



سنجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال پانزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲
Vol.15, No. 1, Spring 2023

۱-۱۵

مقاله پژوهشی

برآورد شاخص سطح برگ محصول ذرت با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲

مأنده بهی فرا^۱، حسین عقیقی^{۲*}، علی اکبر متکان^۳، حمید صالحی شهبازی^۴

۱. مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران
۲. استادیار، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۳. استاد مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۴. دانشجوی دکتری مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۰۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۱

چکیده

شاخص سطح برگ استخراج شده (LAI) از تصاویر سنجش از دور پارامتر مهمی، به منظور مدل سازی مکانی تولید پوشش گیاهی، محسوب می شود. معمولاً شاخص های پوشش گیاهی که با بازتاب طول موج های قرمز و مادون قرمز نزدیک محاسبه می شوند، در برآورد LAI با استفاده از روش های آماری، به کار می روند اما بسیاری از این شاخص ها در مقادیر متفاوت LAI به اشباع می رسند. برای رفع این محدودیت، بازتاب محدوده لبه قرمز استفاده شده است؛ بنابراین، باید قابلیت شاخص های متفاوت پوشش گیاهی استخراج شده از داده های سنجش از دور، برای برآورد LAI ذرت علوفه ای، ارزیابی شود. بدین منظور پنج مرحله نمونه برداری میدانی، با فاصله زمانی نزدیک به گذر ماهواره سنتینل-۲، از سوی مرکز تحقیقات فضایی پژوهشگاه فضایی ایران، اجرا شد و در مجموع، ۲۳۴ نمونه از مزارع ذرت علوفه ای شرکت کشت و صنعت مگسال قزوین برداشت شد. سپس سیزده شاخص پوشش گیاهی متفاوت، با استفاده از سری زمانی تصاویر سنتینل-۲، محاسبه شد و برای برآورد آماری مقادیر LAI به کار رفت. نتایج نشان داد که شاخص EVI با ضریب همبستگی ۰/۷۶ برای برآورد شاخص سطح برگ ذرت علوفه ای بهترین عملکرد را داشته است. علاوه بر این، مقدار RMSE روش های رگرسیون غیر خطی بیشتر از روش های خطی بوده است.

کلیدواژه ها: ذرت علوفه ای، سنجش از دور، شاخص پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS. تلفن: ۰۲۱-۲۹۹۰۲۲۸۳

۱- مقدمه

مزرعه کاری وقت گیر و پرهزینه شمرده می شود و امکان تکرار آن، در طول دوره رشد محصولات، محدود است. در مقابل، استفاده از تکنولوژی سنجش از دور امکان اندازه گیری دوره ای شاخص سطح برگ را بدون نیاز به تخریب گیاهان و یا حضور در مزرعه، فراهم می کند.

تحقیقات گوناگونی شاخص سطح برگ گیاه را با استفاده از سنجش از دور، برآورد کرده اند که می توان آنها را به دو گروه روش های آماری و مدل های فیزیکی تقسیم کرد (Rivera Caicedo, 2014). روش های آماری یک یا چندمتغیره جزء متداول ترین شیوه های برآورد پارامترهای پوشش گیاهی از داده های سنجش از دور محسوب می شوند. در این روش ها، رابطه آماری بین پارامتر مورد بررسی و اطلاعات طیفی تصاویر ماهواره ای (یا تبدیل های اطلاعات طیفی موجود در تصویر) تعیین می شود و در برآورد کمیّت مورد نظر به کار می رود. شاخص های پوشش گیاهی یکی از متداول ترین این تبدیل های بانندی اند. شاخص های پوشش گیاهی متفاوتی برای برآورد شاخص سطح برگ گیاه به کار برده شده اند (Gong et al., 1992; Mutanga and Skidmore, 2004; Deng et al., 2006; Zheng and Moskal, 2009; Neinavaz et al., 2016).

کلورز^۱ و همکاران (۲۰۱۷) شاخص سطح برگ و کلروفیل تاج پوشش گیاه سیب زمینی را با استفاده از تصاویر سنتینل-۲^۲ در منطقه Dutch-Belgian هلند برآورد کردند. ده پلات ۳۰ در ۳۰ مترمربعی، با سطح کوددهی متفاوت، در مزارع سیب زمینی انتخاب و از این پلات ها، هر ده روز یکبار در دوره رشد محصول، نمونه برداری شد و شاخص های $WDVI^3$ ، $CI_{red\ edge}$ و CI_{green}^4 ، $TCARI/OSAVI^5$ برای برآورد کلروفیل و شاخص سطح برگ ارزیابی شد. در

گیاهان بیش از ۷۰٪ مساحت سطح زمین را پوشانده اند و مهم ترین تولیدکننده مواد آلی سطح زمین محسوب می شوند (Liu et al., 2014). پوشش گیاهی، از طریق فتوسنتز، انرژی و مواد آلی بیشتر اکوسیستم ها را فراهم می کند. برگ ها واسطه تبادل انرژی، کربن و آب بین گیاه و اتمسفرند و سطح برگ با مقدار ماده گیاهی قادر به فتوسنتز مرتبط است. کمیّت برگ های هر گیاه با اندازه گیری شاخص سطح برگ بیان می شود. شاخص سطح برگ به صورت مجموع مساحت یک سمت برگ سبز در واحد سطح افقی زمین تعریف می شود (Chen & Black, 1992; GCOS-138, 2010). شاخص سطح برگ پارامتر مهمی است که وضعیت توسعه فعلی گیاه و میزان رشد آن در آینده را نشان می دهد (Baret et al., 2010). سطح برگ میزان تعرق و تنفس گیاه را کنترل می کند و از راه جذب دی اکسید کربن و بخار آب، نقش مهمی در تبادل گاز بین اکوسیستم های خشکی و اتمسفر دارد (Neinavaz et al., 2016). همچنین در بسیاری از مدل های سطح زمین که تبادل ماده و انرژی را بین پوشش گیاهی و اتمسفر بررسی می کنند، متغیر مهمی به شمار می رود (Liu et al., 2013). شاخص سطح برگ ورودی لازم برای بسیاری از مدل های کشاورزی، اقلیمی، اکولوژی و هیدرولوژی (مانند مدل های فتوسنتز تاج پوشش، مدل های تبخیر، مدل های تعرق، مدل های بارش، مدل های رشد محصول و مدل های تولید اولیه) محسوب می شود (Chen et al., 1999; Propastin & Erasmi, 2010).

روش های میدانی اندازه گیری شاخص سطح برگ دو گونه است. در روش های مستقیم، برگ های گیاه جدا می شود و مجموع سطح آنها اندازه گیری می شود؛ سپس اندازه گیری ها به سطح کل مزرعه تعمیم می یابد. اما در برخی روش ها، به صورت غیرمستقیم و بدون تخریب برگ های گیاه، با استفاده از تجهیزات اندازه گیری میدانی، اندازه گیری را انجام می دهند. در هر دو صورت، اندازه گیری شاخص سطح برگ در سطح

1. Clevers
2. Sentinel-2
3. Weighted Difference Vegetation Index
4. Chlorophyll Vegetation Index
5. Chlorophyll Index

نشان می‌دهد، با استفاده از باندهای لبه‌قرمز ماهواره سنتینل-۲، می‌توان دقت برآورد کلروفیل را بهبود بخشید (Delegido et al., 2011).

