی	ابتدای گل‌دهی	اوج گل‌دهی	رسیدگی سبز	رسیدگی خشک
EVI	42/9	22/8	9/9	12/1	28/2
EVI2	34/1	17/5	9/4	8/4	28/1
GNDVI	20/1	12/8	5/6	4/2	10/7



26/9	7/7	9/6	24/6	39/6	GARI	
23/2	6/1	7/3	13/9	28/5	NDVI	
30/3	5/2	6/1	10/5	28/4	MTVI2	
25/8	16/5	13/7	20/6	34/5	RVI	
10/9	2/8	4/5	6/4	12/6	BNDVI	شاخص‌های
23/1	6/6	11/9	14/9	13/9	NDYI	گروه NDYI
31/8	14/1	15/7	21/6	52/8	MTVII	

به‌طور کلی شاخص‌های پراکنش همچون انحراف معیار و ضریب تغییرات مربوط به شاخص‌های طیفی، متأثر از دو عامل تفاوت‌های تراکم محصول و خطاهای ناشی از اختلاط بازتاب سایر پدیده‌ها همچون خاک با پوشش گیاهی می‌باشد. لذا وجود پراکنش بیشتر در مراحل اولیه رشد (قبل از گل‌دهی و ابتدای آن) که اختلاطی از پوشش گیاهی و بخشی از خاک لخت (شکل الف و ب-2) وجود داشته و نیز پوشش گیاهی با میزان متفاوتی از تراکم در حال گسترش است، برای شاخص‌های طیفی گروه NDVI که حساسیت آن‌ها به پوشش سبز بوده و بیشتر برای منظور تعریف شده‌اند، منطقی به نظر می‌رسد. بدین ترتیب روند تغییرات شاخص‌های پراکنش این گروه با افزایش پوشش محصول و در برگرفتن تمام سطح خاک، کمتر می‌شود؛ اگرچه میزان شاخص‌های پراکنش دو شاخص RVI و EVI در مرحله رسیدگی سیر کمی بیشتر از مرحله اوج گل‌دهی است. به‌هرحال در انتها و در مرحله رسیدگی خشک به دلیل تفاوت رسیدگی‌های پیکسل‌ها در زمان اخذ تصاویر سنجنده‌ها به این شکل که بعضی از آن‌ها تماماً زرد خاکستری و بعضی نیمه سبز بوده (شکل ه-2)، این روند تغییرات شاخص‌های پراکنش این گروه حالت صعودی نسبی گرفته است (جداول 5 و 6).

در مقابل، شاخص‌های طیفی گروه NDYI، که حساسیت آن‌ها بیشتر به رنگ زرد است، با وجود تفاوت پوشش گیاهی و نیز اختلاط خاک در مراحل اولیه، تغییرات شاخص‌های پراکنش آن‌ها در مراحل رشد، جزئی است. البته شاخص MTVII نسبت به اختلاط خاک در مرحله قبل از گل‌دهی بیشترین حساسیت را نسبت به همه شاخص‌ها نشان داده است. به‌هرحال سواى مرحله قبل از گل‌دهی که اختلاط خاک در آن بسیار چشمگیر است، همه شاخص‌های طیفی گروه NDYI حداقل میزان شاخص‌های پراکنش خود را در مرحله رسیدگی سبز که اثری از رنگ زرد وجود ندارد، کسب کرده‌اند. از طرف دیگر پراکنش این شاخص‌ها در مرحله رسیدگی خشک، به دلیل تفاوت رسیدگی پیکسل‌ها و در نتیجه تفاوت میزان پوشش رنگ زرد آن‌ها، و در مرحله ابتدای گل‌دهی، این پراکنش با توجه به میزان پوشش گل‌های زرد متفاوت پیکسل‌ها، و در نهایت در اوج گل‌دهی، به علت تفاوت تراکم گل‌های زرد در پیکسل‌ها می‌باشد (جداول 5 و 6).

