

بررسی رفتار سری زمانی بازتاب طیفی و شاخص‌های پوشش گیاهی مزارع چغندر قند با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS

محسن بذرافشان^۱، یحیی امام^{۲*} و سید رشید فلاح شمسی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۱)

چکیده

فن‌آوری سنجنش از دور در پژوهش‌های محیط‌زیست و کشاورزی استفاده گسترده‌ای دارد و امروزه به منبع ارزشمند و مطمئنی از اطلاعات برای مدیریت تولید گیاهان زراعی و ارزیابی عرضه و تقاضای جهانی این محصولات تبدیل شده است. هدف از این پژوهش بررسی امکان استفاده از داده‌های سنجنده MODIS و شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر آنها جهت پایش رشد چغندر قند بود. به همین منظور از داده‌های بازتاب سطحی باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک این سنجنده در دوره‌های هشت روزه و تفکیک‌پذیری مکانی ۲۵۰ متر که از مجموعه MOD09Q1 بود، استفاده شد. داده‌ها در گستره زمانی دهه پایانی اردیبهشت تا دهه آغازین آذر ۱۳۹۰ و از مزارع چغندر قند منطقه اقلید استان فارس تهیه شد. نتایج نشان داد که اگرچه در آغاز دوره رشد چغندر قند تفاوت بازتاب نور قرمز و مادون قرمز نزدیک نسبتاً کم بود، اما با رشد و گسترش شاخساره و کامل شدن زمین پوش این تفاوت به بیشترین مقدار رسید. بیشترین جذب طیف قرمز و بازتاب مادون قرمز نزدیک در زمان بیشترین پوشش گیاهی و کاهش چشمگیر بازتاب مادون قرمز نزدیک و افزایش نسبی بازتاب قرمز در زمان برداشت مشاهده شد. توانایی شاخص RVI در نشان دادن وضعیت جذب و بازتاب نور قرمز در طول دوره رشد سایه‌انداز چغندر قند مشخص شد. هم‌چنین الگوی تغییرات شاخص‌های SR و NDVI به خوبی چگونگی رشد چغندر قند در طول زمان را نشان داد. بنابراین در شرایط اقلیمی و مدیریت زراعی موجود واحدهای کشاورزی استان و کشور، داده‌های MODIS و شاخص‌های پوشش گیاهی می‌توانند در پایش تغییرات رشد سایه‌اندازهای گیاهان زراعی از جمله چغندر قند کاربرد داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: سنجنش از دور، پایش رشد، باند قرمز و مادون قرمز نزدیک، SR، NDVI

۱. دانشجوی سابق دکتری زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز و عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

۲. استاد زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۳. دانشیار مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: yaemam@shirazu.ac.ir

مقدمه

قرمز نزدیک (۷۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر) است. در دامنه نور مرئی بیشینه جذب در بخش آبی و قرمز و بیشینه بازتاب در بخش سبز است.

کلروفیل و سایر رنگدانه‌های موجود در سلول‌های نردبانی برگ حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد نور آبی و قرمز را جذب و نور سبز را بازتاب می‌دهند، به همین دلیل پوشش‌های گیاهی عموماً سبز دیده می‌شوند. بازتاب طیف مادون قرمز نزدیک توسط بافت مزوفیل اسفنجی کنترل می‌شود و رنگدانه‌ها نقشی ندارند (۷). کوتیکول و اپیدرم نسبت به طیف مادون قرمز تقریباً به‌طور کامل شفاف هستند به‌طوری‌که مقدار بسیار ناچیزی از طیف مادون قرمز از بخش خارجی برگ بازتاب می‌یابد. با نزدیک شدن به مرحله رسیدگی و یا قرار گرفتن در معرض تنش، حمله آفات و بیماری‌ها رفتارهای طیفی گیاهان سبز نیز تغییر می‌کند. این تغییرات به‌طور همزمان در هر دو طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک رخ می‌دهد، اما اغلب در طیف مادون قرمز قابل مشاهده‌تر است. اهمیت طیف قرمز و مادون قرمز نزدیک به حدی است که به‌عنوان رایج‌ترین طیف‌های کاربردی در اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم ویژگی‌های پوشش‌های گیاهی استفاده می‌شوند (۲۳ و ۳۰).

در سنجنش از دور کاربردی، شاخص پوشش گیاهی طیفی (Spectral Vegetation Index) به منظور ارزیابی کمی و کیفی غیر تخریبی پوشش‌های گیاهی پیشنهاد و معرفی شده‌اند (۱۴). شاخص پوشش گیاهی در واقع عملیات ریاضی بین دو یا چند ارزش طیفی است که مقدار عددی (Digital Number=DN) را برای هر جزء تصویر (Pixel) بیان می‌نماید تا بتوان آن را به آسانی و با سرعت تفسیر نمود و نتیجه‌گیری کرد (۲۸). شاخص‌های پوشش گیاهی نسبت به کاربرد جداگانه هر طیف اطلاعات دقیق‌تر و سودمندتری را ارائه می‌نمایند. روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی شاخص‌های پوشش گیاهی پیشنهاد شده است (۲، ۱۵ و ۲۳).

