



نسخه از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

۳۳-۴۸



ارزیابی اثر اشباع شاخص‌های گیاهی در محاسبه شاخص سطح برگ محصولات زراعی

مائده بهی^۱، محسن آزادبخت^۲، فرزانه حدادی^۳، علی اکبر متکان^۴

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۸/۲۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۲/۱

چکیده

شاخص‌های پوشش گیاهی، برای برآورد پارامترهای پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بکار گرفته می‌شوند. با وجود قابلیت‌های فراوان، بسیاری از این شاخص‌ها در مقادیر بالای پوشش گیاهی دچار خطا می‌شوند و قادر به برآورد صحیح پارامتر مورد بررسی نیستند. گیاه یونجه به دلیل تراکم و مقدار کلروفیل بالا می‌تواند شاخص‌های سنجش از دوری پوشش گیاهی را اشباع کند و امکان مطالعه و بررسی تغییرات آن از طریق سنجش از دور محدود می‌شود. با وجود این، تمام شاخص‌ها بصورت یکسان عمل نمی‌کنند و از این نظر با یکدیگر اختلاف‌هایی دارند. در این تحقیق، عملکرد شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی در مقادیر مختلف شاخص سطح برگ گیاه یونجه بررسی شده است. نتایج تحقیق نشان داده است که شاخص‌های CI_{green} ، $CI_{rededge}$ و $NGRDI$ بهترین عملکرد را در مقادیر LAI بالا داشته و حساسیت کمتری به اشباع از خود نشان داده‌اند. در مقابل شاخص‌های $NDVI$ ، $NDREI$ و $GNDI$ عملکرد مناسبی نداشته و در مقادیر متوسط و بالای سطح برگ اشباع می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: اشباع شاخص، سنجش از دور، شاخص پوشش گیاهی، یونجه.

۱- مقدمه

شاخص سطح برگ^۱ (LAI) پارامتر مهمی برای توصیف فرایندهای فیزیکی و زیستی گیاهان است. سنجش از دور رویکرد جدیدی برای برآورد شاخص سطح برگ فراهم کرده است. در بخش مرئی طیف الکترومغناطیس پوشش گیاهی بخش زیادی از تابش را جذب می‌کند و در نتیجه، بازتاب نسبتاً پایینی دارد. در محدوده قرمز طیف الکترومغناطیس به دلیل کلروفیل موجود در برگ‌ها و اثر جذبی آنها بر طیف ورودی پدیده جذب غالب است. در بخش مادون قرمز نزدیک، بازتاب پوشش گیاهی بالا است. شاخص‌های پوشش گیاهی متعددی براساس این ویژگی طیفی پوشش گیاهی طراحی شده‌اند. وقتی که LAI گیاه به حد معینی رسید، بازتاب تاج پوشش در محدوده مرئی همراه با رشد گیاه تغییرات محدودی خواهد داشت که به عنوان اشباع شاخص سطح برگ شناخته می‌شود (Zhao et al., 2013; Haboudane et al., 2004; Gitelson, 2004). نتایج تحقیقات پیشین نشان داده است که قسمت‌های پایینی گیاه سهم کمتری در بازتاب تاج پوشش دارند و توزیع زاویه‌ای برگ‌ها و زاویه زینتی دید دو عامل تاثیرگذار در اشباع LAI تاج پوشش در تصاویر سنجش از دور محسوب می‌شوند (Stenberg, 2004). دلیل قابل قبول برای اشباع شاخص‌ها آن است که با توسعه گیاه، اختلاف بین بازتاب محدوده قرمز و مادون قرمز نزدیک کاهش می‌یابد. ظرفیت جذب کلروفیل در محدوده قرمز کاهش می‌یابد، درحالی‌که ظرفیت پنخس چندگانه در محدوده مادون قرمز نزدیک به دلیل ساختار پیچیده تاج پوشش افزایش می‌یابد (Zhao et al., 2013).

شاخص‌های گیاهی سنجش از دور، تحت تاثیر تغییرات بازتاب خاک، ساختار تاج پوشش، هندسه دید و شرایط اتمسفری قرار می‌گیرند. در مقایسه با مطالعات مربوطه تصحیح اثر خاک و اتمسفر، مطالعات زیادی در زمینه اثر اشباع شاخص زیاد انجام نشده است (Wang et al, 2007). اشباع شدن شاخص عواقب مهمی برای شناسایی تغییرات و پایش پویایی پوشش

گیاهی سطح زمین دارد. به همین دلیل، مهم‌ترین ویژگی یک شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته، خطی بودن ارتباط آن با پارامتر بیوفیزیکی مورد مطالعه در شرایط مختلف پوشش گیاهی است. بهبود ارتباط خطی و کاهش اثر اشباع دقت برآورد پارامترها را با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی افزایش می‌دهد (Gitelson, 2004). محققان نشان داده‌اند که حساسیت شاخص‌های پوشش گیاهی به کمیت‌های بیوفیزیکی نظیر LAI و درصد پوشش همراه با افزایش تراکم پوشش گیاهی به بیشتر از یک مقدار آستانه، کاهش می‌یابد (Gitelson et al., 2002; Small and Lu, 2006). شاخص NDVI در مناطقی که پوشش گیاهی ۱۰۰ درصد دارند، نتایج ضعیفی ارائه می‌کند و بنابراین برای ارزیابی بایومس در اوج فصل رویش مناسب نیست (Thenkabail, 2000). تحقیقات مختلف، مقادیر متفاوتی را برای مقدار اشباع شاخص NDVI معرفی کرده‌اند که بسته به نوع گیاه از حدود ۱/۵ تا ۸ متغیر است (Haboudane, 2004; Anderson, 2004). وایس^۲ (۱۹۹۹) نتیجه گرفت که با استفاده از مدل‌های فیزیکی و مدل شبکه عصبی نمی‌توان مقادیر LAI ۴ تا ۸ را برآورد کرد و دلیل آن را اشباع بازتاب پوشش گیاهی در مقادیر بالای LAI عنوان کرده است. با افزایش LAI اختلاف بازتاب باندهای قرمز و مادون قرمز کاهش می‌یابد و سبب اشباع بازتاب می‌شود (Weiss et al., 1999). ژانگ^۳ و همکاران (۲۰۱۰) همبستگی بالایی بین LAI و EVI مشاهده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد رابطه خطی بین EVI و LAI بهتر از رابطه بین NDVI و LAI است (Zhang et al., 2010). تحقیقات مختلفی اشاره کرده‌اند که باند سبز با پارامترهای گیاه همبستگی خوبی دارد. شاخص‌هایی نظیر GNDVI و VARI برای غلبه بر مشکل اشباع شاخص‌هایی نظیر NDVI ارائه شده‌اند. یودر^۴ و

1. Leaf Area Index
2. Weiss
3. Zhang
4. Yoder

کشت می‌شود، بنابراین یکی از گیاهانی است که مطالعه آن با مشکل اشباع شاخص‌های پوشش گیاهی مواجه است و به دلیل افقی بودن برگ‌های گیاه، اشباع شاخص از مقادیر کمتر LAI آغاز می‌شود. لذا، احتمال اشباع شاخص در دوره زیادی از فصل رویش وجود دارد. بنابراین ضروری است از نحوه عملکرد شاخص‌های مختلف برای برآورد شاخص LAI محصول یونجه اطلاع حاصل شود. هدف از تحقیق حاضر، بررسی انواع شاخص‌های پوشش گیاهی و تعیین محدوده اشباع شاخص‌ها در محصول یونجه است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مطالعه

مزارع کشت و صنعت مگسال به‌عنوان منطقه مطالعاتی این تحقیق انتخاب شده است. این مزارع در بخش آبیگ شهرستان قزوین، بین عرض جغرافیایی ۳۶/۰۹ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰/۱۰ درجه شرقی قرار دارند. اقلیم منطقه نیمه‌خشک و سرد است. میانگین بارندگی سالیانه، حدود ۲۲۰ میلی‌متر است. شرکت مگسال یکی از بزرگترین شرکت‌های فعال در بخش کشاورزی و دامپروری کشور است. بخش زراعت آن، دارای اراضی به وسعت یک هزار هکتار است. عمده تولیدات شرکت مگسال؛ شامل غلات بذری و غیربذری، دانه‌های روغنی بذری و غیر بذری، انواع علوفه‌های دامی و چغندر قند است. موقعیت جغرافیایی کشت و صنعت مگسال در شکل ۱، نشان داده شده است.