ورلست^۵ و همکاران (۲۰۱۵) روش‌های آمار پارامتریک، ناپارامتریک و مدل‌های فیزیکی برای برآورد LAI را با استفاده از تصاویر سنتینل-۲، مقایسه کردند. تمامی شاخص‌های دو و سه‌باندی ممکن از باندهای طیفی سنتینل-۲ به دست آمد و از طریق رگرسیون خطی، برای برآورد LAI مدل‌سازی شد. در این روش‌ها، بهترین نتیجه از یک شاخص سه‌باندی (با استفاده از باندهای ۳، ۱۱ و ۱۲ ماهواره سنتینل-۲) با ضریب همبستگی ۰/۸۲ و خطای RMS ۰/۶۲ حاصل شد. در مورد شیوه‌های ناپارامتریک، یازده روش رگرسیون یادگیری ماشینی بررسی شد. از بین روش‌های متفاوت، روش رگرسیون فرایند گوسی (GPR) با ضریب همبستگی ۰/۹ و خطای RMS ۰/۴۴ بهترین نتیجه را دربر داشت. از میان شیوه‌های گوناگون معکوس‌سازی، مدل PROSAIL پیچیده‌تر از بقیه بود. چندین تابع هزینه متفاوت بررسی شد و بهترین عملکرد از مدل PROSAIL با ضریب تعیین ۰/۷۴ و RMSE ۰/۸ به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های معکوس‌سازی انتقال تابش، در LAI پایین، بیشتر از مقدار واقعی و در LAI بالا، کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. در این تحقیق پیشنهاد شده، هنگامی که زمان پردازش‌ها اهمیت داشته باشد، روش‌های یادگیری ماشینی بر مبنای کرنل از سایر روش‌ها بهتر است (Verrelst et al., 2015).

براون^۶ و همکاران (۲۰۰۰) قابلیت داده‌های SWIR را برای بهبود برآورد LAI در جنگل‌های شمالی کانادا، بررسی کردند. نتایج نشان داد که اصلاح تجربی SWIR

این تحقیق، داده‌های چندزمانه برای برآورد متغیرهای LAI^۱ و کلروفیل به کار رفت. نتایج نشان داد شاخص WDVI با استفاده از باندهای ده‌متری می‌تواند شاخص سطح برگ را با ضریب تعیین ۰/۸۰۹ و خطای RMS معادل ۰/۳۶، برآورد کند. برای برآورد کلروفیل، نسبت شاخص‌های $TCARI/OSAVI$ توانست، در باندهای بیست‌متری، کلروفیل را با ضریب تعیین ۰/۶۹۶ و خطای RMS ۰/۰۶۲ برآورد کند. شاخص CVI توانست مقدار کلروفیل را در باندهای ده‌متری، با RMSE معادل ۰/۰۶۶ و ضریب تعیین ۰/۶۵۶، برآورد کند. شاخص CI_{green} برآوردکننده خطی و دقیق کلروفیل تاج‌پوشش در باندهای ده‌متری، با ضریب تعیین ۰/۸۱۸ و خطای RMS ۰/۲۹، بود و عملکرد $CI_{red\ edge}$ کمی بدتر از CI_{green} گزارش شد. نتیجه این پژوهش نشان داد باندهای ده‌متری ماهواره سنتینل-۲ برای برآورد LAI، کلروفیل برگ و کلروفیل تاج‌پوشش قابلیت مناسبی دارند و به استفاده از باندهای لبه‌قرمز بیست‌متری نیاز نیست (Clevers et al., 2017).

دلگیدو^۲ و همکاران (۲۰۱۱) اثر باندهای لبه‌قرمز (محدوده‌های ۷۰۵، ۷۴۰ و ۷۸۳ نانومتر) ماهواره سنتینل-۲ را برای برآورد کلروفیل و شاخص سطح برگ در مناطق کشاورزی، بررسی کردند. در این تحقیق، قابلیت شاخص NDI^۳ برای برآورد شاخص سطح برگ و قابلیت شاخص NAOC^۴ برای برآورد کلروفیل، با استفاده از باندهای سنتینل-۲، ارزیابی شده است. نمونه‌های زمینی انواع محصولات کشاورزی شامل ذرت، جو، آفتابگردان، یونجه، گندم، پیاز، چغندر قند و لوبیا برداشت شد. محدوده شاخص سطح برگ، در نمونه‌های زمینی، بین ۰-۶ بود. خطای برآورد LAI با استفاده از شاخص NDI برابر ۰/۶ و ضریب همبستگی ۰/۹۰۸ به دست آمد. در مقادیر اندک LAI، رابطه LAI با شاخص NDI خطی است و در LAI بیشتر از ۵، این شاخص اشباع می‌شود. ضریب همبستگی برآورد کلروفیل، با استفاده از شاخص NAOC، ۰/۹۰۹ به دست آمده است. نتیجه این پژوهش

1. Leaf Area Index
2. Delegido
3. Normalized Difference Index
4. Normalized Area Over Reflectance Curve
5. Verrelst
6. Brown

است. سپس نتایج تحقیق بیان شده و در انتها، بحث و نتیجه‌گیری درباره نتایج مطرح شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مطالعه

منطقه مطالعاتی این تحقیق شرکت کشت و صنعت مگسال است. مزارع این شرکت در عرض جغرافیایی ۳۶/۰۹ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰/۱ درجه شرقی، در بخش آبیگ شهرستان قزوین، قرار دارد. اقلیم منطقه خشک و سرد است و میانگین بارش سالیانه حدود ۲۲۰ میلی‌متر است (وبسایت سازمان هواشناسی کشور). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی کشت و صنعت مگسال را نشان می‌دهد.

روش‌های برآورد LAI را می‌توان به دو گروه روش‌های اندازه‌گیری مستقیم (شامل نمونه‌برداری تخریبی^۳، جمع‌آوری لاش‌برگ^۴ و نمونه‌برداری تماسی نقطه‌ای^۵) و روش‌های غیرمستقیم (شامل ابزارهای نوری گوناگون) تقسیم کرد. روش‌های سنجش از دور را می‌توان در زیرمجموعه روش‌های غیرمستقیم برآورد شاخص سطح برگ قرار داد که به دلیل قابلیت تکرار مشاهدات، نیازنداشتن به حضور در مزرعه در هر مرحله، هزینه اندک، سرعت مناسب و پوشش وسیع مورد توجه قرار گرفته و در مطالعات گوناگون از آنها استفاده شده است (Atzberger et al., 2003; Cho et al., 2007; Hansen & Geladi & Kowalski, 1986; Schjoerring, 2003).

۲-۲- شاخص‌های گیاهی

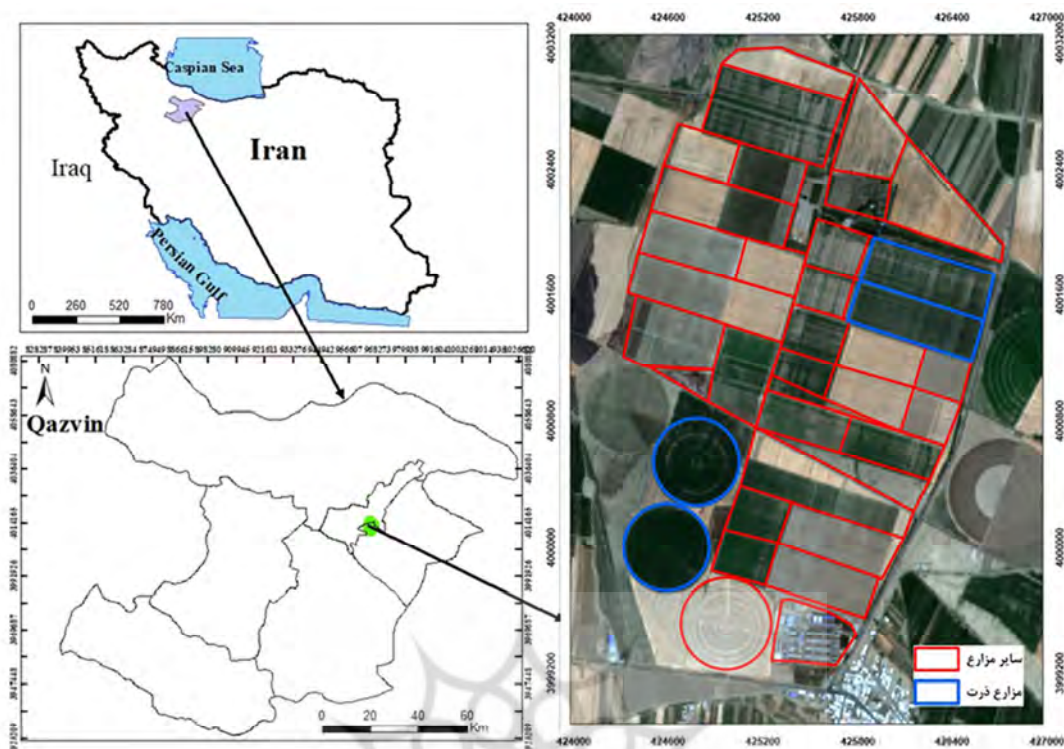
با استفاده از سنجش از دور، شاخص‌های گیاهی متعددی به منظور ارزیابی کمی و کیفی پوشش گیاهی حاصل شده است. ویژگی بازتاب مناطق دارای پوشش