ساده‌ترین و اولین شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص نسبت ساده (Simple Ratio=SR) و شاخص پوشش گیاهی

امروزه سنجنش از دور (Remote Sensing) به منبع ارزشمند و مطمئنی از اطلاعات برای مدیریت تولیدات کشاورزی و ارزیابی عرضه و تقاضای جهانی این محصولات تبدیل شده است. سنجنش از دور یک روش مشاهده غیرمستقیم و غیرتخریبی است که اطلاعات گسترده‌ای را در مورد پدیده‌ها (از جمله گیاهان زراعی) بدون تماس با آنها فراهم می‌آورد. اساس علم سنجنش از دور بر ثبت ویژگی‌های طیفی پدیده‌ها و جمع‌آوری اطلاعات بر پایه تجزیه و تحلیل انرژی دریافت شده از پدیده‌های مورد نظر است. سنجنده‌ها (Sensors) انرژی رسیده از پدیده را شناسایی، ثبت و پردازش می‌کنند. منبع این انرژی در کشاورزی و منابع طبیعی خورشید است.

ابزارهای سنجنش از دور، انرژی را در بخش‌های فرابنفش، مرئی، مادون قرمز و ریزموج طیف الکترومغناطیسی در دامنه‌ای از طول موج ۳۰۰ نانومتر تا ۳۰ سانتی‌متر آشکار می‌سازد (۱). بخش کوچکی از طیف الکترومغناطیس در کشاورزی کاربرد دارد که این باندهای طیفی شامل نور مرئی، مادون قرمز نزدیک و یک یا چند باند مادون قرمز میانی هستند.

فن‌آوری سنجنش از دور در پژوهش‌های محیط زیست و کشاورزی استفاده گسترده‌ای دارد (۲۰). امروزه از این فن‌آوری در تعیین سطح زیر کشت، پایش رشد و مراحل رویشی، برآورد کیفیت، تولید و عملکرد گیاهان زراعی، شناسایی و مدیریت بیماری‌ها و آفات، مدیریت آبیاری، بررسی وضعیت تغذیه و کمبود عناصر غذایی، تشخیص تنش‌های محیطی، برآورد خسارت تنش‌ها به تولید گیاهان زراعی، تهیه آمار کشاورزی، برنامه‌ریزی صادرات و واردات در سطح ملی و برقراری تعادل در بازار محصولات استفاده می‌شود.

بسیاری از کاربردهای سنجنش از دور در کشاورزی و منابع طبیعی به آگاهی از ویژگی‌های طیفی برگ گیاهان بستگی دارد (۱۱ و ۳۰). الگوی واکنش طیفی گیاهان سالم، نشان از جذب بالای انرژی الکترومغناطیس تابش خورشیدی در دامنه نور مرئی (۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) و بازتاب شدید در دامنه نور مادون

چغندر قند و بهره‌گیری از آنها در پایش و شناسایی محصول، تعیین سطح زیر کشت، برآورد عملکرد و پیش‌بینی تولید، مدیریت آب و تغذیه و مدیریت آفات و بیماری‌ها و علف‌های هرز بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شهرستان اقلید در شمال استان فارس در محدوده جغرافیایی ۵۲ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۳ دقیقه عرض شمالی بود که دارای بیشترین سطح زیر کشت و تولید چغندر قند استان است. کشت چغندر قند در این منطقه به‌صورت فاریاب و زمان کاشت از دهه سوم اردیبهشت آغاز و تا پایان خرداد ادامه دارد. برداشت چغندر قند از ابتدای مهر آغاز و تا اوایل آذر به درازا می‌انجامد. میانگین بارندگی سالانه شهرستان اقلید ۳۳۰ میلی‌متر، میانگین رطوبت نسبی ۳۳ درصد، میانگین دمای سالانه ۱۲/۸ درجه سانتی‌گراد، میانگین حداکثر و حداقل مطلق دما به ترتیب ۳۴/۵ و ۱۳/۶- درجه سانتی‌گراد است. در این منطقه به‌طور میانگین ۵۰ روز بارانی و ۸۶ روز یخبندان وجود دارد. این منطقه از نظر طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه و دومارتن جزو اقلیم نیمه خشک و مطابق روش کریمی دارای اقلیم نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان سرد است.

برای انجام این پژوهش از تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد. سنجنده خورشید آهنگ MODIS که بر روی دو ماهواره Terra و Aqua قرار دارد، هر ۱-۲ روز از تمامی سطح کره زمین تصویربرداری می‌نماید (۳). این سنجنده دارای سه تفکیک‌پذیری مکانی (Spatial Resolution) ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر است که به ترتیب در دو، هفت و ۳۶ باند طیفی جداگانه از طول موج ۴۰۰ تا ۱۴۴۰۰ نانومتر داده‌های مختلف را جمع‌آوری می‌نماید. ماموریت سنجنده MODIS جهت مطالعه منابع زمینی، اقیانوسی و اتمسفری در سال ۱۹۹۸ توسط ناسا آغاز شد.