۲-۲- تصاویر مورد استفاده

ماهواره Sentinel2 که به تازگی توسط آژانس فضایی اروپا به فضا ارسال شده است، باندهای مناسبی برای مطالعه پوشش گیاهی دارد. توان تفکیک مکانی بالای این سنجنده (۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر) امکان انجام مطالعات کشاورزی را فراهم آورده است. جدول ۱، ویژگی‌های سنجنده MSI ماهواره Sentinel2 را نشان می‌دهد.

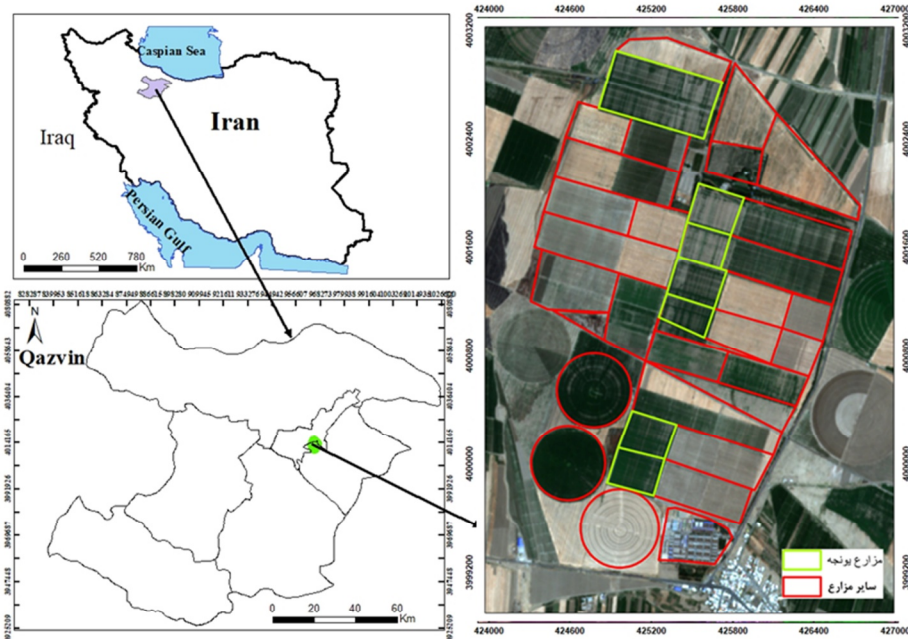
همکاران (۱۹۹۴) از باند سبز در شاخص گیاهی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که همبستگی بهتری با فعالیت فتوسنتزی درختان در مقایسه با باند قرمز دارد (Yoder et al., 1994). گیتلسون^۱ و همکاران (۱۹۹۸) حساسیت باندهای مرئی را به کلروفیل بررسی کردند و نتیجه گرفتند باندهای سبز به کلروفیل حساس‌تر از باند قرمز است و شاخص GNDVI را ارائه دادند (Gitelson et al., 1998). گیتلسون و همکاران (۲۰۰۲) از باند سبز برای برآورد درصد پوشش گیاهی استفاده کردند و نتایج رضایت‌بخشی بدست آوردند (Gitelson et al., 2002).

تصاویر ابر طیفی، امکان بررسی پوشش گیاهی را با استفاده از تصاویر باریک باند به جای تنها دو باند قرمز و مادون قرمز فراهم کرده‌اند. مطالعات نشان داده است که باندهای باریک واقع شده در محدوده لبه قرمز (۶۸۰ تا ۷۵۰ نانومتر) توسط مقدار کلروفیل و LAI تاج پوشش تحت تاثیر قرار می‌گیرند (Thomas and Gaussman 1987, Guyot et al. 1992, Todd et al. 1999, Blackburn and Pitman 1998). تاد و همکاران (۱۹۹۸) نتیجه گرفتند که موقعیت لبه قرمز به تغییرات بایومس پوشش گیاهی سبز در مقایسه با پوشش گیاهی مسن حساس است (Todd et al., 1998). لوکاس و همکاران (۲۰۰۰) همبستگی قوی بین LAI و موقعیت لبه قرمز در جنگل‌های سوزنی برگ و لوز پیدا کردند (Lucas et al., 2000). با توجه به این پس زمینه انتظار می‌رود شاخص‌های باریک باند قابلیت مناسبی برای مطالعه پوشش گیاهی متراکم فراهم کنند.

انواع مختلف گیاهان به دلیل ساختار عمودی متفاوتشان، ویژگی‌های تابشی متفاوتی دارند. محققان نشان داده‌اند که انواع شاخص‌های پوشش گیاهی در مقادیر متفاوت LAI اشباع می‌شوند (Ludeke et al., 1991; Haboudane et al., 2004; Myneni et al., 2004; Anderson et al., 1997). تحقیقات مختلف نشان داده است نوع گیاه، شاخص و باندهای مورد استفاده در نحوه اشباع شاخص تاثیر می‌گذارند. گیاه یونجه، دارای برگ‌های افقی است و با تراکم بالا در مزارع

1. Gitelson

ارزیابی اثر اشباع شاخص‌های گیاهی در محاسبه شاخص سطح برگ محصولات زراعی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی کشت و صنعت مگسال قزوین و مزارع یونجه در آن