در شاخص گیاهی نسبتی ساده با نام RSR^۱ این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان LAI درختان سوزنی‌برگ و پهن‌برگ را یک‌جا استخراج کرد. حساسیت این شاخص به LAI در مقایسه با SR^۲ بالاتر بود و همبستگی بهتری با LAI در جنگل‌های گونه‌های *Jackpine* و *Blackspruce* داشت. با یکی‌شدن استخراج LAI درختان سوزنی و پهن‌برگ، نیاز به نقشه‌های طبقه‌بندی پوشش زمین، پیش از استخراج LAI، از بین می‌رود (Brown et al., 2000).

مدل‌سازی شاخص سطح برگ گیاه ذرت، به دلیل تغییرات شدید در دوره رویش، دشوار است و در هر مرحله رویشی، تحت تأثیر شرایط متفاوتی قرار دارد. فواصل کشت ذرت در مزرعه بیشتر از سایر محصولات است؛ بنابراین، در نیمه ابتدایی فصل رویش، بازتاب خاک در پیکسل غالب است. در انتهای فصل رویش، به دلیل ارتفاع و تراکم زیاد محصول، بسیاری از شاخص‌های پوشش گیاهی سنجش از دوری اشباع می‌شوند. این مسائل سبب می‌شود برآورد شاخص سطح برگ در گیاه ذرت، طی یک فصل رویش، پیچیده باشد. ماهواره سنتینل-۲ مجهز به باندهای مناسب برای مطالعه پوشش گیاهی و با توان تفکیک مکانی بالا (۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر) است. باندهای لبه‌قرمز این سنجنده زمینه مناسب مطالعه ساختارهای پوشش گیاهی را مهیا کرده‌اند. با توجه به این مطالب، هدف این تحقیق بررسی قابلیت انواع شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه‌شده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و ویژگی باندهای لبه‌قرمز این سنجنده، به منظور برآورد شاخص سطح برگ گیاه ذرت در طول فصل رویش است.

برای دستیابی به این هدف، در دوره‌های گوناگون رویش محصول، نمونه‌برداری‌های زمینی هم‌زمان با تصویربرداری ماهواره صورت گرفت و از این داده‌ها برای مدل‌سازی، کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های برآورد شاخص سطح برگ استفاده شد. در ادامه، مواد و روش‌ها شامل معرفی منطقه مطالعات، داده‌های مورد استفاده و شاخص‌های پوشش گیاهی به کاررفته آمده

1. Reduced Single Ratio
2. Single Ratio
3. Destructive Sampling
4. Litterfall Collection
5. Point Contact Sampling



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شرکت کشت و صنعت مگسال در استان قزوین (مزارع ذرت با رنگ آبی مشخص شده است)

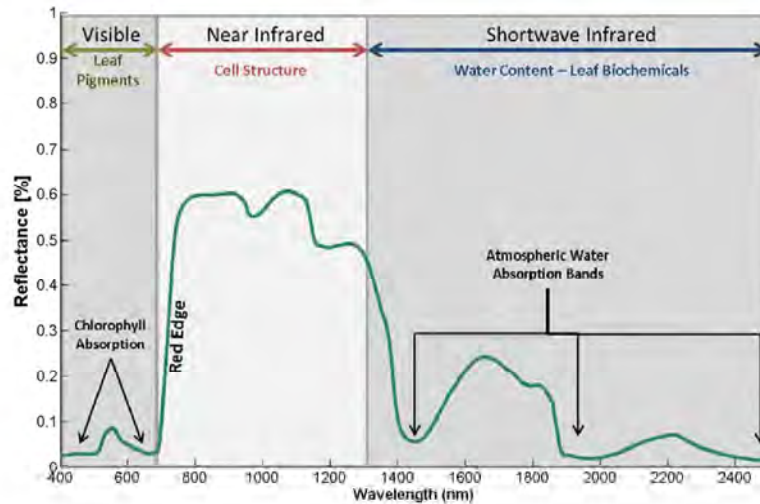
با غلظت کلروفیل ارتباطی قوی دارد و پاسخ طیفی گیاه، در بخش مادون قرمز نزدیک، تحت تأثیر شاخص سطح برگ و تراکم پوشش گیاهی سبز قرار دارد (Major et al., 1990). شکل ۲ ویژگی‌های بازتاب پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این ویژگی‌ها در سال‌های اخیر، شاخص‌های تجربی متعددی برای برآورد شاخص سطح برگ به کار رفته است (Bannari et al., 2006). جدول ۱ برخی از شاخص‌های گیاهی را که در مطالعات برآورد LAI دقت‌های مورد قبولی داشته‌اند، ارائه کرده است.

۲-۳- تصاویر مورد استفاده

ماهواره سنتینل-۲ را آژانس فضایی اروپا، به منظور بهبود مأموریت‌هایی مانند بررسی تغییرات پوشش سطح زمین، نظارت بر محیط زیست، نظارت بر محصولات کشاورزی، برآورد پارامترهای پوشش گیاهی و مدیریت بلایای طبیعی، طراحی کرده است.

گیاهی تحت تأثیر ترکیب پيچیده‌ای ایت؛ شامل بازتاب خاک، گیاه، تأثیرات محیطی، سایه، رطوبت و رنگ خاک. علاوه بر این بازتاب پوشش گیاهی از تغییرات زمانی- مکانی اتمسفر تأثیر می‌پذیرد. این شاخص‌ها برای کاهش تغییرپذیری ناشی از عوامل بیرونی (همچون شرایط اتمسفر و تابش) و عوامل داخلی (مانند خاک و توزیع زاویه‌ای برگ) به کار می‌روند و ویژگی آنها بازسازی پاسخ طیفی گیاه و به حداقل رساندن اثر پارامترهای مورد اشاره است و بنابراین، در مقایسه با هریک از باندهای طیفی، شاخص‌های گیاهی حساسیت بهتری برای مطالعه پوشش گیاهی دارند (Asrar et al., 1984).

در گیاه یا برگ سالم، تابش رسیده در طول موج قرمز طیف الکترومغناطیس (محدوده ۶۹۰-۶۳۰ نانومتر) از سوی کلروفیل جذب می‌شود و تابش رسیده در بخش مادون قرمز نزدیک (محدوده ۹۰۰-۷۶۰ نانومتر) از سوی سلول‌های برگ به شدت بازتابیده می‌شود؛ بنابراین پاسخ طیفی گیاهان، در بخش قرمز،



شکل ۲. شمای کلی منحنی بازتاب طیفی برگ (Rivera Caicedo, 2014)