تعداد ۲۲ تصویر سنجنده MODIS از مجموعه فرآورده

نسبی (Ratio Vegetation Index=RVI) هستند که عکس یکدیگرند و برای برآورد و پایش پوشش گیاهی به کار می‌روند (۱۶). رایج‌ترین شاخص پوشش گیاهی، شاخص پوشش گیاهی اختلافی نرمال شده (Normalized Difference Vegetation Index =NDVI) است. مقدار این شاخص از +۱ تا -۱ متغیر است، پوشش‌های گیاهی سالم دارای مقدار مثبت، سطوح بدون پوشش مانند آب، برف، یخ یا ابرها دارای مقدار منفی و خاک بدون پوشش دارای مقدار نزدیک صفر است (۱۹). پوشش‌های گیاهی تنش‌دیده و یا با تراکم کم دارای مقدار مثبت کمتری هستند اما پوشش‌های متراکم و سایه‌اندازهای چند لایه دارای مقادیر بیشتری هستند. در طول یک فصل رشد با افزایش سطح برگ و پوشش گیاهی شاخص NDVI نیز افزایش یافته و بیشینه مقدار آن با بیشینه سطح برگ، همزمان است. با نزدیک شدن به پایان فصل و پیری اندام‌های هوایی این شاخص نیز کاهش می‌یابد.

از نسبت بازتاب طول موج‌های مادون قرمز به قرمز جهت تعیین درصد پوشش زمین توسط برگ‌های سبز و سالم چغندر قند استفاده شد (۲۴). شاخص NDVI نیز به‌عنوان یک نشانه خوب برای تفاوت بین رشد و گسترش برگ چغندر قند در آغاز تابستان گزارش شد (۱۴). هم‌چنین استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی تعدیل‌کننده بازتاب خاک در تعیین پوشش گیاهی ناشی از سایه‌انداز چغندر قند موفقیت‌آمیز بوده است (۲۹).

در صنعت قند برآورد تولید چغندر قند اهمیت بسیاری دارد زیرا برای فصل فرآوری قند و شکر باید سرمایه، نیروی انسانی و مواد اولیه مورد نیاز پیش‌بینی شود. روش‌های مبتنی بر نمونه‌برداری از مزارع پیش از آغاز برداشت زمان‌بر، نیازمند نیروی انسانی و صرف هزینه است. داده‌های سنجنش از دور با فراهم آوردن اطلاعات در سطح منطقه با قابلیت تکرار زمانی توانایی برآورد عملکرد چغندر قند و تولید نهایی را دارند. هدف از این پژوهش بررسی امکان استفاده از داده‌های سنجنده (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) MODIS و شاخص‌های مبتنی بر آنها جهت مطالعه رشد و نمو محصول

شده برای هموارسازی (Smoothing) و محاسبه مشتقات مجموعه‌ای از مقادیر متوالی است. با این روش اختلالات باقی‌مانده در داده‌های ماهواره‌ای که ناشی از وجود آلودگی‌های جوی، تصحیح اتمسفری ناقص و یا زاویه نامناسب سنجنده در هنگام تصویربرداری است، به‌طور مؤثری از بین می‌رود. در نهایت داده‌های تراز شده می‌تواند وضعیت رشد گیاه زراعی در طول زمان را به‌طور واقعی بیان نماید.

تغییر سیستم مختصات تصاویر ماهواره‌ای و استخراج ارزش عددی هر جزء تصویر توسط نرم‌افزار ENVI نسخه 4.3 صورت گرفت. اعمال فیلتر ساویتسکی - گلای با نرم‌افزار Table Curve 2D نسخه 5.01 روی مجموعه زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی انجام شد. با استفاده از نرم‌افزار Origin Pro نسخه 9.0.0 SR1 همبستگی ساده بین باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک و شاخص‌های پوشش گیاهی ساخته شده محاسبه گردید.

نتایج و بحث

روند تغییرات فصلی بازتاب قرمز و مادون قرمز نزدیک در مزارع چغندرقد در شکل ۱ نشان داده شده است. قبل از کاشت گیاه زراعی (تا پایان اردیبهشت) بازتاب نور قرمز (۰/۱۹۵) و مادون قرمز نزدیک (۰/۲۹۷) اختلاف نسبتاً کمی (۰/۱۰۲) داشتند، سطح زمین بدون پوشش گیاهی و بازتاب تنها تحت تأثیر خاک بدون پوشش بود. این اختلاف با سبز شدن گیاهچه و استقرار آن (از آغاز خرداد تا نیمه تیر) کمی بیشتر شد (۰/۱۵۳). در واقع در این حالت پوشش گیاهی بسیار کم و سطح کمی از زمین را پوشانده بود و عمده بازتاب سهم خاک بدون پوشش بود.