جدول ۱. ویژگی‌های سنجنده MSI ماهواره Sentinel2

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

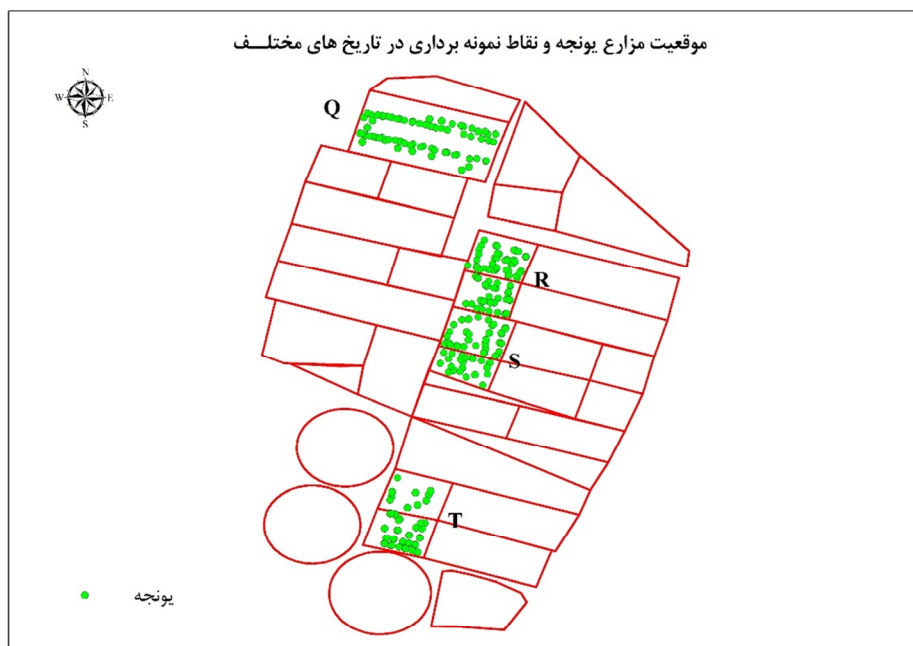
دستگاه Sun Scan Canopy Analysis system اندازه‌گیری شد. در اولین نوبت برداشت میدانی، نمونه‌برداری به صورت تصادفی سیستماتیک انجام شده است. با فاصله مناسب از مرز مزارع دو ترانسکت در هر مزرعه برداشت شد. در طول هر ترانسکت نقاط نمونه‌برداری با فاصله ۹۰ متر از یکدیگر برداشت شده‌اند. موقعیت ترانسکت‌ها با توجه به حداکثر تغییرپذیری مزرعه انتخاب و نقطه نمونه ابتدای هر ترانسکت به صورت تصادفی انتخاب شده است. در نوبت‌های بعدی با در اختیار داشتن اطلاعات اولیه و کلی از منطقه و کمک گرفتن از تصاویر ماهواره‌ای موجود، نقاط نمونه جدید به نحوی انتخاب شد که بتواند تمام تغییرات قابل مشاهده در سطح مزارع را پوشش دهد و همچنین دامنه مقادیر مربوط به پارامتر بطور کامل و قابل قبول برداشت شود. در شکل ۲، مزارع ذرت نمونه‌برداری شده و موقعیت نقاط نمونه‌برداری نشان داده شده است. محدوده مقادیر شاخص سطح برگ نمونه‌برداری شده، بین ۰/۱ تا ۶ (در طول فصل رشد و نقاط مختلف مزرعه) متغیر بوده است.

۲-۳- نمونه‌برداری جهت تخمین پارامترهای کمی گیاه چندین نوبت نمونه‌برداری همزمان با گذر ماهواره در طول فصل رشد، انجام و مقدار شاخص سطح برگ محصول یونجه در مزارع مختلف بصورت غیر تخریبی اندازه‌گیری شده است. در هر مرحله از نمونه‌برداری از مزارع مختلف با شرایط رویشی متفاوت نمونه‌برداری شد. جدول ۲، تاریخ‌های نمونه‌برداری را نشان داده است.

جدول ۲. تاریخ‌های نمونه‌برداری میدانی در کشت و صنعت مگسال

تاریخ نمونه‌برداری	زمان گذر ماهواره
۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ تیرماه ۱۳۹۶	۱۱ تیر
۲۷ و ۲۸ تیرماه ۱۳۹۶	۲۶ تیر
۱۲ و ۱۳ مرداد ماه ۱۳۹۶	۱۳ مرداد
۲ و ۳ شهریور ماه ۱۳۹۶	۲ شهریور
۳ مهر ماه ۱۳۹۶	۲۹ شهریور

برای نمونه‌برداری از پلات‌های ۱*۱ متر استفاده شد و در هر نقطه نمونه، پارامترهای مقدار کلروفیل، شاخص سطح برگ، وضعیت آسمان و ساعت نمونه‌برداری ثبت شد. شاخص سطح برگ به کمک

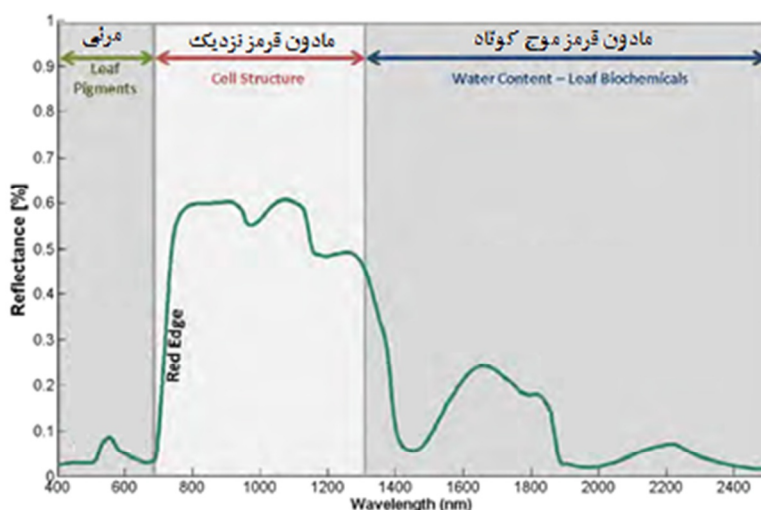


شکل ۲. موقعیت مزارع و نقاط نمونه‌برداری

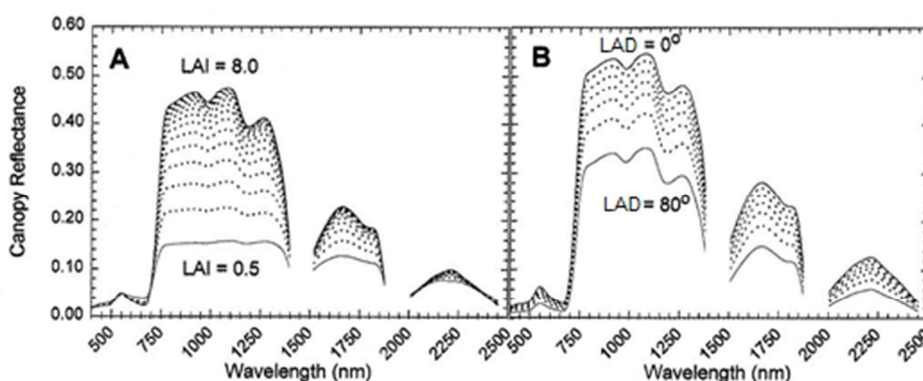
۲-۴- ویژگی بازتاب گیاه

بازتاب گیاه در دو سطح برگ و تاج پوشش مطالعه می‌شود. در سطح برگ، تابش رسیده در محدوده مرئی، توسط رنگدانه‌ها جذب می‌شود و تابش رسیده در بخش مادون قرمز نزدیک، توسط ساختارهای سلول‌های برگ، به شدت بازتاب می‌شود. در بخش مادون قرمز موج کوتاه کوتاه بازتاب تحت تاثیر آب، نیتروژن و اشکال مختلف کرین قرار دارد (Major et al., 1990). شکل ۳ ویژگی‌های بازتاب پوشش گیاهی را نشان داده است. در سطح تاج پوشش میزان برگ، اجزای سبز و ساختمان

تاج پوشش در تعیین خصوصیات پخش و جذب پوشش گیاهی نقش مهمی دارند. دو ویژگی مهم تاج پوشش که در بازتاب تاثیرگذار است LAI و LAD هستند. LAI عبارتست از مساحت برگ‌های سبز بر واحد سطح که از مهمترین ویژگی‌های تاج پوشش است و مهمترین تاثیر را بر بازتاب تاج پوشش دارد. پارامتر LAD با نام توزیع زاویه برگ‌ها شناخته می‌شود و جهت قرارگیری برگ‌ها در تاج پوشش را نشان می‌دهد. در شکل ۴، تاثیر LAI و LAD بر بازتاب نشان داده شده است. با کاهش زاویه برگ‌ها، بازتاب به شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۳. شمای کلی منحنی بازتاب طیفی برگ (Rivera, 2014)



شکل ۴. تاثیر شاخص سطح برگ و توزیع زاویه‌ای برگ‌ها در میزان بازتاب تاج پوشش (Asner, 1998)

1. Leaf Area Index
2. Leaf Angel Distribution

الگوریتم استفاده می‌کند. با استفاده از اطلاعات تصویر و مدل رقومی ارتفاع، میزان بخار آب و عمق نوری اتمسفر محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از جداول تبدیل موجود در نرم افزار مدل اتمسفری متناسب با شرایط تصویر برداری فراخوانی شده و روی تصاویر اعمال می‌شود.