ملاک پتانسیل شاخص‌های طیفی

به نظر می‌رسد که اولین ملاک پتانسیل سنجی هر شاخص طیفی برای تشخیص بهترین زمان رصد پدیده مورد بررسی توسط آن، کسب میزان حداکثر آن شاخص در آن زمان است. در مورد پژوهش حاضر نیز بهترین زمان از بین مراحل رشد برای هر شاخص طیفی جهت ارزیابی پوشش گیاهی و صفات مرتبط با آن همچون زیست توده و عملکرد، کسب بیشترین میزان هر شاخص در آن زمان است. لذا مراحل اولیه رشد به دلیل کسب میانگین پایین شاخص‌های طیفی نمی‌توانند پوشش گیاهی را به‌خوبی نشان دهند. به بیانی دیگر با توجه به چگونگی توسعه برگ‌ها و ساقه‌های فرعی گیاه که الزاماً از روند زمانی یکدستی در تمام نقاط و پیکسل‌های مزارع تبعیت نمی‌کند و به شرایط خاک عمقی از جمله بافت و مواد غذایی هر نقطه و پیکسل بستگی دارد و ممکن است یک پیکسل با پوشش گیاهی کم باگذشت زمان از سایر پیکسل‌ها پیشی بگیرد، و



نیز با در نظر گرفتن اختلاط پدیده خاک با محصول در مراحل اولیه رشد، شاخص‌های طیفی در این مراحل پتانسیل لازم برای برآورد پوشش گیاهی (زیست توده) را ندارند. به عبارتی گیاه باید تمام روند رشد خود را طی نماید تا با دقت بیشتری، تفاوت‌ها، بدون امکان تغییر، رصد شوند. البته گیاه در طول زمان مشخصی، همانند حالت اوج گل‌دهی و رسیدگی سبز (شکل 2 ج و د)، روند توسعه آن با تغییر کمی مواجه می‌شود و ممکن است فقط حالت رویشی و زایشی محصول تغییر یابد. به هر حال با توجه به ارتباط میزان پوشش گیاهی و شاخص‌های طیفی، بالاترین پوشش گیاهی غالباً هم‌زمان با حداکثر شاخص‌های طیفی حادث می‌شود و لذا ملاک حداکثر شاخص طیفی به‌عنوان اولویت اول برای شناخت بهترین زمان رصد پوشش گیاهی نهایی توسط آن منطقی به نظر می‌رسد. به هر حال با توجه به حداکثر میانگین شاخص‌های طیفی محاسبه شده از هر دو سنجنده OLI و سنتینل-2 (شکل‌های 3 و 4)، بهترین زمان برای برآورد پوشش گیاهی توسط شاخص‌های گروه NDVI، مرحله رسیدگی سبز، و برای شاخص‌های گروه NDYI، مرحله اوج گل‌دهی تشخیص داده می‌شود. از طرف دیگر، وجود ضریب تغییرات در شاخص‌های طیفی با توجه به وجود تغییرات در میزان پوشش گیاهی (میزان زیست توده)، ضروری است، تا همبستگی این دو بیشتر باشد. لذا ضریب تغییرات بیشتر، به‌عنوان ملاک دوم در نظر گرفته شد. به هر حال در صورتی که شرایط یکسانی حاکم باشد و عامل یا عوامل دیگری در ایجاد خطا تشخیص داده نشوند، تغییرات پوشش گیاهی در راستای تغییرات شاخص‌های طیفی خواهد بود و میزان ضریب تغییرات بیشتر یک شاخص طیفی نسبت به سایر شاخص‌ها، حساسیت و پتانسیل آن شاخص نسبت به پوشش گیاهی را نشان خواهد داد. بنابراین با توجه به این تحلیل، و بر اساس حداکثر ضریب تغییرات، در مرحله رسیدگی سبز، از بین شاخص‌های طیفی گروه NDVI، دو شاخص طیفی RVI و EVI می‌توانند پتانسیل بیشتری برای برآورد پوشش گیاهی نهایی کلزا داشته باشند و همچنین در مرحله اوج گل‌دهی و از میان شاخص‌های گروه NDYI، دو شاخص MTVII و NDYI دارای پتانسیل بیشتری برای این منظور هستند.