با گذشت زمان و رشد بیشتر گیاه زراعی در طول دوره رشد، الگوی تغییرات بازتاب نیز تغییر کرد. با گسترش اندام هوایی گیاه و افزایش سطح برگ و پوشش بیشتر سطح خاک این اختلاف (۰/۲۵۸) بیشتر شد. کمترین بازتاب (یا بیشترین جذب) طیف قرمز (۰/۱۵۶) و هم‌چنین بیشترین بازتاب مادون

MODIS Terra/Aqua Surface Reflectance 8-) MOD09Q1 (Day L3 Global 250 m, Collection 5) مربوط به نیمه ماه می تا آغاز ماه نوامبر سال ۲۰۱۱ (دهه پایانی اردیبهشت تا دهه آغازین آذر ۱۳۹۰) از سامانه MODAPS (the MODIS Adaptive Processing System) به فرمت HDF-EOS (Hierarchical Data Format-Earth Observing System) دانلود شد (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool). فرآورده MOD09Q1 دارای داده‌های بازتاب سطحی در دو باند قرمز (۶۲۰ تا ۶۷۰ نانومتر) و مادون قرمز نزدیک (۸۴۱ تا ۸۷۶ نانومتر) در مجموعه‌های هشت روزه در تفکیک‌پذیری مکانی ۲۵۰ متر و به‌صورت مجموعه بیشترین مقدار (Maximum Value Composite=MVC) است (۲۷). تاریخ هر مجموعه نشان‌دهنده روز آغازین هر دوره است. بر روی این مجموعه‌ها پیش پردازش‌های مقدماتی شامل زمین مرجع نمودن، تصحیح رادیومتری و اتمسفری انجام شده است. داده‌های قاب تصویر ردیف ۲۲ و ستون ۵ (tile H22, V05) که منطقه مورد مطالعه در آن قرار داشت، پس از دانلود از سیستم مختصات Sinusoidal به سیستم طول و عرض جغرافیایی WGS-1984 تبدیل شد. برای انجام این مطالعه تعداد ۲۰ مزرعه چغندرقد انتخاب، مختصات آنها توسط گیرنده دستی سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) مدل گارمین مشخص و نقشه هر یک تهیه و به‌صورت چند ضلعی (Polygon) روی تصویرها قرار داده شد.

برای هر مجموعه هشت روزه با استفاده از دو باند قرمز و مادون قرمز تعدادی از شاخص‌های پوشش گیاهی به‌صورت سری‌های زمانی (Time-Series) محاسبه شد که در جدول ۱ آورده شده است. اگرچه در تهیه این شاخص‌ها از مجموعه بیشترین مقدار هر باند استفاده شد، اما به‌دلیل وجود اختلال (Noise) در تهیه سری‌های زمانی با کیفیت عالی، روش کاهش اختلال فیلتر ساویتسکی - گلای (Savitzky-Golay filter=SG) به‌کاربرده شد (۲۱). پیشنهاد ساویتسکی - گلای که در سال ۱۹۶۴ ارائه شد براساس پیچشی از برازش کمترین مربعات ساده

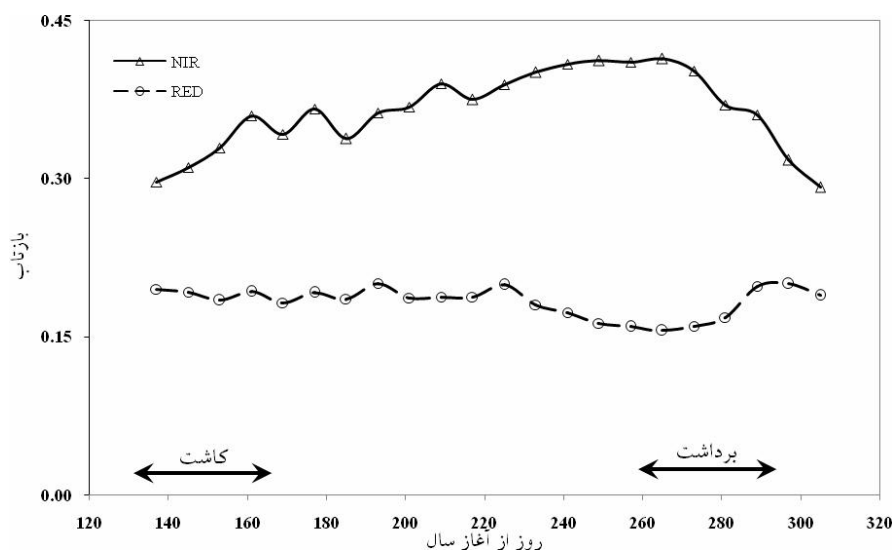
جدول ۱. شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده شده در این پژوهش و روش محاسبه آنها

شاخص پوشش گیاهی	معادله	منبع
Simple Ratio (SR)	NIR/RED	(۶)
Ratio Vegetation Index (RVI)	RED/NIR	(۲)
Difference Vegetation Index (DVI)	$NIR-RED$	(۲)
Modified Simple Ratio (MSR)	$[(NIR/RED)-1]/[(NIR/RED)+1]^{0.5}$	(۸)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(NIR-RED)/(NIR+RED)$	(۲)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$[(NIR-RED)/(NIR+RED+L)]*(1+L)$	(۲۳)
Transformed Vegetation Index (TVI)	$(NDVI+0.5)^{0.5}$	(۲)
Enhanced Vegetation Index 2 (EVI2)	$2.5*(NIR-RED)/(1+NIR+2.4RED)$	(۱۸)
Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)	$(2NIR+1-[(2NIR+1)^2-8(NIR-RED)]^{0.5})/2$	(۲۳)
Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI)	$(0.1*NIR-RED)/(0.1*NIR+RED)$	(۱۲)
Weighted Difference Vegetation Index (WDVI)	$NIR-\alpha.RED$	(۹)

NIR = بازتاب در باند مادون قرمز (باند ۲) RED = بازتاب در باند قرمز (باند ۱)

L = ضریب تصحیح برای پوشش گیاهی که عموماً آن را ۰/۵ در نظر می‌گیرند.