تصاویر L1C ماهواره Sentinel2 از نظر هندسی تصحیح شده هستند، اما با توجه به اینکه در این طرح، از سری زمانی تصاویر استفاده می‌شود و نیز تطبیق اطلاعات تصویر و نمونه برداری زمینی مورد نیاز است، لازم است تا تصاویر با دقت زیر پیکسل از نظر هندسی با یکدیگر و نیز با موقعیت زمینی تطابق داشته باشند. بنابراین، ابتدا تطابق هندسی تصاویر با نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری و تصاویر گوگل ارث کنترل شده و سپس انطباق تصاویر با یکدیگر ارزیابی شد. تصاویری که نیاز به تصحیح هندسی داشتند با استفاده از نقاط کنترل تهیه شده از تصاویر گوگل ارث با دقت بیشتر از ۱ پیکسل، تصحیح شدند. سپس مقادیر شاخص‌های گیاهی با استفاده از باندهای تصویر محاسبه شد. با استفاده از روش‌های رگرسیونی، رابطه بین مقادیر شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده، مقایسه شدند.

شاخص‌های گیاهی سنجش از دور، برای ارزیابی کمی و کیفی پوشش گیاهی، با استفاده از باندهای طیفی ارائه شده‌اند. این شاخص‌ها برای کاهش تغییر پذیری ناشی از عوامل بیرونی (نظیر شرایط اتمسفر و تابش) و عوامل داخلی (نظیر خاک و توزیع زاویه‌ای برگ) بکار می‌روند و ویژگی آنها بازسازی پاسخ طیفی گیاه و حداقل کردن اثر پارامترهای اشاره شده، است و در مقایسه با هر یک از باندهای طیفی، حساسیت بهتری برای تعیین پوشش گیاهی دارند (Asrar et al., 1984). جدول ۳، برخی از شاخص‌های گیاهی را که در مطالعات برآورد شاخص سطح برگ دقت‌های قابل قبولی داشته‌اند، ارائه کرده است.

۲-۵- پردازش داده‌ها

پیش از اجرای پردازش‌ها، تصاویر از نظر اتمسفری و هندسی تصحیح شدند. ابتدا تصاویر از نظر پوشش ابر، بررسی شدند و تصاویر تاریخ‌هایی که منطقه مطالعه دارای پوشش ابر بوده است، ماسک شد. سپس تصاویر با استفاده از الگوریتم Sen2cor نرم‌افزار SNAP از نظر اتمسفری تصحیح شدند. الگوریتم Sen2cor به منظور تصحیح اتمسفری تصاویر ماهواره Sentinel2 طراحی شده است و از تصاویر سطح L1C، به عنوان ورودی

جدول ۳. شاخص‌های مختلف سنجش از دوری برای برآورد کلروفیل و شاخص سطح برگ

نام	محدوده طیفی	علامت اختصاری	معادله	مرجع
Normalized difference vegetation index	Red-NIR	NDVI	$\frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red})}$	Rouse et al., 1974; Tucker, 1979
Optimized soil adjusted vegetation index	Red-NIR	OSAVI	$\frac{(1+0.16)(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red} + 0.16)}$	Rondeaux et al., 1996
Green normalized difference vegetation index	Green-NIR	GNDVI	$\frac{(R_{NIR} - R_{Green})}{(R_{NIR} + R_{Green})}$	Gitelson et al., 1996
Chlorophyll index-Green	Green-NIR	CIgreen	$\frac{R_{rededge7}}{R_{Green}} - 1$	Gitelson et al., 2003
normalized green red difference index	Vis	NGRDI	$\frac{(R_{Green} - R_{Red})}{(R_{Green} + R_{Red})}$	Tucker, 1979
Normalized difference red edge index	RE-NIR	NDREI	$\frac{(R_{NIR} - R_{Rededge})}{(R_{NIR} + R_{Rededge})}$	Gitelson and Merzlyak, 1994
Chlorophyll index- Red Edge	RE-NIR	CIrededge	$\frac{R_{rededge7}}{R_{Rededge5}} - 1$	Gitelson et al., 2003
Normalized Difference Water Index	NIR-SWIR	NDWI	$\frac{(R_{NIR} - R_{MIR})}{(R_{NIR} + R_{MIR})}$	Gao, 1995

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

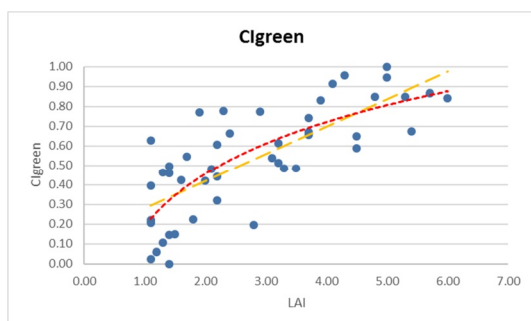
۳- نتایج

شکل ۵ (الف تا ط) بعد نمودار پراکندگی مقدار شاخص پوشش گیاهی و LAI یونجه را نشان داده است. خطوط رگرسیون نمایی و خطی به هر یک از این نمودارها برازش داده شده است. لازم به ذکر است که برای آنکه شاخص‌های مختلف با یکدیگر قابل مقایسه شوند، مقادیر همه شاخص‌ها در این شکل‌ها بین صفر و یک نرمال شده است.

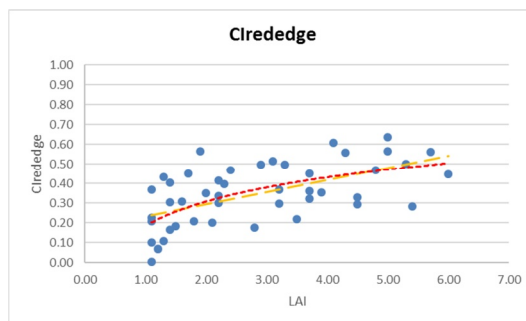
در مرحله اول توانایی شاخص‌های مختلف در مدل‌سازی LAI بررسی شده است. جدول ۴ مقدار همبستگی و ضریب تعیین رابطه بین شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی و مقدار LAI یونجه را نشان داده است. از این جدول مشاهده می‌شود که شاخص‌های CIgreen، CIrededge و NGRDI بیشترین همبستگی را با مقادیر LAI داشته‌اند. تمام شاخص‌ها با شاخص سطح برگ در ۹۹ درصد معنی دار بوده است.