با توجه به طیف‌سنجی صورت گرفته [33 و 35]، در بین مراحل رشد، بیشترین میزان همبستگی برای تخمین عملکرد کلزا در مرحله اوج گل‌دهی به‌دقت آمده است. همچنین تحقیقات نشان داده که ارتباط بسیار قوی بین میزان پوشش گیاهی (بیوماس) و عملکرد دانه وجود دارد [22]. در مطالعه حاضر نیز از بین پنج مرحله مورد ارزیابی، مرحله اوج گل‌دهی، همراه با مرحله رسیدگی سبز، بهترین مرحله برای برآورد پوشش گیاهی کلزا و صفات مرتبط با آن همچون عملکرد معرفی شده است. همچنین مطالعات صورت گرفته بر اساس طیف‌سنجی زمینی نشان داد در مرحله اوج گل‌دهی شاخص NDYI بیشترین همبستگی با عملکرد کلزا را داشت [33]. در مطالعه حاضر نیز از ده شاخص طیفی مورد ارزیابی، شاخص NDYI، همراه با شاخص MTVII، بالاترین پتانسیل برای برآورد پوشش گیاهی و صفات مرتبط با آن، در مرحله اوج گل‌دهی، را به دست آورده است.

نتایج مطالعاتی که عملکرد کلزا را در مراحل مختلف رشد بررسی کرده‌اند [14 و 29]، نشان داده است که همبستگی شاخص NDVI با عملکرد در مرحله اوج گل‌دهی نسبت به زمان رسیدگی سبز کمتر است. این مسئله در میزان کمتر این شاخص در مرحله اوج گل‌دهی نسبت به رسیدگی سبز در هر دو سنجنده OLI و سنتینل-2 به‌وضوح قابل مشاهده بوده (شکل‌های 3 و 4) و شرح داده شد که برای برآورد پوشش گیاهی کلزا توسط این شاخص، مرحله رسیدگی سبز مناسب است.

بر اساس نتایج این پژوهش در مرحله رسیدگی سبز بیشترین پتانسیل به RVI و EVI تعلق داشت. نتایج ارزیابی چندین شاخص طیفی توسط سنجنده مودیس با دوره 16 روزه و وضوح 250 متری نشان داد که شاخص EVI در برآورد عملکرد



کلزا بالاترین همبستگی را کسب کرده است [23]. شاخص RVI نیز شاخصی است که نتایج آن در برخی مطالعات محصولات سبز بهتر از سایر شاخص‌ها گزارش شده است. همچنین در این زمینه بیشترین میزان همبستگی با محصول گندم دوروم [8]، و نیز بیشترین میزان همبستگی با ذرت [32]، توسط این شاخص گزارش شده است.

نتیجه‌گیری

- حساس‌ترین مرحله برای برآورد پوشش گیاهی و صفات مرتبط با آن همچون میزان زیست‌توده و عملکرد، به وسیله هر شاخص طیفی، کسب حداکثر مقدار آن نسبت به سایر مراحل می‌باشد. بر این اساس بهترین زمان برای برآورد میزان پوشش گیاهی کلزا توسط شاخص‌های طیفی گروه NDVI (شامل NDVI، EVI، EVI2، GARI، GNDVI، MTVI2 و RVI)، مرحله رسیدگی سبز، و نیز توسط شاخص‌های طیفی گروه NDVI (شامل NDVI، NDVI و BNDVI) و (MTVI1)، مرحله اوج گل‌دهی است.
- با توجه به لزوم داشتن ضریب تغییرات متناسب با تغییرات عملکرد، در مرحله رسیدگی سبز، دو شاخص طیفی RVI و EVI، و در مرحله اوج گل‌دهی دو شاخص طیفی MTVI1 و NDVI، پتانسیل بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های طیفی مورد بررسی جهت برآورد میزان پوشش گیاهی کلزا دارند.