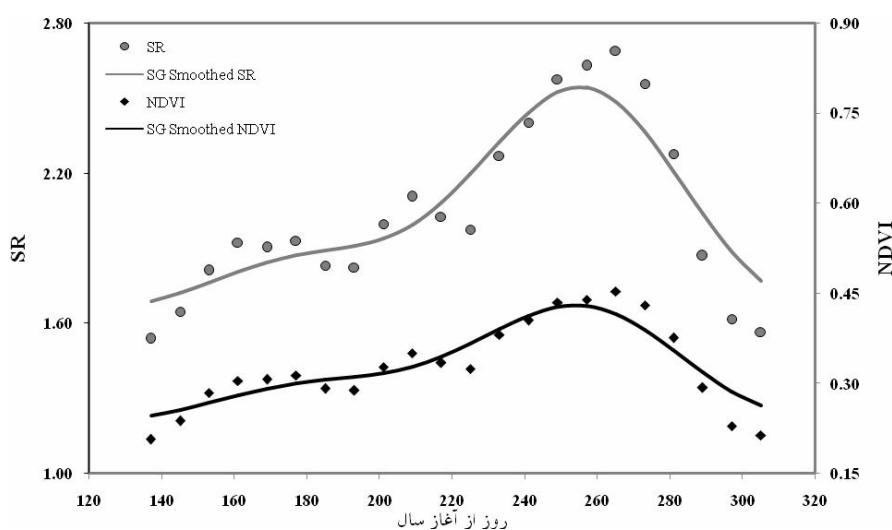
α = نسبت بازتاب طول موج‌های مادون قرمز نزدیک به قرمز از سطح خاک بدون پوشش



شکل ۱. روند تغییرات بازتاب طول موج‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک در طول دوره رشد چغندر قند در منطقه اقلید

سبز شدن تا زمان سایه‌اندازی کامل مقدار بازتاب نور قرمز ۲۰ درصد (از ۰/۱۹۵ به ۰/۱۵۶) کاهش و طیف مادون قرمز نزدیک ۴۲ درصد (از ۰/۲۹۷ به ۰/۴۱۴) افزایش یافت. با فرا رسیدن زمان برداشت (از آغاز مهر) این وضعیت

قرمز نزدیک (۰/۴۱۴) در زمان بیشترین پوشش گیاهی و سطح برگ از نیمه مرداد تا پایان شهریور مشاهده گردید. در این گستره زمانی شاخساره شاداب بوده، دارای بیشترین سطح برگ بود و بدون تنش به رشد خود ادامه می‌داد. به‌طور کلی از آغاز



شکل ۲. روند تغییرات بازتاب شاخص‌های SR و NDVI در طول دوره رشد چغندرقد در منطقه اقلید

شده است. باند قرمز با باند مادون قرمز نزدیک همبستگی منفی و معنی‌داری ($-0/632$) داشت، به این معنی که تغییرات دو باند برخلاف یکدیگر بود. در طول دوره رشد نیز افزایش جذب باند قرمز با بازتاب بیشتر باند مادون قرمز همراه بود (شکل ۱). باند قرمز فقط با شاخص RVI همبستگی مثبت و معنی‌داری ($0/826$) نشان داد. روند تغییرات شاخص RVI نشان داد که این شاخص به خوبی در نشان دادن وضعیت جذب و بازتاب نور قرمز در طول دوره رشد سایه‌انداز چغندرقد توانایی داشت (شکل‌های ۱ و ۳).

باند مادون قرمز نزدیک فقط با شاخص RVI همبستگی بسیار قوی و منفی معنی‌داری ($-0/953$) داشت اما با دیگر شاخص‌ها همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد. شاخص‌های SR، NDVI، DVI، MSR، EVI2، RVI، TVI، WDRVI، SAVI، WDAVI و MSAVI2 با یکدیگر همبستگی مثبت و معنی‌داری داشتند و روندشان در طول دوره رشد شبیه به یکدیگر بود (شکل‌های ۲ و ۳).

الگوی تغییرات فصلی شاخص SR در شکل ۲ نشان داده شده است. مقدار شاخص SR در طول دوره رشد متفاوت بود. این شاخص پیش از کاشت در کمترین مقدار خود بود ($1/538$) و با سبز شدن گیاهچه‌ها، استقرار بوته‌ها و گسترش سایه‌انداز

دوباره دستخوش تغییرات شد و به حالت آغازین دوره رشد باز گشت. برداشت مزارع چغندرقد در گستره زمانی مهر و آبان سبب کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش چشمگیر بازتاب مادون قرمز نزدیک ($0/292$) و افزایش نسبی بازتاب قرمز ($0/189$) شد (شکل ۱). این تغییر در نهایت به جایی رسید که اختلاف این دو طیف همانند آغاز فصل گریدید ($0/103$) که بازتاب تنها تحت تأثیر خاک بدون پوشش بود.