جدول ۴. مقدار همبستگی و ضریب تعیین رابطه بین شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی و مقدار LAI محصول یونجه

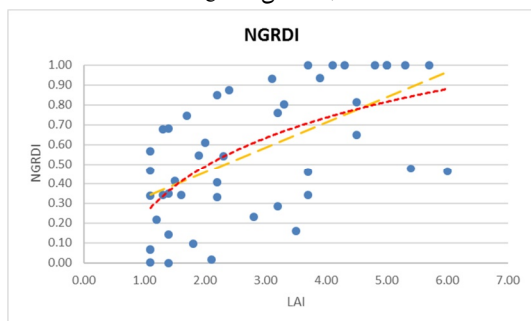
شاخص	همبستگی	ضریب تعیین	RMSE	شاخص	همبستگی	ضریب تعیین	RMSE
CIgreen	۰/۷۰۶	۰/۴۹۸	۱/۱۰۲	GNDVI	۰/۶۴۴	۰/۴۴۴	۱/۱۹۰
CIrededge	۰/۶۸۴	۰/۴۶۸	۱/۱۳۵	NDWI	۰/۶۳۱	۰/۳۹۸	۱/۲۰۷
NGRDI	۰/۶۶۰	۰/۴۳۶	۱/۱۶۸	OSAVI	۰/۶۲۴	۰/۳۸۹	۱/۲۱۶
NDREI	۰/۶۴۹	۰/۴۲۱	۱/۱۸۳	NDVI	۰/۶۱۳	۰/۳۷۵	۱/۲۳۰



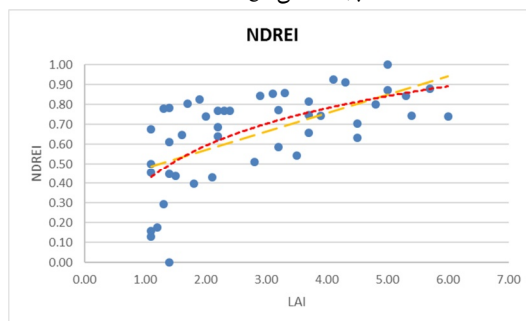
الف) شاخص CIgreen



ب) شاخص CIrededge



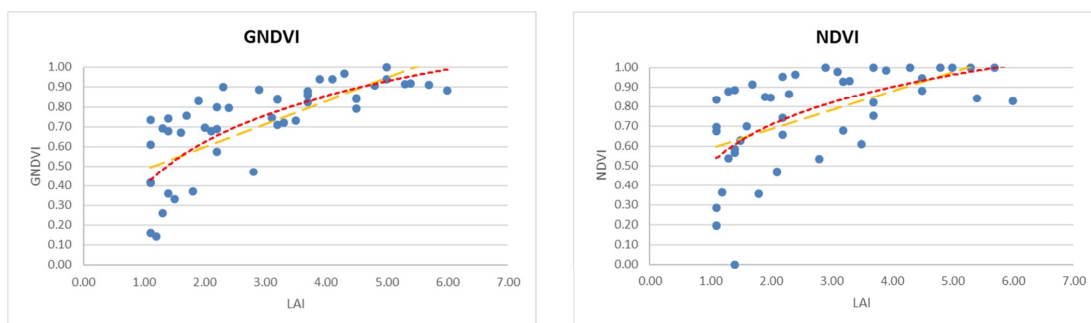
ج) شاخص NGRDI



د) شاخص NDREI

شکل ۵. نمودار پراکندگی مقدار شاخص پوشش گیاهی و LAI یونجه

مائده بهی فر و همکاران



ح) شاخص GNDVI

ط) شاخص NDVI

خط قرمز، نشان دهنده تابع لگاریتمی و خط نارنجی نشان دهنده تابع خطی برازش داده شده به داده‌ها است.
* برای آنکه شاخص‌های مختلف با یکدیگر قابل مقایسه شوند، در این شکل مقادیر همه شاخص‌ها بین صفر و یک نرمال شده است.

ادامه شکل ۵. نمودار پراکندگی مقدار شاخص پوشش گیاهی و LAI یونجه

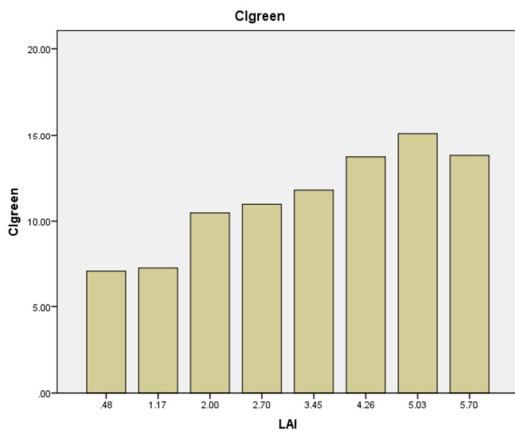
کلاس‌های مختلفی تقسیم شدند و اشباع شاخص در کلاس‌های مختلف LAI بررسی شد. جدول ۵، محدوده تغییرات LAI در هر کلاس و مقدار میانگین آن را نشان می‌دهد. شکل ۶ (الف تا ط) مقدار متوسط شاخص پوشش گیاهی را به ازای هر کلاس LAI نشان داده است.

با توجه به آنکه پراکندگی داده‌ها، تصمیم‌گیری در مورد تعیین آستانه‌های مناسب برای اشباع را دشوار می‌کند، در مرحله بعد بر اساس مقدار LAI داده‌ها به کلاس‌های مختلف تقسیم شدند و در هر کلاس اثر اشباع شاخص بصورت جداگانه بررسی شده است. به این منظور داده‌های موجود، بر اساس میزان LAI به

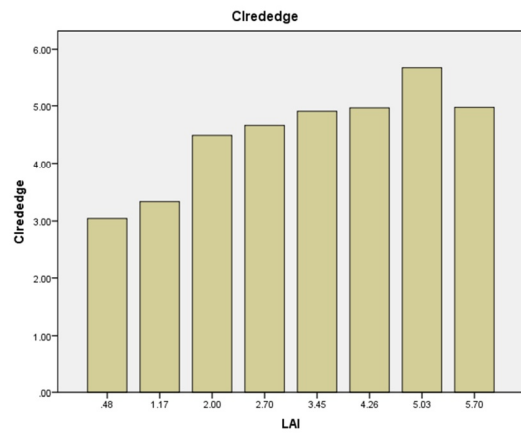
جدول ۵. محدوده تغییرات LAI در هر کلاس و مقدار میانگین کلاس

متوسط	حد بالا	حد پایین	کلاس
۰/۴۷۴	۰/۸۴۸	۰/۱	۱
۱/۲۲۳	۱/۵۹۷	۰/۸۴۸	۲
۱/۹۷۱	۲/۳۴۶	۱/۵۹۷	۳
۲/۷۲۰	۳/۰۹۵	۲/۳۴۶	۴
۳/۴۶۹	۳/۸۴۳	۳/۰۹۵	۵
۴/۲۱۸	۴/۵۹۲	۳/۸۴۳	۶
۴/۹۶۶	۵/۳۴۱	۴/۵۹۲	۷
۵/۷۱۵	۶	۵/۳۴۱	۸

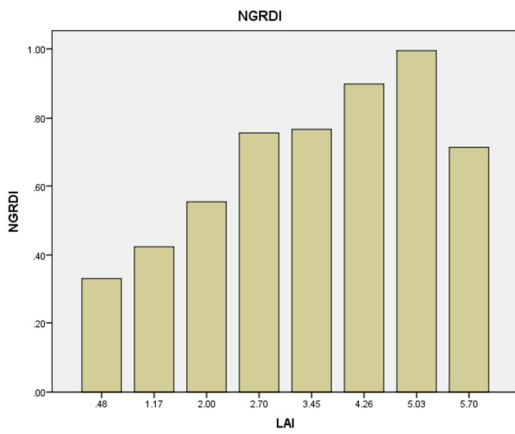
ارزیابی اثر اشباع شاخص‌های گیاهی در محاسبه شاخص سطح برگ محصولات زراعی