جدول ۱. شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور برای برآورد LAI

نام شاخص	نام اختصاری	محدوده طیفی	معادله	منبع
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	Red-NIR	$\frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$	Rouse et al., 1974; Tucker, 1979
Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	Red-NIR	$\frac{(1 + L)(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red} + L)}$	Huete, 1988
Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	OSAVI	Red-NIR	$\frac{(1 + 0.16)(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red} + 0.16)}$	Rondeaux et al., 1996
Enhanced Vegetation Index	EVI	Vis-NIR	$\frac{2.5(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + 6R_{Red} - 7.5R_{Blue} + 1)}$	Huete et al., 2002
Green Normalized Difference Vegetation Index	gNDVI	Green-NIR	$\frac{(R_{NIR} - R_{Green})}{(R_{NIR} + R_{Green})}$	Gitelson et al., 1996
Chlorophyll INDEX-GREEN	CI-G	Green-NIR	$\frac{R_{NIR}}{R_{Green}} - 1$	Gitelson et al., 2003
Normalized Green Red Difference Index	NGRDI	Vis	$\frac{(R_{Green} - R_{Red})}{(R_{Green} + R_{Red})}$	Tucker, 1979
Green Leaf Index	GLI	Vis	$\frac{(2R_{Green} - R_{Red} - R_{Blue})}{(2R_{Green} + R_{Red} + R_{Blue})}$	Louhaichi et al., 2001
Normalized Difference Red Edge Index	NDREI	RE-NIR	$\frac{(R_{NIR} - R_{Rededge})}{(R_{NIR} + R_{Rededge})}$	Merzlyak, 1994 & Gitelson
Chlorophyll Index-Red Edge	CI-RE	RE-NIR	$\frac{R_{NIR}}{R_{Rededge}} - 1$	Gitelson et al., 2003
Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index	SARVI	Vis-NIR	$\frac{R_{NIR} - R_{RB}(1 + L)}{R_{NIR} + R_{RB} + L}$ $R_{RB} = R_{RED} - \lambda(R_B - R_{RED})$	Kaufman & Tanre, 1992
Normalized Difference Water Index	NDWI	NIR-SWIR	$\frac{(R_{NIR} - R_{MIR})}{(R_{NIR} + R_{MIR})}$	Gao, 1995
Red-Edge Ratio Normalized Vegetation Index	RepNDVI	Rededge	$NDVI \times \sqrt{\frac{R_{Rededge6}}{R_{Rededge5}}}$	Chang & Shoshany, 2016

در این معادلات، R_{Red} بازتابندگی محدوده قرمز، R_{NIR} بازتابندگی بخش مادون قرمز نزدیک، R_{Blue} بازتابندگی محدوده آبی، R_{Green} بازتابندگی محدوده سبز و $R_{Rededge}$ بازتابندگی محدوده لبه قرمز طیف الکترومغناطیس است.

۲-۴- نمونه برداری میدانی

به منظور تعیین دامنه زمانی مناسب برای انجام دادن مطالعات لازم، تقویم زراعی محصول ذرت در منطقه مورد مطالعه بررسی شد و اطلاعاتی مانند زمان کاشت، زمان اوج سبزی‌نگی و زمان برداشت به دست آمد. برای کالیبراسیون مدل‌ها و ارزیابی دقت آنها، نمونه برداری زمینی انجام شد. در نهایت، با توجه به زمان گذر ماهواره، وضعیت آب‌وهوا و دوره‌های رشد محصول، پنج نوبت نمونه برداری هم‌زمان با گذر ماهواره صورت گرفت. در هر مرحله نمونه برداری، از مزارع متفاوت با شرایط رویشی متفاوت نمونه برداری شده است. جدول ۳ تاریخ نمونه برداری‌ها از منطقه را نشان داده است.

این پروژه دارای دو ماهواره یکسان سنتینل-۲a و سنتینل-۲b است که به ترتیب، در ژوئن ۲۰۱۵ و مارس ۲۰۱۷، در یک مدار قرار گرفته‌اند. سنجنده چندطیفی (MSI) ماهواره سنتینل-۲، با سیزده باند طیفی و توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر، محدوده طیف مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی طیف الکترومغناطیسی را دربر می‌گیرد. محدوده عرض جغرافیایی ۵۶ درجه جنوبی تا ۸۴ درجه شمالی با استفاده از این ماهواره تصویربرداری می‌شود. استفاده از دو ماهواره در یک مدار زمان بازدید مجدد را به حدود پنج روز می‌رساند. جدول ۲ ویژگی‌های سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ویژگی‌های سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲

شماره و محدوده طیفی باند	طول موج مرکزی (میکرومتر)	پهنای باند (نانومتر)	توان تفکیک مکانی (متر)
باند ۱- آئروسول‌های ساحلی	۰/۴۴۳	۲۰	۶۰
باند ۲- آبی	۰/۴۹۰	۶۵	۱۰
باند ۳- سبز	۰/۵۶۰	۳۵	۱۰
باند ۴- قرمز	۰/۶۶۵	۳۰	۱۰
باند ۵- لبه قرمز	۰/۷۰۵	۱۵	۲۰
باند ۶- لبه قرمز	۰/۷۴۰	۱۵	۲۰
باند ۷- لبه قرمز	۰/۷۸۳	۲۰	۲۰
باند ۸- مادون قرمز نزدیک	۰/۸۴۲	۱۱۵	۱۰
باند ۸A- مادون قرمز نزدیک باریک‌بند	۰/۸۶۵	۲۰	۲۰
باند ۹- بخار آب	۰/۹۴۵	۲۰	۶۰
باند ۱۰- مادون قرمز موج کوتاه- ابرسیروس	۱/۳۷۵	۲۰	۶۰
باند ۱۱- مادون قرمز موج کوتاه	۱/۶۱۰	۹۰	۲۰
باند ۱۲- مادون قرمز موج کوتاه	۲/۱۹۰	۱۸۰	۲۰

جدول ۳. تاریخ نمونه برداری‌های میدانی در شرکت کشت و صنعت مگسال، سال ۱۳۹۶

تاریخ نمونه برداری	زمان گذر ماهواره
۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ تیر	۱۱ تیر
۲۷ و ۲۸ تیر	۲۶ تیر
۱۲ و ۱۳ مرداد	۱۳ مرداد
۲ و ۳ شهریور	۲ شهریور
۳ مهر	۲۹ شهریور (گذر ۳ مهر مشکل فنی داشت)

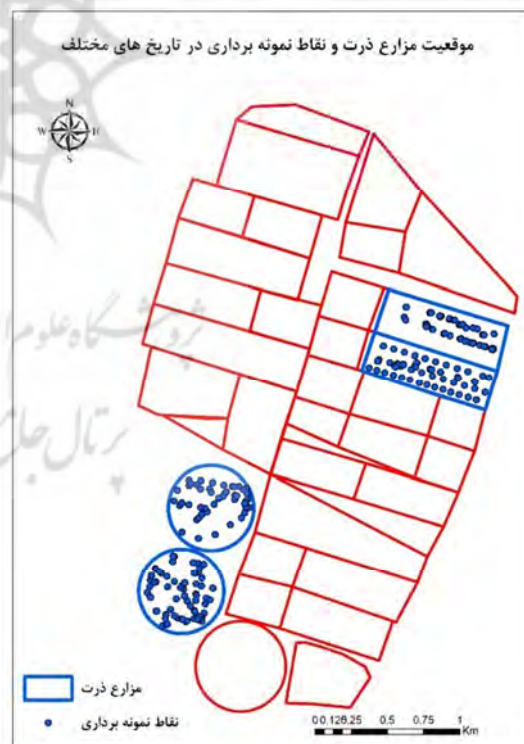
۲-۵- پردازش داده‌ها

پیش از اجرای پردازش‌ها و محاسبه شاخص‌ها، تصاویر باید از نظر اتمسفری و هندسی تصحیح و هم‌مختصات شوند. بدین منظور سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای مربوط به فصل رویش گرد آمد. تصاویر تاریخی‌هایی که منطقه مطالعه دارای پوشش ابر بوده است، حذف شد و تصحیح اتمسفری تصاویر سنتینل-۲، با استفاده از الگوریتم Sen2cor که برای این منظور طراحی شده است، در نرم‌افزار SNAP اجرا شد (Louis et al., 2016). تصاویر سطح LIC به‌منزله ورودی به الگوریتم معرفی می‌شود. با استفاده از اطلاعات تصویر و مدل رقومی ارتفاع، میزان بخارآب و عمق نوری اتمسفر به‌دست آمد. سپس با استفاده از جدول‌های تبدیل موجود در نرم‌افزار، مدل اتمسفری متناسب با شرایط تصویربرداری فراخوانی و روی تصاویر اعمال شد.