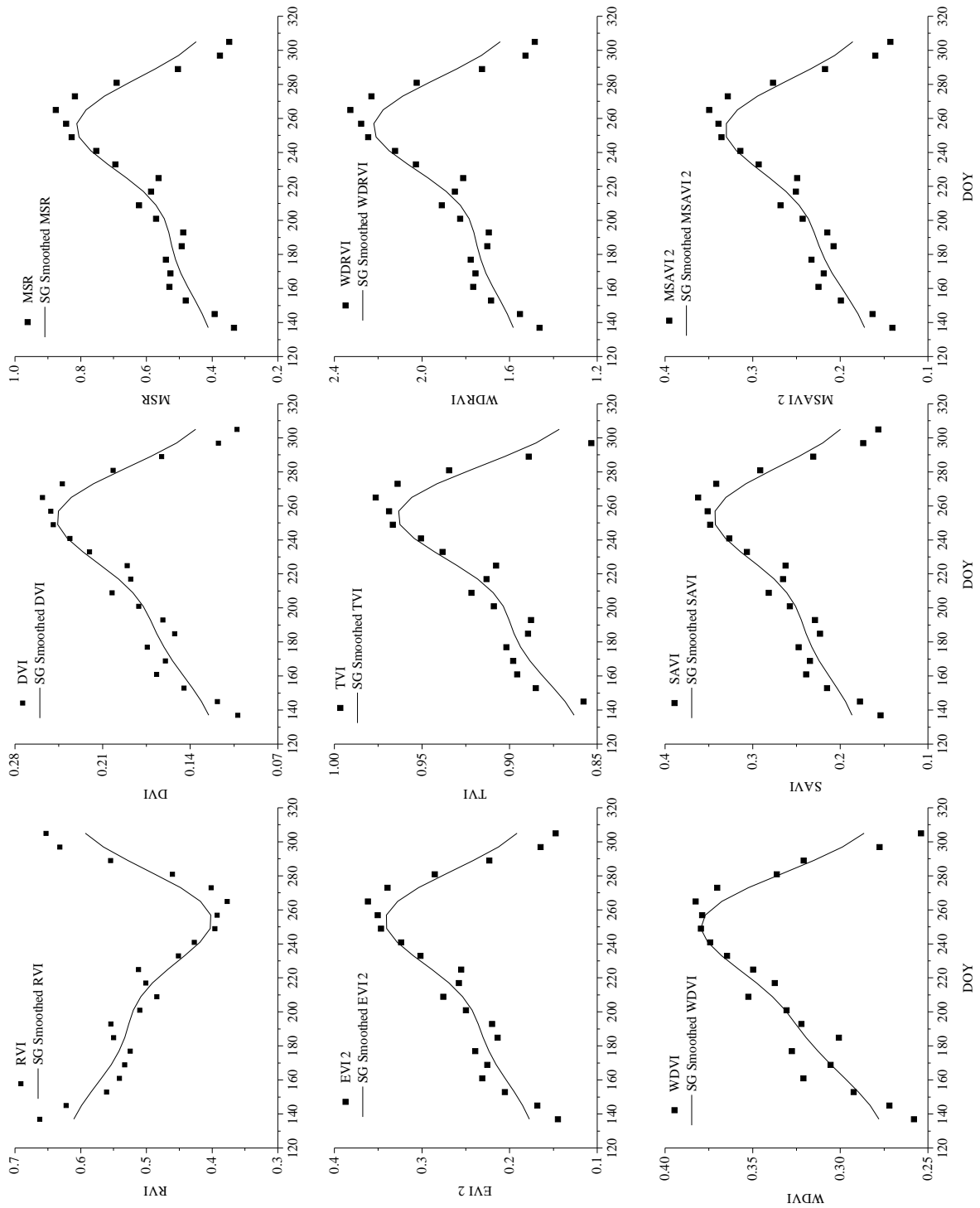
در بررسی‌های الگوی تغییرات بازتاب طیفی در سایه‌اندازهای گیاهان زراعی مانند برنج (۵)، گندم (۲۶)، چغندرقد (۲۴) و ذرت و سویا (۱۰)، روند افزایشی بازتاب مادون قرمز و هم‌چنین افزایش جذب طول موج قرمز و به عبارتی کاهش بازتاب این طیف در نتیجه رشد و گسترش سایه‌انداز گیاه زراعی مورد توجه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در اثر تنش‌های زیستی و یا محیطی این روند تغییر می‌کند. برای مثال در شرایط کمبود نیتروژن، بازتاب نور مرئی و مادون قرمز دور به ترتیب به دلیل کم شدن مقدار کلروفیل و کاهش لایه‌های سلولی کاهش یافت (۲۵).