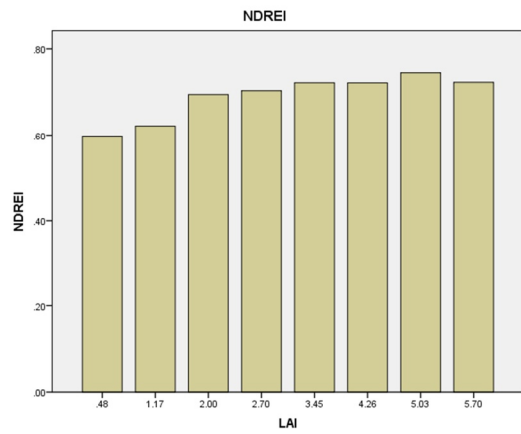
الف) شاخص Clgreen



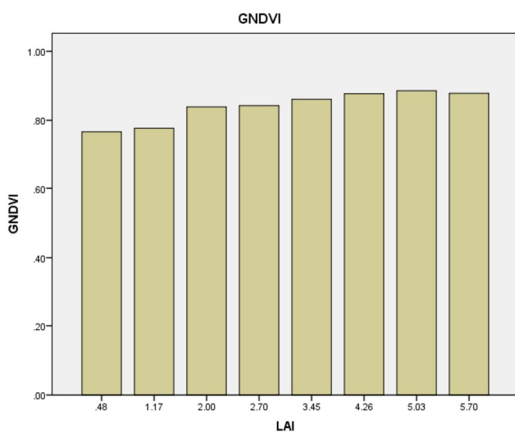
ب) شاخص Clrededge



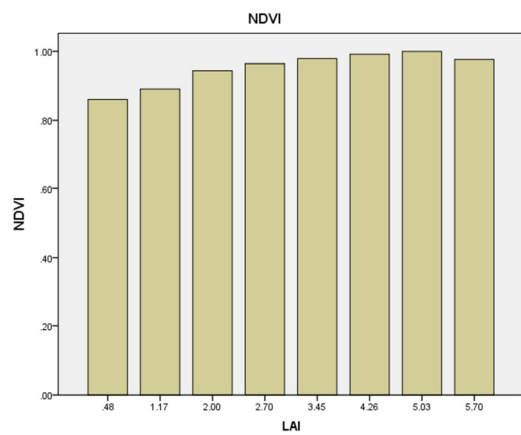
ج) شاخص NGRDI



د) شاخص NDREI



ح) شاخص GNDVI



ط) شاخص NDVI

شکل ۶. مقدار متوسط شاخص پوشش گیاهی به ازای هر کلاس LAI

کند. نکته قابل توجه، در مورد شاخص NGRDI پراکنش بالای مقادیر شاخص در یک مقدار LAI است که در شکل ۵ (ج) قابل مشاهده است. این مساله سبب کاهش کارایی شاخص شده است.

همانطور که در شکل ۶ (د) دیده می‌شود، شاخص NDREI از کلاس ۳ به بعد (متوسط LAI برابر ۱/۹۷) تفکیک مناسبی بین مقادیر مختلف LAI ایجاد نمی‌کند و با تغییر کلاس شاخص سطح برگ مقدار شاخص NDREI تنها به صورت جزئی تغییر می‌کند. مشابه آن شاخص GNDVI به صورت بسیار جزئی قادر به نمایش تغییرات مقادیر شاخص سطح برگ بوده است که با توجه به پراکنش موجود در ماهیت نمونه برداری‌های میدانی، به نظر می‌رسد این تفاوت جزئی، پتانسیل مناسبی را برای مدل‌سازی شاخص سطح برگ گیاه یونجه فراهم نمی‌کند. از نمودار ۶ (ح)، می‌توان نتیجه گرفت که شاخص GNDVI از کلاس شاخص سطح برگ سوم (با LAI متوسط برابر با ۲) به اشباع رسیده است. در نمودار مربوط به شاخص NDVI (شکل ۶ ط) به خوبی مشاهده می‌شود که این شاخص بسیار سریع و از مقادیر LAI مربوط به کلاس ۳ (LAI متوسط بیشتر از ۲) اشباع شده است و مقادیر شاخص NDVI در کلاس‌های بعد از آن به صورت بسیار جزئی تغییر می‌کند.

نکته حائز اهمیت که در همه شاخص‌ها نیز مشهود است، مقدار شاخص‌های پوشش گیاهی در انتهای دوره رشد یونجه و همزمان با حداکثر مقدار LAI کاهش می‌یابد. هرچند بزرگی این کاهش در شاخص‌های مختلف متفاوت است، اما در همگی شاخص‌ها قابل مشاهده است. این دوره همزمان با مرحله گلدهی گیاه یونجه است، در این مرحله، حضور گل‌ها بر بازتاب طیفی گیاه و در نتیجه بر مقادیر شاخص تاثیر گذاشته و موجب کاهش آن شده است. بنابراین استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی برای برآورد LAI در این دوره می‌تواند منجر به برآورد کمتر از مقدار واقعی شود.

در این شکل‌ها، محور افقی نشان‌دهنده متوسط مقدار LAI هر کلاس و محور عمودی نشان‌دهنده مقدار شاخص است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، شاخص‌های CIGreen و CIrededge تا مقادیر بالای شاخص سطح برگ به اشباع نرسیده‌اند که این امر می‌تواند توجه کننده برآزش بهتر مدل به این شاخص‌ها و ضریب تعیین بالاتر آنها باشد. در نمودار مربوط به سایر شاخص‌ها، اثر اشباع در مقادیر بالای شاخص سطح برگ مشهود است. شاخص‌های مختلف در مقادیر متفاوتی از LAI به اشباع می‌رسند. در میان شاخص‌های مختلف، شاخص NDVI و NDREI سریع‌تر از سایرین به اشباع می‌رسند. شاخص‌های NGRDI و GNDVI با تاخیر بیشتری به اشباع می‌رسند.

۴- بحث

همانطور که در شکل‌های ۶ (الف) و (ب) دیده می‌شود، با افزایش مقدار LAI مقدار شاخص‌های CIGreen و CIrededge به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و این افزایش تا حداکثر مقدار LAI ادامه دارد. بنابراین، این شاخص‌ها در محصول یونجه منطقه مورد مطالعه به اشباع نرسیده‌اند. کاهش مقدار شاخص‌های پوشش گیاهی در آخرین کلاس LAI ناشی از مرحله گلدهی محصول یونجه است. در این مرحله، با شروع گلدهی گیاه مقدار شاخص‌های گیاهی کاهش می‌یابد (Shen., et al, 2009;2010).

مقایسه شاخص‌های CIGreen و CIrededge نشان می‌دهد که شاخص CIGreen، با نظم بیشتر و به صورت تدریجی از روند تغییرات LAI پیروی می‌کند که موجب شده است، بهترین عملکرد را در برآورد مقدار شاخص سطح برگ گیاه یونجه داشته باشد.

مقدار شاخص NGRDI، نیز در کلاس‌های مختلف همراه با مقدار LAI افزایش می‌یابد، اما روند تغییرات شاخص NGRDI و مقدار LAI به صورت یکنواخت نیست. البته تغییرات این شاخص، قادر نخواهد بود مقادیر LAI کلاس‌های ۴ و ۵ را از یکدیگر تفکیک

می‌شود. باند سبز در محدوده وسیع تری از کلروفیل (حدود ۰/۳ تا ۰/۴۵ میکروگرم بر سانتی متر مربع) حساسیت خود را حفظ می‌کند و بنابراین در مراحل میانی رویش نیز قابل استفاده است (Gitelson et al., 1997). با افزایش مقدار شاخص سطح برگ، غلظت کلروفیل در واحد سطح به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی از مقایسه عملکرد شاخص‌های NGRDI و NDREI به دست می‌آید. به صورتی که شاخص NGRDI که از ترکیب باندهای سبز و قرمز استفاده می‌کند، بهتر از NDREI که از ترکیب باندهای مادون قرمز نزدیک و لبه قرمز استفاده می‌کند، بوده است. پس از آن استفاده از باندهای لبه قرمز توانسته است به حل مشکل اشباع شاخص پوشش گیاهی در محصول یونجه تا حدی کمک کند.