پردازش L2A روی تصاویر بازتابندگی بالای اتمسفر (TOA) انجام می‌شود. مراحل پردازش از تشخیص ابر آغاز می‌شود و با طبقه‌بندی تصویر عمق نوری اتمسفر (AOT) و مقدار بخارآب (WV) از تصاویر LIC ادامه می‌یابد. مرحله آخر تبدیل مقادیر بازتابندگی بالای اتمسفر به مقادیر سطح زمین است. برای اجرای این مراحل، دو نوع داده کمکی به کار می‌رود که شامل جدول‌های تبدیل (LUT) مدل انتقال تابش و مدل رقومی ارتفاع (DEM) می‌شود. به‌صورت پیش‌فرض، مدل رقومی ارتفاع SRTM در نرم‌افزار وجود دارد که تغییرپذیر است. با توجه به اینکه هیچ‌یک از مناطق مورد مطالعه دارای پوشش جنگلی نیست؛ مدل رقومی ارتفاع SRTM کاربرد دارد. خروجی SEN2COR تصاویر بازتابندگی سطح زمین در قدرت تفکیک‌های مکانی گوناگون (۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر) و نقشه‌های عمق نوری و بخارآب اتمسفر را دربر می‌گیرد (Louis et al., 2016).

1. Top of Atmosphere
2. Aerosol Optical Thickness
3. Water Vapor
4. Look Up Table
5. Digital Elevation Model

برای نمونه‌برداری، پلات‌های یک در یک متر به‌کار رفت و در محل هر نمونه، پارامترهای میزان کلروفیل، شاخص سطح برگ، وضعیت آسمان و ساعت نمونه‌برداری و موقعیت دقیق جغرافیایی ثبت شد. شاخص سطح برگ به‌کمک دستگاه Sun Scan Canopy Analysis system (Wilhelm et al., 2000) اندازه‌گیری شد. در نخستین نوبت برداشت میدانی، نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی سیستماتیک بود و در نوبت‌های بعدی، با دراختیارداشتن اطلاعات اولیه و کلی از منطقه و کمک‌گرفتن از تصاویر ماهواره‌ای موجود، نقاط نمونه جدید به‌نحوی انتخاب شد که تمامی تغییرات قابل مشاهده در سطح مزارع را پوشش دهند و دامنه مقادیر مربوط به پارامترها نیز، به‌طور کامل و مطلوب، به‌دست آید. محدوده مقادیر شاخص سطح برگ نمونه‌برداری شده بین ۰/۱ تا ۸/۵۲ متغیر بوده است.



شکل ۳. موقعیت مزارع ذرت و نقاط نمونه‌برداری شده

جدول ۴. نتایج اعمال رگرسیون خطی بین شاخص‌های گیاهی و مقادیر شاخص سطح برگ ذرت در طول دوره رشد

شاخص	ضریب تعیین	همبستگی	RMSE
EVI	۰/۵۷۴	۰/۷۵۷	۱/۵۵
SAVI	۰/۵۰۶	۰/۷۱۱	۱/۵۷
SARVI	۰/۵۰۳	۰/۷۰۹	۱/۵۸
RepNDVI	۰/۴۸۶	۰/۶۹۷	۱/۶۰۸
OSAVI	۰/۴۸۵	۰/۶۹۷	۱/۶۰۹
NDREI	۰/۴۷۷	۰/۶۹۱	۱/۶۲۲
NGRDI	۰/۴۷۶	۰/۶۹۰	۱/۶۲۳
CIrededge	۰/۴۵۹	۰/۶۷۸	۱/۶۴۹
NDVI	۰/۴۵۹	۰/۶۷۷	۱/۱۶۵۰
GLI	۰/۴۵۳	۰/۶۷۳	۱/۶۵۹
NDWI	۰/۴۵۰	۰/۶۷۱	۱/۶۶۴
GNDVI	۰/۴۵۰	۰/۶۷۱	۱/۶۶۴
CIgreen	۰/۴۴۸	۰/۶۷۰	۱/۶۶۶

بنابراین، شاخص EVI به‌منزله شاخص مناسب برآورد شاخص سطح برگ محصول ذرت در تمامی فصل رویش انتخاب شده است. شکل ۴ نمودار پراکندگی شاخص EVI و مقادیر شاخص سطح برگ ذرت را نشان می‌دهد. طبق این شکل، رابطه تغییرات شاخص EVI و شاخص سطح برگ تقریباً از روندی خطی پیروی می‌کند و این شاخص توانسته است بیش از ۵۰٪ تغییرات شاخص سطح برگ را مدل کند.

جدول ۵ و شکل ۵ روابط خطی و غیرخطی شاخص‌هایی را نشان می‌دهند که عملکرد مناسبی در برآورد مقدار LAI داشته‌اند. این روابط با استفاده از داده‌های تمامی نمونه‌ها در تاریخ‌های متفاوت فصل رویش به‌دست آمده است. شاخص‌های گوناگون دامنه مقادیر متفاوتی دارند. برای مقایسه بهتر نتایج، مقادیر تمامی شاخص‌ها بین ۰ تا ۱ نرمال شده و در شکل ۵ نشان داده شده است.

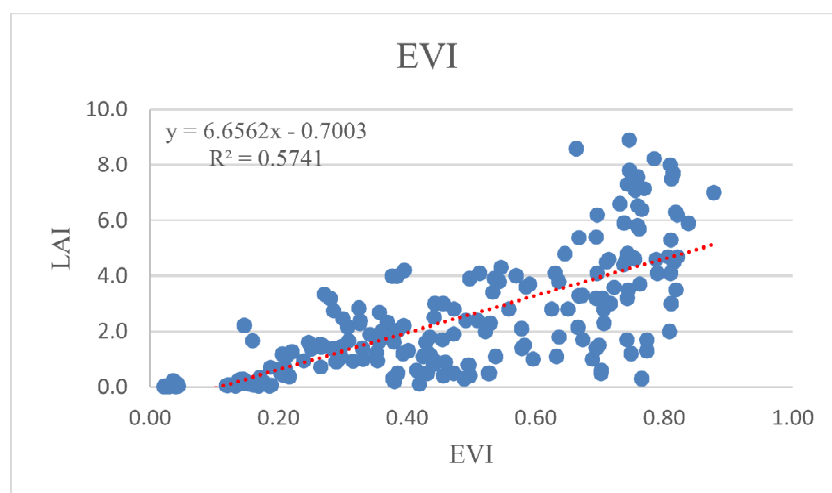
تصاویر LIC ماهواره سنتینل-۲ از نظر هندسی تصحیح شده‌اند اما، با توجه به اینکه در این طرح از سری زمانی تصاویر استفاده می‌شود و به تطبیق اطلاعات تصویر و نمونه‌برداری زمینی نیاز است، باید تصاویر با دقت زیرپیکسل، از نظر هندسی، با یکدیگر و نیز با موقعیت زمینی تطابق داشته باشند. از این‌رو ابتدا تطابق هندسی تصاویر با نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری و تصاویر گوگل ارث کنترل شد و سپس انطباق تصاویر با یکدیگر ارزیابی شد. تصاویری که نیاز به تصحیح هندسی داشتند، با استفاده از نقاط کنترل تهیه‌شده از تصاویر گوگل ارث، با دقت بالاتر از یک پیکسل تصحیح شدند.

۳- نتایج

۳-۱- برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی

با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی، رابطه بین شاخص‌های سنجش از دوری و اندازه‌گیری‌های زمینی بررسی شد و قابلیت این روابط، با استفاده از داده‌های تست، ارزیابی شد. در تحلیل‌ها، داده‌های نمونه‌برداری‌های متفاوت در طول فصل رویش با یکدیگر ادغام شده است. جدول ۴ نتایج اعمال رگرسیون خطی بین شاخص‌های گیاهی و مقادیر شاخص سطح برگ اندازه‌گیری‌شده محصول ذرت علوفه‌ای مزارع گوناگون در طول فصل رویش را شامل می‌شود.