منابع

1. رودی، د.، رحمان‌پور، س.، جاویدفر، ف. 1383. کاشت کلزا. موسسه تحقیقات اصلاح و بذری.
2. علوی‌پناه، س.ک. 1395. اصول سنجش از دور نوین و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی. انتشارات دانشگاه تهران.
3. کاظم، م.، میرزایی، س.، معادی، ب. 1394. زراعت کلزا. انتشارات تاک.
4. نورقلی‌پور، ف.، رضائی، ح.، میرزاشاهی، ک.، حقیقت‌نیا، ح. 1393. دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه کلزا. موسسه تحقیقات خاک و آب.
5. Adamchuk, V.I., Perk, R.L., and Schepers, J.S. 2003. Application of remote sensing in site specific management. Precision Agriculture Extension Circular EC 03-702. Lincoln, Nebraska: University of Nebraska Cooperative Extension.
6. Ahamed, T., Tian, L., Zhang, Y., and Ting, K.C. 2011. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. Biomass and Bioenergy 35, 2455 – 2469.
7. Ahmadian, N., Demattê, J.A.M., Xu, D., Borg, E., and Zölitz, R., 2016. A New Concept of Soil Line Retrieval from Landsat 8 Images for Estimating Plant Biophysical Parameters. Remote Sens. 2016, 8, 738; <https://doi.org/10.3390/rs8090738>.
8. Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J. L., and Royo, C. 2000. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. Agronomy Journal, 92 (1), 83-91.
9. Ash, M. 2017. Canola Production and Processing. Retrieved March 27, 2018, from <https://www.ers.usda.gov/topics/crops/soybeans-oil-crops/canola.aspx>.



10. Basnyat, P., McConkey, B., Lafond, G. P., Moulin, A., and Pelcat, Y. 2004. Optimal time for remote sensing to relate to crop grain yield on the Canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science*, 84 (1), 97–103.
11. Birth, G.S., and McVey, G.R. 1968. Measuring color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal*, 60, 640-649.
12. Buschmann, C., and Nagel, E. 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 711–722.
13. Cowley, R.B., Luckett, D.J., Moroni, J.S., and Diffey, S. 2014. Use of remote sensing to determine the relationship of early vigour to grain yield in canola (*Brassica napus* L.) germplasm. *Crop & Pasture Science* 65, 1288–1299.
14. Dominguez, J.A., Kumhalova, J., and Novak, P. 2017. Assessment of the relationship between spectral indices from satellite remote sensing and winter oilseed rape yield. *Agronomy Research*, 15(1), 055–068.
15. Fang, H., Song, H.Y., Cao, F., He, Y., and Qiu, Z.J. 2007. Study on the relationship between spectral properties of oilseed rape leaves and their chlorophyll content. *Journal of Spectroscopy and Spectral Analysis*, 27, 1731–1734.
16. Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., and Rundquist, D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetative fraction. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 80, 76–87.
17. Goel, P.K., Prasher, S.O., Landry, J.A., Patel, R.M., Viau, A.A., and Miller, J.R. 2003. Estimation of crop biophysical parameters through airborne and field hyperspectral remote sensing. *Transactions of the ASAE*, 46 (4), 1235–1246.
18. Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco Tejada, P.J., and Strachan, I.B. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 90, 337–352.
19. Huete, A. R., Justice, C., and Van Leeuwen, W. 1996. MODIS vegetation index (mod13). Algorithm theoretical basis document. Version 2. NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt, Maryland 20771, USA.
20. Jago, R.A., Cutler, M.E.J., and Curran, P.J. 1999. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 68 (3), 217–224.
21. Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K., Miura, T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112, 3833-3845.
22. Jin, X., Kumar, L., Li, Z., Xu, X., Yang, G., and Wang, J., 2016. Estimation of winter wheat biomass and yield by combining the aquacrop model and field hyperspectral data. *Remote Sens.* 2016, 8. <https://doi.org/10.3390/rs8120972>.
23. Johnson, D.M. 2016. A comprehensive assessment of the correlations between field crop yields and commonly used MODIS products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*, 52, 65–81.
24. Johnson, L., Roczen, F., Youkhana, D., Nemani, R., and Bosch, D. 2003. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture* 38, 33-44.



