



## تحلیل و مدل سازی همبستگی بین LAI و شاخص های گیاهی حاصل از مشاهدات طیف سنجی

علی اکبر آبکار<sup>۱\*</sup>، علیرضا صفدری نژاد<sup>۲</sup>، مجتبی زمانی<sup>۳</sup>، سیدرضا صوفی باف<sup>۴</sup>، نیاله غلامی بیدخانی<sup>۵</sup>، امید غفاری<sup>۶</sup>

۱. استادیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه برداری
- ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶. دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۸

### چکیده

بررسی خصوصیات انواع پوشش های گیاهی به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در تبادل انرژی بین جو و سطح زمین در مطالعات زیست محیطی، منابع طبیعی و کشاورزی اهمیت بسیاری دارد. امروزه فناوری سنجش از دور با ارائه اطلاعات طیفی گسترده و متنوع موجب تسهیل در مطالعه پوشش های گیاهی در سطح زمین و به ویژه تخمین پارامترهای بیوفیزیکی آنها شده است. یکی از مهم ترین پارامترهای فیزیکی به کار گرفته شده در تحلیل های مختلف مربوط به مطالعه پوشش های گیاهی، شاخص سطح برگ (LAI) است. در پژوهش حاضر ضمن تحلیل و مدل سازی ارتباط بین LAI و شاخص های گیاهی مختلف، با استفاده از مشاهدات طیف سنجی آزمایشگاهی، به بررسی محدودیت های مدل ریاضی موجود در برآورد LAI، ارائه راهکارهایی به منظور افزایش دقت و صحت نتایج این مدل و همچنین طراحی یک شاخص جدید پرداخته شده است. نتایج نشان دادند که از میان شاخص های گیاهی متداول، دو شاخص Simple Ratio و SAVI-2 دارای کمترین RMSE (حدود ۰/۰۸ در واحد LAI) بوده و شدت اشباع شدگی مدلی که برآزش داده اند از شاخص های دیگر کمتر است. دو شاخص مذکور کارایی بالاتری در تخمین LAI به ویژه در مناطق با تراکم پوشش گیاهی آنها زیاد، دارند و می توان با اطمینان بالایی در مدل سازی خطی برآورد LAI از آنها استفاده کرد.

**کلیدواژه ها:** شاخص سطح برگ، شاخص پوشش گیاهی، طیف سنجی، آنالیز حساسیت.

\* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه برداری، گروه سنجش از دور. تلفن: ۰۹۱۲۱۴۰۳۸۲۷

## ۱- مقدمه

وجود پوشش‌های گیاهی متنوع در سطح زمین به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم و اساسی در تبادل انرژی بین جو و سطح زمین مؤثر است (Bacour et al., 2002). از این‌رو، تخمین کمی و دقیق ویژگی‌های گیاهان برای کاربردهای گوناگون نظیر هواشناسی، مطالعات زیست‌محیطی و کشاورزی امری ضروری به‌شمار می‌رود (Houborg et al., 2007). امروزه سنسجش از دور در حوزه مدیریت منابع طبیعی با فراهم‌آوردن امکان دستیابی به تخمینی از پوشش گیاهی به‌صورت سراسری و زمان‌های متوالی از سطح زمین، به‌عنوان ابزاری کاربردی و مناسب برای تخمین متغیرهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهان شناخته می‌شود (Cohen, et al. 2003). در سال‌های اخیر، با ظهور سنسجدهای ابرطیفی اطلاعات طیفی گسترده‌تر و همچنین امکان ارائه شاخص‌های گیاهی دقیق‌تر برای اندازه‌گیری مشخصه‌های متنوع زیستی گیاهان در مقایسه با سنسجدهای چندطیفی فراهم شده است (Darvishzadeh, 2008).

یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین پارامترهای فیزیکی قابل اندازه‌گیری به‌کمک داده‌های طیفی، شاخص سطح برگ (LAI) است. این شاخص براساس سازمان غذا و کشاورزی (FAO) بیانگر نسبت مجموع سطح برگ‌های گیاه به سطح خاک زیر آن است. تخمین LAI به‌عنوان پارامتری اصلی در تحلیل‌های مختلف زیست‌محیطی - از جمله ظرفیت فتوسنتز گیاهان و میزان استرس آنها - مورد استفاده قرار می‌گیرد (le Maire, Marsden et al., 2011). با توجه به ارتباط مستقیم شاخص‌های گیاهی به‌دست‌آمده از مشاهدات طیفی با پارامتر فیزیکی LAI، امکان تخمین این پارامتر از طریق مدل‌سازی نحوه این ارتباط میسر خواهد بود. روش‌هایی که پژوهشگران برای استخراج پارامتر LAI به‌کار گرفته‌اند، به ویژگی‌های طیفی مشاهده‌ها بستگی دارد. بر این اساس LAI با پارامترهای حساس باند، شاخص‌های طیفی، یا مقادیر

تبدیل طیفی (مانند PCA) به‌شیوه تجربی ارتباط برقرار می‌کند (Van der Meer et al., 2001; Dorigo et al., 2007; Darvishzadeh et al., 2008; Liang et al., 2013; Lin et al., 2011). در این زمینه، آنالیز همبستگی به‌عنوان یکی از روش‌های متداول آماری، ارتباط میان انواع شاخص‌های گیاهی و LAI را با استفاده داده‌های سنسجش از دوری به‌خوبی فراهم می‌سازد (Cohen et al., 2003).

نتایج تحقیقات گوناگون، کارایی شاخص‌های گیاهی مختلف را در برآورد LAI برای انواع گونه‌های گیاهی نشان می‌دهند (Lee et al., 2004). در مواردی که تراکم پوشش گیاهی کم و در نتیجه مقدار شاخص LAI نسبتاً پایین باشد، می‌توان از رابطه‌ای خطی در برقراری ارتباط میان شاخص‌های گیاهی مختلف با LAI بهره گرفت (Broge et al., 2002; Chen et al., 2002; Darvishzadeh et al., 2008; Schlerf et al., 2005). وجود تراکم بالای پوشش گیاهی و به تبع آن مقادیر بزرگ LAI، همواره مدل‌سازی‌های خطی را با عدم کفایت مواجه کرده است. با افزایش سبزی‌نگی ناشی از افزایش تراکم پوشش گیاهی، میزان حساسیت خطی شاخص‌های گیاهی به تغییرات LAI کاهش می‌یابد و با نام پدیده اشباع‌شدگی شناخته می‌شود. این پدیده افزون بر نوع شاخص گیاهی استفاده‌شده در مدل‌سازی، به نوع پوشش گیاهی، ساختار تاج پوشش، اندازه ابعاد برگ گیاه، نوع خاک پس‌زمینه و موارد دیگر نیز وابسته است (Darvishzadeh et al., 2008; Baret & Guyot, 1991).

بارت<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۱، با معرفی ساختار مدل‌سازی ریاضی، چگونگی برقراری ارتباط میان شاخص‌های گیاهی و میزان شاخص LAI را مطرح کرد. از آن مدل در تحقیقات مختلفی استفاده شد و قابلیت و کفایت آن آزمون گردید (Broge & Mortensen, 2002; Broge &

1. Leaf Area Index

2. Food and Agriculture Organization

3. Baret

موضوعات مرتبط، انگیزه‌های تحقیق بررسی شدند. در بخش دوم، نحوه جمع‌آوری داده‌های مورد استفاده، مبانی نظری مورد نیاز و متدولوژی اجرای تحقیق بیان شده است. بخش سوم به پیاده‌سازی و تحلیل نتایج پرداخته و بخش چهارم به بحث و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، داده‌های به‌کار گرفته‌شده، پیش‌پردازش‌های انجام‌شده، مبانی نظری لازم و روش‌شناسی به‌کار گرفته‌شده در روند اجرایی تحقیق تشریح شده است.