انتخاب شاخص یا شاخص‌های مناسب برای پایش رشد گیاهان زراعی اهمیت ویژه‌ای دارد. نتایج همبستگی بین دو باند اصلی و شاخص‌های به‌دست آمده از آنها در جدول ۲ آورده

جدول ۲. ضریب همبستگی ساده پیرسون و سطح معنی‌داری بین دو باند اصلی و شاخص‌های پوشش گیاهی

شاخص	RED	NIR	SR	RVI	NDVI	DVI	MSR	EVI2	TVI	WDRVI	WDVI	SAVI	MSAVI 2
شاخص	RED												
پوشش گیاهی		NIR											
		SR											
		RVI											
		NDVI											
		DVI											
		MSR											
		EVI2											
		TVI											
		WDRVI											
		WDVI											
		SAVI											
		MSAVI 2											

* و **: به ترتیب به معنی دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪



شکل ۳. روند تغییرات شاخص های RVI، DVI، MSR، WDRVI، TVI، EVI2، SAVI و WDV در دوره رشد چندرشد در منطقه اقلید

دیده شد. در این گیاه چون در سال اول رسیدگی فیزیولوژیکی رخ نمی‌دهد و هم‌چنین شرایط اقلیمی سبب از بین رفتن برگ و کاهش اندام هوایی و یا تغییر رنگ برگ نمی‌گردد، بلکه هوای خنک موجب افزایش دوام سطح برگ نیز می‌شود، برخلاف بسیاری از گیاهان زراعی دیگر، بازتاب طول موج مادون قرمز نزدیک و جذب نور قرمز به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در واقع کاهش بازتاب مادون قرمز نزدیک و هم‌چنین کاهش جذب طول موج قرمز به دلیل کاهش پوشش سایه‌انداز گیاهی در مزارع چغندر قند به دلیل انجام عملیات برداشت بوده است. در گیاهانی زراعی مانند گندم، جو، ذرت و آفتابگردان پیش از برداشت و در زمان دانه‌بندی و رسیدگی به دلیل پیری برگ و از بین رفتن تدریجی کلروفیل بخش قابل توجهی از برگ‌ها، کاهش چشمگیر بازتاب مادون قرمز نزدیک به همراه افزایش بازتاب طیف قرمز رخ داده و شاخص NDVI نیز حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد (۲۲).

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای و فنون سنجش از دور در شرایط اقلیمی و مدیریت زراعی در واحدهای کشاورزی استان و کشور در پایش تغییرات رشد سایه‌اندازهای گیاهان زراعی از جمله چغندر قند مناسب هستند. در واقع توانایی مجموعه بیشترین مقدار داده‌های بازتاب سطحی دو باند قرمز و مادون قرمز نزدیک سنجنده MODIS در دوره‌های هشت روزه و در تفکیک‌پذیری مکانی ۲۵۰ متر و شاخص‌های پوشش گیاهی ساخته شده از آنها به‌ویژه SR و NDVI به تأیید رسید. با استفاده از این فن‌آوری می‌توان نهاده‌های مصرفی را (به‌ویژه در راه کمک به حل بحران کم‌آبی) به‌طور بهینه مدیریت نمود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از پشتیبانی مالی و تدارکاتی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس قدردانی به‌عمل می‌آید.

روندی افزایشی داشت (۱/۸۴۱). در زمان بیشترین پوشش گیاهی که هم‌زمان با بیشترین بازتاب طیف مادون قرمز نزدیک و کمترین بازتاب نور قرمز بود مقدار شاخص SR نیز به اوج خود رسید (۲/۶۹۱). با آغاز برداشت مزارع چغندر قند مقدار این شاخص کاهش یافت و همانند ابتدای فصل شد (۱/۵۶۵). تغییرات مورفولوژیک سایه‌انداز سبب بروز تغییر در شاخص‌های پوشش گیاهی می‌شود (۱۳). نسبت طیفی SR، شاخصی مناسب برای تغییرات پوشش گیاهی در سطح‌های بزرگ بوده و با تابش دریافتی توسط سایه‌انداز گیاهی ارتباط دارد (۱۷). در آغاز، کاربرد SR به‌عنوان یک شاخص موفق در پایش رشد در برنج و گندم نشان داده شده است (۵ و ۲۶). چنین وضعیتی در مورد گیاهان سالم چغندر قند نیز گزارش شده و به‌عنوان اولین شاخص برای پایش رشد پوشش گیاهی چغندر قند معرفی شده است (۲۴). در چغندر قند از رابطه این شاخص با سطح پوشش سایه‌انداز گیاهی جهت برآورد تابش دریافتی استفاده شده است. رخداد تنش‌های محیطی (خشکی)، کمبود عناصر غذایی و یا خسارت آفات و بیماری‌ها کاربرد این شاخص را محدود می‌نماید.

شاخص NDVI به‌عنوان پرکاربردترین شاخص در بررسی پوشش سبز و پایش رشد گیاهان معرفی شده است (۱۴). روند تغییرات این شاخص نسبت به زمان نیز همانند شاخص SR، اما مقدار شاخص NDVI به مراتب کمتر از آن بود (شکل ۲). پیش از کاشت، مقدار این شاخص ۰/۲۰۷ بود که پس از سبز شدن گیاهچه‌ها استقرار بوته‌ها و گسترش سایه‌انداز به ۰/۲۹۰ رسید. در زمانی که سایه‌انداز چغندر قند بیشترین سطح خاک را پوشانیده بود، NDVI نیز با ۰/۴۵۴ دارای بیشترین مقدار بود. اما پس از آغاز برداشت از مقدار این شاخص کاسته شد و به ۰/۲۱۴ رسید. شاخص NDVI نیز به روشنی وضعیت پوشش سبز مزارع چغندر قند در طول دوره رشد را نشان داد. اهمیت این شاخص از آغاز دهه ۱۹۸۰ میلادی در پایش رشد و برآورد عملکرد گیاهان زراعی مورد تأکید قرار گرفت (۴).