25. Lee, K.S., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Maersperger, T.K., and Gower, S.T., 2004. Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 91, 508–520.
26. Liu, F., Jin, Z.L., Naeem, M.S., Tian, T., Zhang, F., He, Y., Fang, H., Ye, Q.F., and Zhou, W.J. 2011. Applying near-infrared spectroscopy and chemo metrics to determine total amino acids in herbicide-stressed oilseed rape leaves. *Journal of Food Bioprocess Technol*, 4, 1314–1321.
27. Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., and 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. *Journal of Sensors*, 7(11), 2636-2651.
28. Petisco, C., García-Criado, B., Vázquez-de-Aldana, B.R., Haro, A., and García-Ciudad, A. 2010. Measurement of quality parameters in intact seeds of Brassica species using visible and near-infrared spectroscopy. *Journal of Industrial Crops and Products*, 32, 139–146.
29. Piekarczyk, J. 2011. Winter oilseed-rape yield estimates from hyperspectral radiometer measurements. *Journal of Quaestiones Geographicae*, 30 (1), 77–84.
30. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, NASA SP-351 I*: 309-317.
31. Schwalbert, R.A., Amado, T.J.C., Nieto, L., Varela, S., Corassa, G.M., Horbe, T.A.N., Rice, C.W., Peralta, N.R., and Ciampitti, I.A. 2018. Forecasting maize yield at field scale based on high-resolution satellite imagery. *Biosystems Engineering* 171, 179-192.
32. Shanahan, J. F., Schepers, J. S., Francis, D. D., Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Tringe, J. M., Schlemmer, M. R., and Major, D. J. 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal* 93: 583-589.
33. Sulik, J.J., and Long, D.S. 2016. Spectral considerations for modeling yield of canola. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 184, 161–174.
34. Vigneau, N., Ecartot, M., Rabatel, G., and Roumet, P. 2011. Potential of field hyperspectral imaging as a nondestructive method to assess leaf nitrogen content in wheat. *Journal of Field Crops Res*, 122, 25–31.
35. Zhang, X., and He, Y. 2013. Rapid estimation of seed yield using hyperspectral images of oilseed rape leaves. *Journal of Industrial Crops and Products* 42: 416–420.
36. Zou, X.B., Shi, J.Y., Hao, L.M., Zhao, J.W., Mao, H.P., Chen, Z.W., Li, Y.X., and Holmes, M. 2011. In vivo noninvasive detection of chlorophyll distribution in cucumber (*Cucumis sativus*) leaves by indices based on hyperspectral imaging. *Anal. Journal of Analytica Chimica Acta*, 706, 105–112.



Potential assessment of spectral indices derived from OLI and Sentinel-2 sensors for estimation of canola vegetation at different growth stages

Naeim Loveimi^{1*}, Asadollah Akram², Nikrooz Bagheri³ and Ali Hajiahmad⁴

1. Research Instructor, Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahvaz, Iran
2. Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3. Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, AREEO, Karaj, Iran
4. Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Abstract

Because of its yellow flowers, canola has a different color than other crops, so it is necessary to identify the spectral indices associated with it. This study was conducted with evaluating OLI and Sentinel-2 sensors images at pre, early and peak flowering stages, as well as dry and green maturity of canola in 2016-2017. After processing the satellite images, a number of spectral indices were extracted and variations of their statistical indices were calculated and assessed. The results showed that the mean changes of spectral indices at different growth stages in both sensors followed a completely similar trend. Also, the trend of changes in standard deviation and coefficient of variation of spectral indices at different growth stages in the two sensors, despite the small differences, are very similar. Based on the results of analyzes, the best time, among the various growth stages, to estimate vegetation (biomass) by any spectral index was identified, to obtain the maximum amount of this index. Also, at the desired time, the potentials of each of spectral indices for vegetation estimation were assessed based on obtaining more of the coefficient of variation. Accordingly, the best time to estimate vegetation by the NDVI group (including NDVI, EVI, EVI2, GARI, GNDVI, MTVI2, and RVI), was the green maturity stage, and for the NDYI group (including NDYI, BNDVI and MTVI1), was the peak flowering stage. Also, among the indices of NDVI group, in green maturity stage, RVI and EVI, and among indices of NDVI group, in flowering stage, MTVI1 and NDYI, had more potential for vegetation estimation.

Key words: Canola, Growth Stages, Spectral Indices, OLI Sensor, Sentinel-2 Sensor

*Corresponding author

E-mail: n1584m@yahoo.com