### ۲-۱- داده‌های به‌کار گرفته‌شده و پیش‌پردازش‌ها

#### ۲-۱-۱- نمونه مورد آزمون و تنظیمات آزمایشگاهی

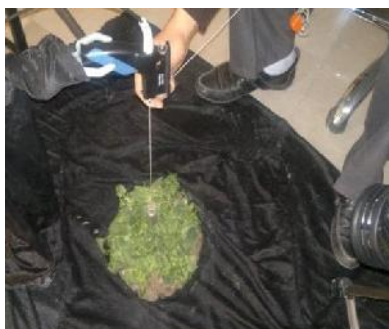
در زمان اجرای تحقیق (زمستان سال ۱۳۹۱)، گیاهان گلخانه‌ای محدودی برای انجام تحقیق در دسترس بودند و به دلیل دسترسی و تراکم بالاتر برگ‌های گیاه گل بنفشه، این گیاه به‌عنوان مورد مطالعاتی آزمایشگاهی انتخاب شد. به‌منظور انجام این تحقیق از گیاه گلخانه‌ای بنفشه در مرحله پیش از گل‌دهی به‌عنوان یک نمونه آزمایشگاهی از پوشش گیاهی برای مدل‌سازی LAI براساس اطلاعات طیف‌سنجی استفاده شد. فصل گل‌دهی این گیاه اوایل بهار و ارتفاع متوسط آن در حدود ۸ سانتی‌متر است. مطابق شکل (۱-الف)، برای بازسازی یک تاج‌پوشش متراکم از این گیاه، بوته‌های لازم پس از جمع‌آوری روی بستری از خاک نباتی مرطوب به‌صورت منظم و متراکم کاشته شدند. مساحت این بستر خاکی دایره‌ای به شعاع تقریبی ۱۰ سانتی‌متر است، که بر این اساس تنظیمات آزمایشگاهی لازم به‌منظور انجام مشاهدات طیفی طراحی و انجام شد (شکل ۱-ب).

اما کماکان (Leblanc, 2000; Wiegand et al., 1992) موضوعاتی همچون: ۱. راهکارهای اجرایی به‌منظور افزایش دقت مدل‌سازی، ۲. راهکار کالیبراسیون پارامترهای این مدل، ۳. نوع شاخص طیفی استفاده‌شده در مدل‌سازی، ۴. چگونگی انتخاب باندهای باریک طیفی در تولید شاخص‌های طیفی در داده‌های ابرطیفی، و ۵. راهکارهای مربوط به کاهش سطح اشباع‌شدگی این مدل در تراکم‌های بالای پوشش گیاهی، از مسائل مورد بحث و تحقیق در مدل بارت است.

در تحقیق پیش رو، ارزیابی، تحلیل و مدل‌سازی ارتباط بین پارامتر بیوفیزیکی LAI و شاخص‌های گیاهی حاصل از مشاهدات طیف‌سنجی آزمایشگاهی از جنبه‌های مختلف واکاوی شده است. به این ترتیب که واریانت‌های مختلف موجود در حوزه به‌کارگیری مدل بارت در زمینه‌هایی همچون: ۱. ارزیابی سطح اشباع‌شدگی شاخص‌های مختلف طیفی، ۲. چگونگی برآورد پارامترهای کالیبراسیون مدل، ۳. نقش رفتار شاخص‌های مختلف طیفی در کیفیت مدل‌سازی، ۴. شناسایی نوع و چگونگی برآورد شاخص‌های طیفی بهینه به‌منظور ایجاد ارتباط خطی و اشباع‌ناپذیر در مدل‌سازی LAI، بررسی شده است. همچنین شاخص گیاهی جدیدی مبتنی بر داده‌های ابرطیفی و یک فاکتور ارزیابی به‌منظور کمی‌سازی میزان اشباع‌شدگی مدل پیشنهاد شده است.

انگیزه انجام مطالعه حاضر، پاسخ‌دادن به پرسش‌هایی است که از جمله می‌توان به اینها اشاره کرد: ۱. آیا انتخاب نوع شاخص گیاهی تأثیری در صحت و دقت برآورد LAI دارد؟ و اگر تأثیرگذار است، کدام شاخص کفایت لازم را دارد؟ و ۲. آیا می‌توان از مدل خطی‌ای با دقت بالا در برقراری ارتباط شاخص گیاهی و LAI استفاده کرد؟ این مدل به چه ویژگی‌هایی وابسته خواهد بود؟