مقایسه نتایج شاخص‌های گوناگون روی داده‌ها در دوره رویش نشان داد که به‌ترتیب شاخص‌های EVI، SAVI، SARVI و RepNDVI بهترین عملکردها را داشته‌اند. این نتیجه نشان می‌دهد شاخص‌هایی که آثار پس‌زمینه را تصحیح می‌کنند، مانند SAVI و EVI، در سری زمانی داده‌های LAI ذرت عملکرد بهتری داشته‌اند. پس از این شاخص‌ها، بهترین عملکرد به شاخص‌های RepNDVI و NDREI متعلق است. این دو شاخص از باندهای لبه‌قرمز در محاسبات خود استفاده می‌کنند.



شکل ۴. رابطه بین EVI و شاخص سطح برگ ذرت در طول فصل رشد

جدول ۵. نتیجه اعمال رگرسیون غیرخطی بین شاخص‌های گیاهی و مقادیر شاخص سطح برگ ذرت در طول فصل رشد

	Quadratic		Cubic		Exponential	
	R	R ²	R	R ²	R	R ²
EVI	۰/۷۳۳	۰/۵۳۷	۰/۷۴۳	۰/۵۵۳	۰/۷۸۵	۰/۶۱۶
SAVI	۰/۷۲۹	۰/۵۳۱	۰/۷۴۰	۰/۵۴۸	۰/۸۰۱	۰/۶۴۱
REPNDVI	۰/۶۹۷	۰/۴۸۶	۰/۶۹۹	۰/۴۸۹	۰/۷۶۱	۰/۵۷۸
OSAVI	۰/۷۱۷	۰/۵۱۵	۰/۷۲۶	۰/۵۲۸	۰/۸۱۴	۰/۶۶۳
NDREI	۰/۷۰۴	۰/۴۹۵	۰/۷۱۴	۰/۵۱۰	۰/۸۲۲	۰/۶۷۵
NGRDI	۰/۷۰۷	۰/۴۹۹	۰/۷۱۰	۰/۵۰۴	۰/۷۰۷	۰/۵۰۰
NDVI	۰/۷۰۱	۰/۴۹۱	۰/۷۰۸	۰/۵۰۱	۰/۸۲۵	۰/۶۸۰
Clrededge	۰/۶۹۴	۰/۴۸۲	۰/۶۹۴	۰/۴۸۲	۰/۶۸۰	۰/۴۶۲
GLI	۰/۶۸۹	۰/۴۷۵	۰/۶۹۰	۰/۴۷۶	۰/۷۰۹	۰/۵۰۳
NDWI	۰/۶۹۸	۰/۴۸۷	۰/۷۰۳	۰/۴۹۴	۰/۸۱۲	۰/۶۵۹
GNDVI	۰/۶۹۸	۰/۴۸۷	۰/۷۰۳	۰/۴۹۴	۰/۸۱۲	۰/۶۵۹
CIgreen	۰/۶۸۰	۰/۴۶۳	۰/۶۸۴	۰/۴۶۸	۰/۶۷۵	۰/۴۵۶
VARI	۰/۷۱۲	۰/۵۰۶	۰/۷۱۶	۰/۵۱۲	۰/۷۰۶	۰/۴۹۸

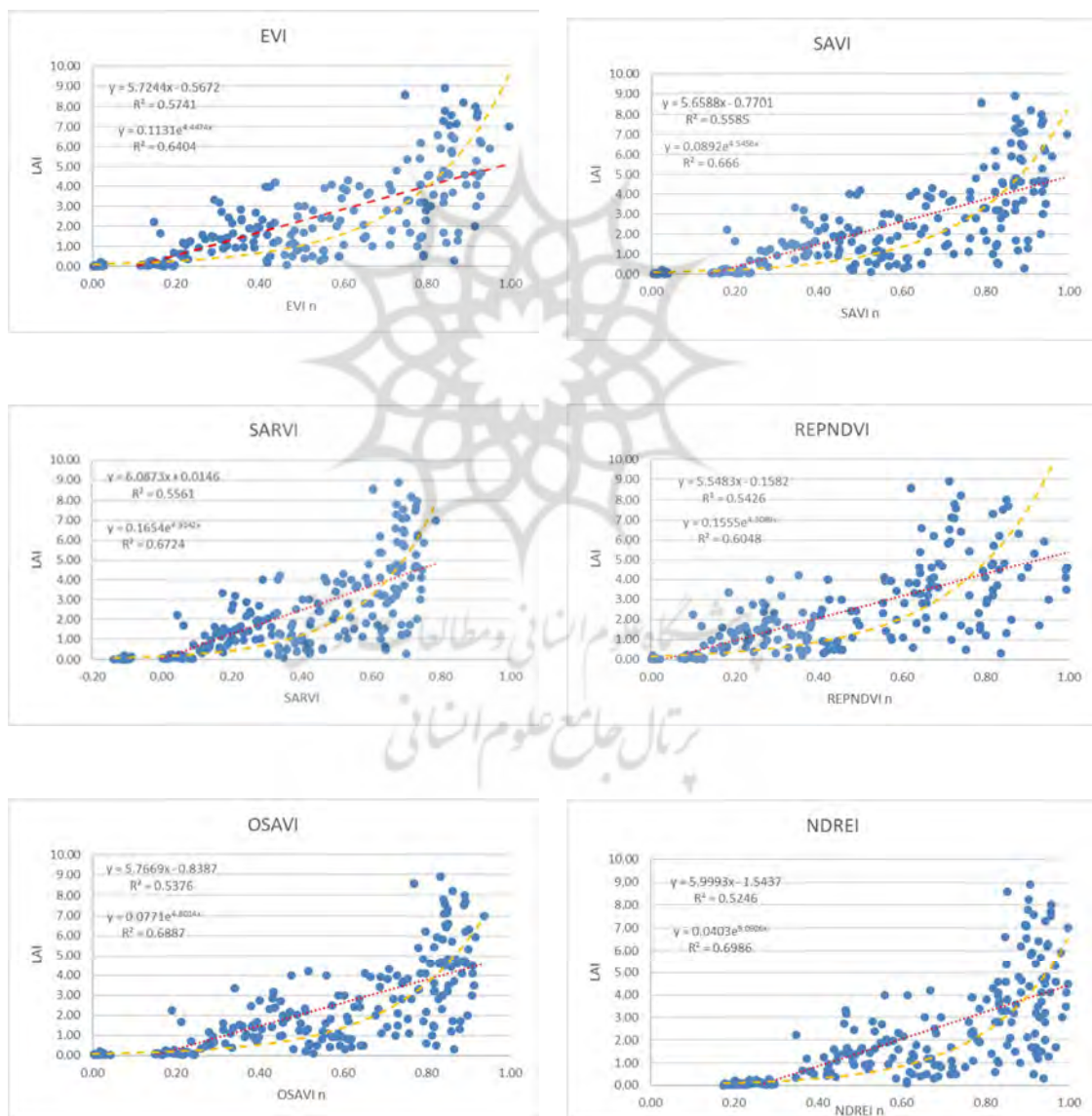
ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن بود که روش‌های غیرخطی دچار برازش بیش از حد شده و مقدار خطای RMSE در این مدل‌ها، برای داده‌های تست، افزایش یافته است. برای نمونه، در مورد شاخص EVI که شاخص مناسبی بوده، ضریب تعیین از ۰/۵۱۹ در مدل خطی به ۰/۶۱۶ در مدل نمایی افزایش یافته است اما خطای RMS مدل رگرسیون خطی ۱/۵۵ بوده که در مدل رگرسیون نمایی، به ۱/۶۴ افزایش یافته است. این واقعیت در سایر شاخص‌ها نیز صدق می‌کند؛ بنابراین، روش‌های خطی بر روش‌های غیرخطی ترجیح یافته‌اند.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، با استفاده از روابط غیرخطی Quadratic، Cubic و Exponential، مقدار همبستگی و ضریب تعیین افزایش یافته است. در مقایسه با معادلات خطی افزایش در میان روابط غیرخطی، روابط نمایی در بیشتر شاخص‌ها ضریب تعیین بالاتری در مقایسه با سایر روش‌ها داشته‌اند. مسئله‌ای که هنگام استفاده از روابط غیرخطی، با آن مواجه خواهیم بود برازش بیش از حد مدل است؛ بنابراین، با استفاده از داده‌های تست، این موضوع