عرض باندهای لبه قرمز موجود در سنجنده MSI ماهواره Sentinel2 معادل ۱۲ و ۲۰ نانومتر است. در مقایسه با باندهای سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک که به ترتیب پهنای باندهای معادل ۳۵، ۳۰ و ۱۱۵ نانومتر دارند، باندهای لبه قرمز موجود در ماهواره Sentinel2 را می‌توان باریک‌بند در نظر گرفت. به دلیل عرض باندهای کمتر، انرژی ثبت شده توسط سنجنده در هر یک از باندهای لبه قرمز کمتر از باند عریض مشابه خود است. بنابراین، یکی از دلایل مقاومت به اشباع در شاخص‌های مبتنی بر باندهای لبه قرمز می‌تواند ناشی از این حقیقت باشد که انرژی رسیده به سنجنده در این باندها کمتر از باندهای عریض باند بوده و بنابراین اشباع دیرتر اتفاق می‌افتد.

علاوه بر این، باندهای لبه قرمز از نظر طیفی در حفاصل بین طول موج قرمز و مادون قرمز نزدیک واقع شده‌اند. در محدوده قرمز طیف الکترومغناطیس کلروفیل جذب شدیدی دارد. در محدوده مادون قرمز نزدیک ساختار سلول‌های برگ موجب بازتاب شدید می‌شوند. تغییر از جذب شدید به بازتاب حداکثر در محدوده لبه قرمز طیف اتفاق می‌افتد. به همین دلیل تغییر در هر دو پارامتر ساختار برگ و مقدار کلروفیل

برآورد LAI، با سنجش از دور با دو مساله مواجه است. یکی آنکه، بسته به نوع گیاه، شاخص‌های گیاهی در یک مقدار آستانه LAI به اشباع می‌رسند. دیگر آنکه رابطه یکتایی، بین LAI و شاخص گیاهی انتخاب شده وجود ندارد. بلکه مجموعه‌ای از روابط وجود دارد که هر کدام تابعی از مقدار کلروفیل، زاویه برگ و یا سایر ویژگی‌های تاج پوشش هستند (Haboudane et al., 2004). باندهای لبه قرمز در محدوده ۶۷۰ تا ۶۸۰ نانومتر به رفتار جذبی کلروفیل حساس هستند (Carter and Miller, 1994; Gitelson and Merzlyak, 1997; Dawson et al., 1999). با افزایش مقدار کلروفیل، شیب موقعیت لبه قرمز به سمت طول موج‌های بلندتر متمایل می‌شود (Cho et al., 2008; Curran et al., 1983). عریض شدن عارضه جذبی کلروفیل، موجب حساسیت طول موج‌های ۶۹۰ تا ۷۳۰ نانومتر به تغییرات کلروفیل می‌شود (Carter and Miller, 1994). بنابراین با در اختیار داشتن شاخص‌های پوشش گیاهی که از باندهای لبه قرمز با موقعیت‌های متفاوت استفاده می‌کنند، می‌توان نسبت به شناسایی پوشش گیاهی در دوره‌های مختلف رویش اقدام کرد.

شاخص CIrededge از دو باند لبه قرمز در محاسبات خود بهره می‌گیرد و در مقایسه با شاخص CIgreen که از باندهای سبز و لبه قرمز استفاده می‌کند، قابلیت کمتری از خود نشان داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با ترکیب باندهای سبز و لبه قرمز می‌توان به عملکرد مطلوب تری برای غلبه بر مشکل اشباع شاخص‌های سنجش از دوری دست یافت. تحقیقات مختلفی به مزیت استفاده از باند سبز برای مطالعه پارامترهای پوشش گیاهی اشاره کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به Gitelson و همکاران (۱۹۹۸، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۴) اشاره کرد. باند قرمز، تنها به مقدار پایین کلروفیل (حدود ۳ تا ۵ میکروگرم بر سانتی متر مربع) حساسیت دارد و بنابراین در مراحل اولیه رشد گیاه مناسب است و در مراحل پایانی رشد اشباع

باندھا در یک شاخص و مقایسه عملکرد آن با سایر شاخص‌ها برای غلبه بر اثر اشباع پوشش گیاهی نپرداخته بود. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر باندهای سبز و لبه قرمز می‌تواند تا حد قابل توجهی بر مشکل اشباع شاخص‌های پوشش گیاهی در مقدار LAI بالا غلبه کند.

۵-منابع

- Anderson, M.C., Neale, C.M.U., Li, F., Norman, J.M., Kustas, W.P., Jayanthi, H., & Chavez, J., 2004, **Upscaling ground observations of vegetation water content, canopy height, and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery**, Remote sensing of environment, 92(4), 447-464.
- Asner, G.P., 1998, **Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance**, Remote Sensing of Environment 64(3): 234-253.
- Asrar, G.Q., 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), 300-306.
- Blackburn, G.A., & Steele, C.M., 1999, **Towards the remote sensing of matorral vegetation physiology: Relationships between spectral reflectance, pigment, and biophysical characteristics of semiarid bushland canopies**, Remote sensing of Environment, 70(3), 278-292.
- Carter, G.A., & Miller, R.L., 1994, **Early detection of plant stress by digital imaging within narrow stress-sensitive wavebands**, Remote sensing of environment, 50(3), 295-302.
- Cho, M.A., Skidmore, A.K., & Atzberger, C., 2008, **Towards red edge positions less sensitive to canopy biophysical parameters for leaf chlorophyll estimation using properties optique spectrales des feuilles (PROSPECT) and scattering by arbitrarily inclined leaves (SAILH) simulated data**, International Journal of Remote Sensing, 29(8), 2241-2255.

در محدوده لبه قرمز تاثیر می‌گذارد. تاثیر توام جذب و بازتاب در این ناحیه می‌تواند سبب به تاخیر افتادن اشباع شاخص‌های مبتنی بر باندهای لبه قرمز در مقادیر بالای شاخص سطح برگ شود.

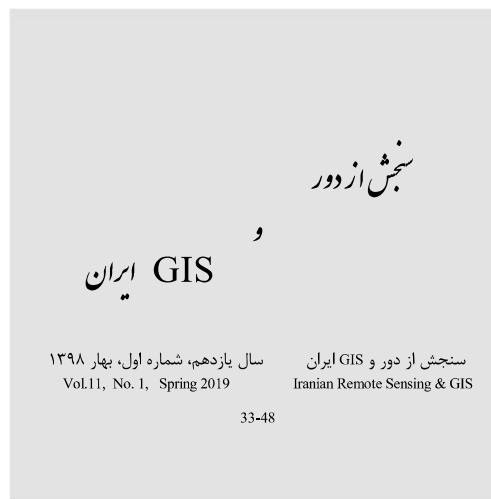
۵- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر اشباع شاخص‌های پوشش گیاهی در مقادیر مختلف LAI محصول یونجه ارزیابی شده است. به همین منظور ابتدا شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی برای برآورد مقدار شاخص سطح برگ ارزیابی و شاخص‌های بهینه شناسایی شدند. در ادامه، اشباع هر یک از شاخص‌ها در مقادیر مختلف LAI بررسی شده است. نتایج تحقیق نشان داده است که شاخص‌های CIrededge و CIGreen در تمام مقادیر LAI حساسیت مناسبی داشته‌اند و در مقادیر بالا اشباع نشده‌اند. در محاسبه این شاخص‌ها، از باندهای لبه قرمز ماهواره Sentinel2 استفاده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که باندهای لبه قرمز در مقابل اشباع سنجنده مقاومت بیشتری دارند. در مقابل شاخص‌های NDVI و GNDVI در مقادیر LAI ۲ و بیشتر (کلاس سوم شکل ۶) کارایی خود را از دست داده‌اند که موید عدم توانایی این شاخص‌ها برای محاسبه شاخص سطح برگ در پوشش‌های گیاهی متراکم است. همچنین نتایج تحقیق نشان داده است که استفاده توام از باندهای سبز و لبه قرمز می‌تواند سبب افزایش عملکرد شاخص‌های پوشش گیاهی برای محاسبه شاخص سطح برگ گیاه یونجه شود. در حالت کلی، شاخص‌هایی که دارای باند سبز بوده‌اند در شرایط LAI بالا بهتر از فرمول‌های مشابه خود عمل کرده‌اند. بنابراین برای غلبه بر مشکل اشباع شاخص‌های پوشش گیاهی پیشنهاد می‌شود از شاخص‌هایی استفاده شود که در محاسبات خود از باندهای سبز و لبه قرمز استفاده می‌کنند.