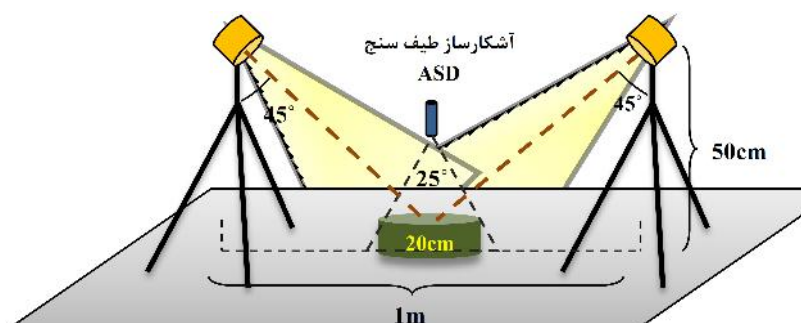
ساختار مقاله پیش رو در چهار بخش تدوین شده است. در بخش حاضر با مروری اجمالی بر



الف) نمونه تولید شده آزمایشگاهی

ب) مراحل انجام تنظیمات آزمایشگاهی به منظور انجام مشاهده های طیفی

شکل ۱. آماده سازی نمونه آزمایشگاهی و آماده سازی محیط آزمایشگاهی به منظور انجام مشاهده های طیفی



شکل ۲. چگونگی تنظیمات هندسی میدان آزمون برای انجام مشاهده های طیفی

هالوژن استفاده شد که در فاصله و زاویه مناسب نسبت به نمونه قرار گرفتند. کالیبراسیون داخلی دستگاه ASD به منظور برآورد شاخص بازتابندگی طیفی از طریق یک اسپکترون<sup>۲</sup> به عنوان جسم سفید استاندارد با قابلیت پراکنش لامبرتی انجام شد. استفاده از پارچه سیاه به عنوان پس زمینه به منظور جلوگیری از تداخل نورهای پراکنده در محیط و استفاده نکردن از منابع نوری دیگر به جز لامپ های هالوژن به منظور اطمینان یافتن از کاهش نویزهای سیستماتیک و اتفاقی در روند مشاهده ها از تدابیر اجرایی این آزمایش به شمار می روند.

به منظور انجام مشاهدات طیفی در پژوهش حاضر از یک دستگاه طیف سنج میدانی ASD مدل FieldSpec Pro استفاده شد. این دستگاه می تواند بازتابندگی طیفی عوارض را در محدوده طیفی ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر اندازه بگیرد و این اندازه گیری ها بعد از بازنمونه برداری<sup>۱</sup> در بازه های یک نانومتری و در قالب گزارش های مختلفی به وسیله این سیستم ارائه شدنی است. میدان دید چشمه ورودی فیبر نوری این سیستم ۲۵ درجه و ارتفاع مناسب دستگاه برای پوشش کامل نمونه مورد آزمایش محاسبه شدنی است. چگونگی تنظیمات هندسی میدان آزمون برای انجام مشاهده های طیفی در شکل ۲ آمده است.

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، به منظور بازسازی شرایط پایدار نوردهی به نمونه، از دو لامپ