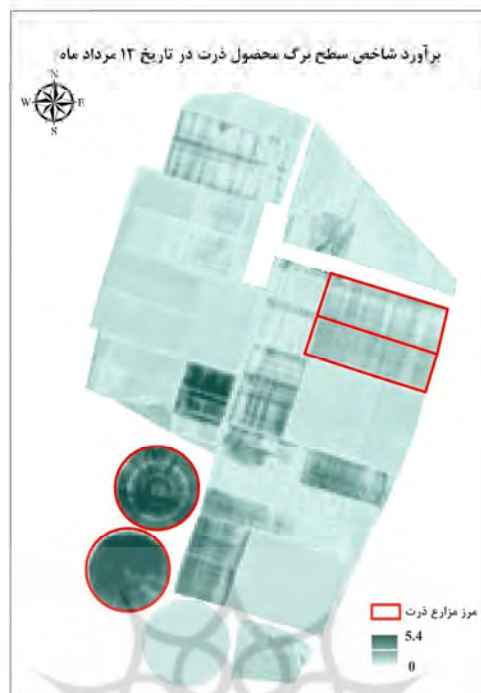
برآورد شاخص سطح برگ محصول ذرت با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲

به شکل نمودار در شاخص‌های لبه‌قرمز، مشاهده می‌شود که اشباع‌شدگی در این شاخص‌ها تاحدی کاهش یافته؛ هرچند کاملاً از بین نرفته است. شکل ۶ مقادیر برآوردشده شاخص سطح برگ ذرت را برای تصویر متعلق به دوازدهم مرداد در منطقه قزوین، نشان داده است.

حالت نسبتاً عمودی که در بخش انتهایی پلات در شاخص‌های SAVI، SARVI و OSAVI مشاهده می‌شود، ناشی از اشباع‌شدگی شاخص‌ها در مقادیر بالای سطح برگ است؛ در واقع، شاخص‌های SAVI و OSAVI در حدود مقادیر ۰/۹ و شاخص SARVI حدود ۰/۸ شاخص گیاهی به اشباع رسیده‌اند. با توجه



شکل ۵. روابط خطی و غیرخطی شاخص‌های گوناگون با مقادیر LAI



شکل ۶. مقادیر برآوردشده شاخص سطح برگ ذرت با استفاده از شاخص EVI، در دوازدهم مرداد (به مترمربع بر مترمربع)

۴- بحث و نتیجه‌گیری

و شاخص پوشش گیاهی شکل غیرخطی به خود بگیرد. وجود دنباله مقادیر در ناحیه اشباع سبب شده است مقدار ضریب تعیین در رابطه‌ی نمایی، به نسبت روابط خطی، افزایش یابد و در نتیجه، اشباع شاخص به محدوده ۱ رسیده است. با کاهش اثر اشباع در شاخص REPNDVI، شکل رابطه LAI و شاخص خطی تر شده است. با توجه به اینکه افزایش سطح برگ و اشباع شاخص‌های گیاهی در دوره‌های انتهایی فصل رویش رخ می‌دهد؛ قابلیت شاخص‌های لبه‌قرمز در غلبه بر اشباع‌شدگی شاخص‌های پوشش گیاهی، در انتهای فصل رشد، مشهود است. با وجود این شاخص EVI در سراسر فصل رویش عملکردی بهتر از شاخص‌های لبه‌قرمز نشان داده است. در آغاز فصل رویش، مقادیر شاخص سطح برگ اندک است. مزیت شاخص EVI بر شاخص‌های لبه‌قرمز در در اوایل فصل رشد و مقادیر اندک شاخص سطح برگ است؛ بدین ترتیب در ابتدای

نتایج به‌دست‌آمده از به‌کارگیری شاخص‌های گوناگون برای برآورد شاخص سطح برگ محصول ذرت علوفه‌ای نشان داده است که شاخص‌های پوشش گیاهی گوناگون، در دوره‌های متفاوت، رشد عملکرد متفاوتی دارند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در دوره‌های ابتدایی و انتهایی رشد (ابتدا و انتهای هر نمودار)، عملکرد شاخص‌ها کاهش می‌یابد. در ابتدای رشد، تغییر چشمگیری در مقدار شاخص سطح برگ مشاهده نمی‌شود اما مقادیر شاخص پوشش گیاهی متفاوتی به چشم می‌خورد که دلیل آن غالب‌بودن بازتاب خاک پس‌زمینه در این مرحله است.

در دوره‌ی انتهایی رشد، به‌دلیل اشباع‌شدگی شاخص‌های گیاهی، مقدار همبستگی کاهش می‌یابد. اثر اشباع‌شدگی شاخص را می‌توان، طبق دامنه وسیع مقادیر شاخص پوشش گیاهی در LAI بالا، مشاهده کرد. اثر اشباع شاخص‌های گیاهی موجب می‌شود رابطه LAI

- Brown, L., Chen, J.M., Leblanc, S.G. & Cihlar, J., 2000, **A Shortwave Infrared Modification to the Simple Ratio for LAI Retrieval in Boreal Forests: An Image and Model Analysis**, Remote Sensing of Environment, 71(1), PP. 16-25.
- Chen, J.M. & Black, T.A., 1992, **Defining Leaf Area Index for Non-Flat Leaves**, Plant Cell and Environment, 15, PP. 421-429.
- Chen, J.M., Liu, J., Cihlar, J. & Goulden, M.L., 1999, **Daily Canopy Photosynthesis Model through Temporal and Spatial Scaling for Remote Sensing Applications**, Ecological Modelling, 124(2), PP. 99-119.
- Chang, J. & Shoshany, M., 2016, **Red-Edge Ratio Normalized Vegetation Index for Remote Estimation of Green Biomass**, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016 IEEE International, IEEE.
- Cho, M.A., Skidmore, A., Corsi, F., van Wieren, S.E. & Sobhan, I., 2007, **Estimation of Green Grass/Herb Biomass from Airborne Hyperspectral Imagery Using Spectral Indices and Partial Least Squares Regression**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9 (2007-4), PP. 375-391.
- Clevers, J.G., Kooistra, L. & van den Brande, M.M., 2017, **Using Sentinel-2 Data for Retrieving LAI and Leaf and Canopy Chlorophyll Content of a Potato Crop**, Remote Sensing, 9(5), P. 405.
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L. & Moreno, J., 2011, **Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content**, Sensors, 11(7), PP. 7063-7081.
- Deng, F., Chen, J.M., Plummer, S., Chen, M. & Pisek, J., 2006, **Algorithm for Global Leaf Area Index Retrieval Using Satellite Imagery**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(8), PP. 2219-2229.
- Gao, B.C., 1995, **Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space**, In Imaging Spectrometry (Vol. 2480, PP. 225-237). International Society for Optics and Photonics.
- نمودار، برازش مطلوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقدار شاخص EVI مشاهده می‌شود اما، در شاخص‌های لبه‌قرمز مانند RepNDVI، پراکندگی نقاط در مقادیر اندک LAI بیشتر است و این ویژگی سبب دشواری در مدل‌سازی آن می‌شود.
- بدین ترتیب استفاده از شاخص EVI برای برآورد شاخص سطح برگ محصول ذرت، در سراسر فصل رویش، پیشنهاد می‌شود. همچنین، برای مطالعه ذرت، تنها در دوره‌های انتهایی رشد می‌توان از شاخص‌های لبه‌قرمز استفاده کرد.