تحقیقات مختلف به توانایی باندهای سبز و لبه قرمز برای برآورد پارامترهای بیوفیزیکی پوشش گیاهی اشاره کرده‌اند. اما تاکنون تحقیقی به استفاده توام از این

- Curran, P.J., Kupiec, J.A., & Smith, G.M., 1997, **Remote sensing the biochemical composition of a slash pine canopy**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35(2), 415-420.
- Dawson, T.P., Curran, P.J., North, P.R.J., & Plummer, S. E., 1999, **The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: A theoretical analysis**, Remote Sensing of Environment, 67(2), 147-159.
- 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.
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., & Merzlyak, M.N., 1996, **Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS**, Remote sensing of Environment, 58(3), 289-298.
- Gitelson, A.A., et al., 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): 271-282.
- 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., & Kaufman, Y. J., 1998, **MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series—Spectral considerations**, Remote Sensing of Environment, 66(3), 343-350.
- Gitelson, A.A., Stark, R., Grits, U., Rundquist, D., Kaufman, Y., & Derry, D., 2002, **Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction**, International Journal of Remote Sensing, 23(13), 2537-2562.
- Gitelson, A. A., 2004, **Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation**, Journal of plant physiology, 161(2), 165-173.
- Gitelson, A.A., & Merzlyak, M.N., 1997, **Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves**, International Journal of Remote Sensing, 18(12), 2691-2697.
- Guyot, G., Baret, F., & Jacquemoud, S., 1992, **Imaging spectroscopy for vegetation studies**, Imaging spectroscopy: Fundamentals and prospective application, 2, 145-165.
- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Pattey, E., & Vigneault, P., 2004, **Estimation of leaf area index using ground spectral measurements over agriculture crops: Prediction capability assessment of optical indices**, In XXth ISPRS Congress: " Geo-Imagery Bridging Continents". Istanbul, Turkey (pp. 12-23).
- Horler, D.N.H., DOCKRAY, M., & Barber, J., 1983, **The red edge of plant leaf reflectance**, International Journal of Remote Sensing, 4(2), 273-288.
- Lucas, N.S., Curran, P.J., Plummer, S.E., & Danson, F.M., 2000, **Estimating the stem carbon production of a coniferous forest using an ecosystem simulation model driven by the remotely sensed red edge**, International Journal of Remote Sensing, 21(4), 619-631.
- Ludeke, M., Janecek, A., & Kohlmaier, G.H., 1991, **Modelling the seasonal CO₂ uptake by land vegetation using the global vegetation index**, Tellus B, 43(2), 188-196.
- Major, D. J., Baret, F. and Guyot, G., 1990, **A vegetation index adjusted for soil brightness**, International Journal of Remote Sensing 11: 727-740.
- Myneni, R.B., Ramakrishna, R., Nemani, R., & Running, S. W., 1997, **Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models**, IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, 35(6), 1380-1393.
- Rivera Caicedo, J.P., 2014, **Optimized and automated estimation of vegetation properties: Opportunities for Sentinel-2**.
- Rouse Jr, J., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W., 1974, **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**.

- Rondeaux, G., et al., 1996, **Optimization of soil-adjusted vegetation indices**, Remote Sensing of Environment 55(2): 95-107.
- Shen, M., Chen, J., Zhu, X., Tang, Y., & Chen, X., 2010, **Do flowers affect biomass estimate accuracy from NDVI and EVI?**, International Journal of Remote Sensing, 31(8), 2139-2149.
- Shen, M., Chen, J., Zhu, X., & Tang, Y., 2009, **Yellow flowers can decrease NDVI and EVI values: evidence from a field experiment in an alpine meadow**, Canadian Journal of Remote Sensing, 35(2), 99-106.
- Small, C., & Lu, J.W., 2006, **Estimation and vicarious validation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis**, Remote Sensing of Environment, 100(4), 441-456.
- Stenberg, P., Rautiainen, M., Manninen, T., Voipio, P., & Smolander, H., 2004, **Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands**,
- Thenkabail, P.S., Smith, R.B., & De Pauw, E., 2000, **Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics**, Remote sensing of Environment, 71(2), 158-182.
- Thomas, J.R., & Gausman, H.W., 1987, **Leaf Reflectance vs. Leaf Chlorophyll and Carotenoid Concentrations for Eight Crops 1**, Agronomy journal, 69(5), 799-802.
- Todd, S.W., Hoffer, R.M., & Milchunas, D.G., 1998, **Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices**, International journal of remote sensing, 19(3), 427-438.
- Tucker, C.J. 1979, **Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation**, Remote sensing of Environment, 8(2), 127-150.
- Wang, F.M., Huang, J.F., Tang, Y.L., & Wang, X.Z., 2007, **New vegetation index and its application in estimating leaf area index of rice**, Rice Science, 14(3), 195-203.
- Weiss, M., & Baret, F., 1999, **Evaluation of canopy biophysical variable retrieval performances from the accumulation of large swath satellite data**, Remote sensing of environment, 70(3), 293-306.
- Yoder, B.J., & Waring, R.H., 1994, **The normalized difference vegetation index of small Douglas-fir canopies with varying chlorophyll concentrations**, Remote Sensing of Environment, 49(1), 81-91.
- Zhao, J., Li, J., & Liu, Q., 2013, **Analysis on inversion saturation of leaf area index based on multi-layer models**, In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International (pp. 3048-3051). IEEE.
- Zhang, J., Xu, Y., Yao, F., Wang, P., Guo, W., Li, L., & Yang, L., 2010, **Advances in estimation methods of vegetation water content based on optical remote sensing techniques**, Science China Technological Sciences, 53(5), 1159-1167.



Investigation of the saturation effect of vegetation indices in LAI estimation of crops

Behifar M.¹, Azadbakht M.^{2*}, Hadadi F.³, Matkan A.K.⁴

1. PhD student in Remote Sensing, Remote Sensing and GIS department, School of Geography, University of Tehran
2. Assistant Professor in Remote Sensing, Remote Sensing and GIS Research Center
3. Remote sensing expert, Iranian Space Research Center
4. Professor in Remote Sensing, Remote Sensing and GIS Research Center

Abstract

Vegetation indices are used to estimate vegetation parameters from satellite images. Despite their capabilities, performance of some vegetation indices decreases in high vegetation densities, making them inappropriate for estimation of the desired parameters. Vegetation indices are saturated in alfalfa farms due to the high chlorophyll content and high vegetation density; therefore, monitoring the changes of this plant is hindered. However, all indices do not perform similarly. In this research, the performance of different vegetation indices at different LAI values were investigated. The results showed that the C_{Igreen}, C_{Irededge} and NGRDI indices gained the best performance at high LAI values and they were less saturated. In contrast, the NDVI, NDREI and GNDI indices did not perform well and they were saturated at medium and high levels of LAI.

Keywords: Index saturation, Remote Sensing, Spectral Vegetation Index, Alfalfa.