بیشترین مقدار دو شاخص SR (۲/۶۹۱) و NDVI (۰/۴۵۴) در شهریورماه و درست پیش از آغاز برداشت مزارع چغندر قند

منابع مورد استفاده

1. Aronoff, S. 2005. Remote sensing basics. PP. 53-68, *In: S. Aronoff (Ed.), Remote Sensing for GIS Managers*. ESRI Press, Redlands, CA.
2. Bannari, A., D. Morin, F. Bonn and A. Huete. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* 13:95-120.
3. Barnes, W.L., T.S. Pagano and V.V. Salomonson. 1998. Prelaunch characteristics of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36:1088-1100.
4. Becker-Reshef, I., E. Vermote, M. Lindeman and C. Justice. 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 114:1312-1323.
5. Berg, J., G. Flouzat and S.G. De Paratesi. 1978. Agreste Project: Agricultural Resources Investigations in Northern Italy and Southern France: Final Report Commission of the European Communities, Nasa.
6. Birth, G.S. and G. R. McVey. 1968. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal* 60:640-643.
7. Campbell, J.B. 2011. Introduction to Remote Sensing . Guilford Press, New York.
8. Chen, J. M. 1996. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. *Canadian Journal of Remote Sensing* 22:229-242.
9. Clevers, J. G. P.W., C. B ker, H. J. C. van Leeuwen and B. A. M. Bouman. 1994. A framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information. *Remote Sensing of Environment* 50:161-170.
10. Doraiswamy, P.C., J.L. Hatfield, T.J. Jackson, B. Akhmedov, J. Prueger, and A. Stern. 2004. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment* 92:548-559.
11. Gausman, H., W. Allen, R. Cardenas and A. Richardson. 1970. Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity. *Applied Optics* 9:545-552.
12. Gitelson, A. A. 2004. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology* 161:165-173.
13. Hatfield, J. L., A. A. Gitelson, J. S. Schepers and C. Walthall. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal* 100:S117-131.
14. Hoffmann, C. and M. Blomberg. 2004. Estimation of leaf area index of *Beta vulgaris* L. based on optical remote sensing data. *Journal of Agronomy and Crop Science* 190:197-204.
15. Jackson, R. D. and A. R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine* 11:185-200.
16. Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50: 663-666.
17. Kumar, M. and J. Monteith. 1981. Remote sensing of crop growth, PP. 133-144, *In: H. Smith (Ed.), Plants and the Daylight Spectrum*. British Photobiology Society, Leicester, UK.
18. Miura ,T., H. Yoshioka, K. Fujiwara and H. Yamamoto. 2008. Inter-comparison of ASTER and MODIS surface reflectance and vegetation index products for synergistic applications to natural resource monitoring. *Sensors* 8:2480-2499.
19. Mkhabela, M. S., P. Bullock, S. Raj, S. Wang and Y. Yang. 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology* 151:385-393.
20. Nellis, M. D., K. P. Price and D. Rundquist. 2009. Remote sensing of cropland agriculture. *The SAGE Handbook of Remote Sensing* 1:368-380.
21. Ren, J., Z. Chen ,Q. Zhou and H. Tang. 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10:403-413.
22. Sanaienejad, S.H., A. R. Shah Tahmasbi, R. Sadr Abadi Haghighi and K. Kelarestani. 2008. A study of spectral reflection on wheat fields in Mashhad using MODIS data. *Journal of Crop Production and Processing* 12: 11-19. (In Farsi).
23. Silleos, N. G., T. K. Alexandridis, I. Z. Gitas and K. Perakis. 2006. Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. *Geocarto International* 21:21-28.
24. Steven, M., P. Biscoe and K. Jaggard. 1983. Estimation of sugar beet productivity from reflection in the red and infrared spectral bands. *International Journal of Remote Sensing* 4:325-334.
25. Thomas, J. and G. Oerther. 1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. *Agronomy Journal* 64:11-13.
26. Tucker, C. J., B. N. Holben, J. H. Elgin Jr and J. E. McMurtrey III. 1981. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment* 11:171-189.
27. Vermote, E. F., S.Y. Kotchenova and J. P. Ray. 2011. MODIS surface reflectance user's guide. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility, Version 1.3.1.

28. Viña, A., A. A. Gitelson, A. L. Nguy-Robertson and Y. Peng. 2011. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment* 115:3468-3478.
29. Vyas, S., M. Steven and K. Jaggard. 1997. Leaf area estimation for sugar beet yield prediction using ERS-SAR data. *European Space Agency-Publications-ESA SP* 414:237-240.
30. Wood, G. A., J. C. Taylor and R. J. Godwin. 2003. Calibration methodology for mapping within-field crop variability using remote sensing. *Biosystems Engineering* 84:409-423.