۵- منابع

وبسایت سازمان هواشناسی کشور، وضعیت هوای استان قزوین، <http://www.irimo.ir>

Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T. & Hatfield J.L., 1984, **Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat 1**, Agronomy Journal, 76(2), PP. 300-306.

Atzberger, C., Jarmer, T., Schlerf, M., Kötz, B. & Werner, W., 2003, **Spectroradiometric Determination of Wheat Bio-Physical Variables: Comparison of Different Empirical-Statistical Approaches**, In: Goossens, R. (Eds.), Remote Sensing in Transitions, Proc. 23rd EARSeL symposium, Belgium, 2-5 June 2003, PP. 463-470.

Bannari, A.K.S., Haboudane, D. & Khurshid, K.S., 2006, **Sensitivity Analysis of Chlorophyll Indices to Soil Optical Properties Using Eld, Airborne and Satellite Hyperspectral Data**, Remote Sensing of Environment, 4, PP. 120-123.

Baret, F., De Solan, B., Lopez-Lozano, R., Ma, K. & Weiss, M., 2010, **GAI Estimates of Row Crops from Downward Looking Digital Photos Taken Perpendicular to Rows at 57.5 Zenith Angle: Theoretical Considerations Based on 3D Architecture Models and Application to Wheat Crops**, Agricultural and Forest Meteorology, 150(11), PP. 1393-1401.

- GCOS-138, 2010, **Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support to UNFCCC (2010 Update)**, WMO-TD/No. 1523. GCOS.
- Geladi, P. & Kowalski, B.R., 1986, **Partial Least-Squares Regression: A Tutorial**, *Analytica Chimica Acta*, 185, PP. 1-17.
- Gitelson, A.A., Gritz, Y. & Merzlyak, M.N., 2003, **Relationships between Leaf Chlorophyll Content and Spectral Reflectance and Algorithms for Non-Destructive Chlorophyll Assessment in Higher Plant Leaves**, *Journal of plant physiology*, 160(3), PP. 271-282.
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J. & Merzlyak, M.N., 1996, **Use of a Green Channel in the Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS**, *Remote Sensing of Environment*, 58, PP. 289-298.
- Gitelson, A. & Merzlyak, M.N., 1994, **Quantitative Estimation of Chlorophyll-A Using Reflectance Spectra: Experiments with Autumn Chestnut and Maple Leaves**, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 22(3), PP. 247-252.
- Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N. & Lichtenthaler, H.K., 1996, **Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm**, *Journal of Plant Physiology*, 148(3-4), PP. 501-508.
- Gong, P., Pu, R. & Miller, J.R., 1992, **Correlating Leaf Area Index of Ponderosa Pine with Hyperspectral CASI Data**, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 18(4), PP. 275-282.
- Hansen, P.M. & Schjoerring, J.K., 2003, **Reflectance Measurement of Canopy Biomass and Nitrogen Status in Wheat Crops Using Normalized Difference Vegetation Indices and Partial Least Squares Regression**, *Remote Sensing of Environment*, 86(4), PP. 542-553.
- Huete, A.R., 1988, **A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)**, *Remote Sensing of Environment*, 25(3), PP. 295-309.
- 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(1-2), PP. 195-213.
- Kaufman, Y.J. & Tanre, D., 1992, **Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS**, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), PP. 261-270.
- Liu, J., Pattey, E. & Admiral, S., 2013, **Assessment of in Situ Crop LAI Measurement Using Unidirectional View Digital Photography**, *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, PP. 25-34.
- Liu, B., Yue, Y.M., Li, R., Shen, W.J. & Wang, K.L., 2014, **Plant Leaf Chlorophyll Content Retrieval Based on a Field Imaging Spectroscopy System**, *Sensors*, 14(10), PP. 19910-19925.
- Louhaichi, M., Borman, M.M. & Johnson, D.E., 2001, **Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat**, *Geocarto International*, 16(1), PP. 65-70.
- Louis, J., Debaecker, V., Pflug, B., Main-Korn, M., Bieniarz, J., Mueller-Wilm, U., Cadau, E. & Gascon, F., 2016, **Sentinel-2 Sen2Cor: L2A Processor for Users**, In *Living Planet Symposium (Vol. 740, P. 91)*.
- Major, D.J., Baret, F. & Guyot, G., 1990, **A Vegetation Index Adjusted for Soil Brightness**, *International Journal of Remote Sensing*, 11, PP. 727-740.
- Mutanga, O. & Skidmore, A.K., 2004, **Narrow Band Vegetation Indices Overcome the Saturation Problem in Biomass Estimation**, *International Journal of Remote Sensing*, 25(19), PP. 3999-4014.
- Neinavaz, E., Skidmore, A.K., Darvishzadeh, R. & Groen, T.A., 2016, **Leaf Area Index Retrieved from Thermal Hyperspectral Data**, *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, PP. 99-105.

- Propastin, P. & Erasmi, S., 2010, **A Physically Based Approach to Model LAI from MODIS 250m Data in a Tropical Region**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12(1), PP. 47-59.
- Rivera Caicedo, J.P., 2014, **Optimized and Automated Estimation of Vegetation Properties: Opportunities for Sentinel-2**, Universitat de València (España) en 2014.
- Rondeaux, G., Steven, M. & Baret, F., 1996, **Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices**, Remote Sensing of Environment, 55(2), PP. 95-107.
- Rouse Jr., J., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W., 1974, **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**, NASA, Washington, D.C.
- Tucker, C.J., 1979, **Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation**, Remote Sensing of Environment, 8(2), PP. 127-150.
- Verrelst, J., Rivera, J.P., Veroustraete, F., Muñoz-Mari, J., Clevers, J.G., Camps-Valls, G. & Moreno, J., 2015, **Experimental Sentinel-2 LAI Estimation Using Parametric, Non-Parametric and Physical Retrieval Methods—A Comparison**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 108, PP. 260-272.
- Wilhelm, W.W., Ruwe, K. & Schlemmer, M.R., 2000, **Comparison of Three Leaf Area Index Meters in a Corn Canopy**, Crop Science, 40(4), PP. 1179-1183.
- Zheng, G. & Moskal, L.M., 2009, **Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors**, Sensors, 9(4), PP. 2719-2745.



سنجش از دور

و

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال پانزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲
Vol.15, No. 1, Spring 2023

1-15

Analysis of Sentinel- 2 Satellite Images to Estimate Leaf Area Index of Corn Crops

Behifar M.¹, Aghighi H.^{2*}, Matkan A.A.³, Salehi Shahrabi H.⁴

1. Space Research Institute, Iranian Space Research Center
2. Assistant Prof. of R.S. & GIS Research Center, Shahid Beheshti University
3. Prof. of R.S. & GIS Research Center, Shahid Beheshti University
4. Ph.D. Student of R.S. & GIS Research Center, Shahid Beheshti University

Abstract

Leaf area index (LAI) derived from remotely sensed images is considered as an important index for spatial modelling of vegetation productivity. Traditionally, the spectral vegetation indices (VIs) derived from the red (R) and near infrared (NIR) reflectance values have been utilized to statistically estimate LAI. However, most of these VIs saturate at some level of LAI. This limitation was over-come by using the reflectance spectra in the red-edge region. Therefore, it is necessary to evaluate the capability of different VIs derived from RS data to estimate the LAI of silage maize. For this purpose, five field sampling campaigns which were near-simultaneous with Sentinel II over-passes were conducted by the Space Research Center, Iranian Space Research Center and totally 234 samples were collected from the silage maize fields, in Magsal, Qazvin. Then, 13 VIs from the time series of Sentinel-2 imagery were computed and employed to statistically estimate the LAI values. The results showed that Enhanced vegetation index (EVI) with $R = 0.76$ outperformed other VIs to estimate LAI of silage maize. Moreover, the *RMSE* values of non-linear regression models were higher than the linear ones.

Keyword: Corn, Remote Sensing, Vegetation Index, Leaf Area Index.

* Correspondence Address: R.S. & GIS Research Center, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Tel: 021-29902283
Email: hossein.aghighi@gmail.com