1. Resampling
2. Spectralon

## ۲-۱-۲- روند جمع‌آوری داده و پیش‌پردازش‌های انجام‌شده

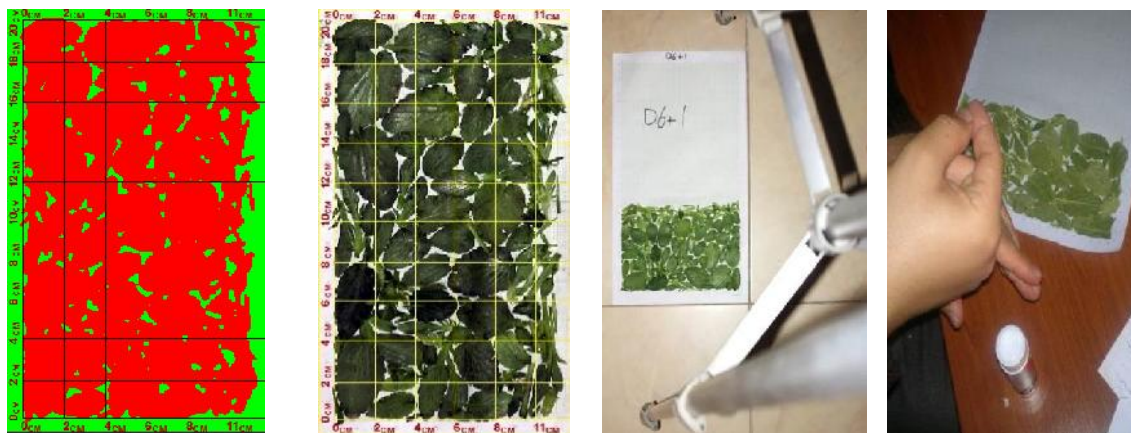
با توجه به محوریت تحقیق بر ارزیابی توان مدل‌سازی تغییرات LAI از طریق مشاهدات طیفی، عملیات طیف‌سنجی از نمونه مورد آزمایش طی ده گام متوالی انجام شد. در هر گام از مشاهده‌ها، به‌صورت تقریبی ده درصد از تراکم پوشش گیاهی کاسته شد و طیف اندازه‌گیری شده و پوشش گیاهی جدا شده در هر گام به‌طور مستقل ثبت و جمع‌آوری شدند. این روند کاهشی تا حذف کامل پوشش گیاهی از سطح خاک نباتی ادامه داشت. سپس با هدف دستیابی به رفتار طیفی خاک به‌ازای تغییر سطح رطوبت (به‌منظور تعیین پارامترهای خط خاک در شاخص‌های طیفی مرتبط)، پس از حذف کامل پوشش گیاهی، طی ۶ گام متوالی مخلوطی از خاک و شن خشک به‌نمونه اضافه شد تا سطح آن به‌طور کامل از خاک خشک پوشیده شود. رطوبت خاک به‌صورت تدریجی و وزنی تنظیم شد و از دستگاه HH2 Moisture Meter برای تعیین رطوبت خاک استفاده شد. به‌منظور کاهش تأثیرات ناشی از تغییر ساختار و زاویه قرارگیری برگ‌ها در هر گام از جمع‌آوری داده، با دوران ۹۰ درجه‌ای هدف نسبت به مرکز، چهار مشاهده مستقل از طیف گیاه

انجام شد. انتظار می‌رود با میانگین‌گیری از ۴ طیف ثبت‌شده در هر گام بتوان اثر مربوط به سایه برگ‌ها و همچنین تأثیر زوایای جهت‌گیری برگ‌ها را کاهش داد (Darvishzadeh et al., 2008). شکل ۳ تصویر برخی از گام‌های مربوط به جمع‌آوری داده را نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر به‌منظور اندازه‌گیری دقیق مساحت LAI کاسته‌شده از نمونه مورد آزمایش در گام‌های مختلف جمع‌آوری داده‌ها، از روشی ابتکاری مبتنی بر پردازش تصویر بهره‌گرفته شد. بدین ترتیب که پس از جداسازی اجزای پوشش گیاهی در هر مرحله، آنها جداگانه روی یک کاغذ میلی‌متری چسبانده شدند (شکل ۴-الف). به‌منظور جلوگیری از تغییر در مساحت برگ‌ها به‌دلیل از دست‌دادن رطوبت‌شان، این کار به‌صورت گروهی و بلافاصله پس از جداسازی برگ‌ها انجام شد. سپس در شرایط یکسان از نظر هندسه تصویربرداری (تصویربرداری نسبتاً قائم)، از هریک از کاغذهای میلی‌متری تصویربرداری شد و تصاویر دریافتی با توجه به معلوم‌بودن مختصات نقاط در صفحه کاغذ میلی‌متری با استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی از درجه دو تصحیح هندسی شدند (شکل ۴-ب و پ).

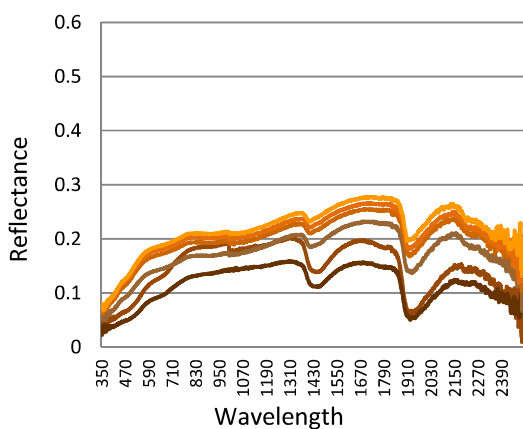


شکل ۳. نمایی از تغییر وضعیت نمونه مورد آزمایش در گام‌های مختلف آزمایش

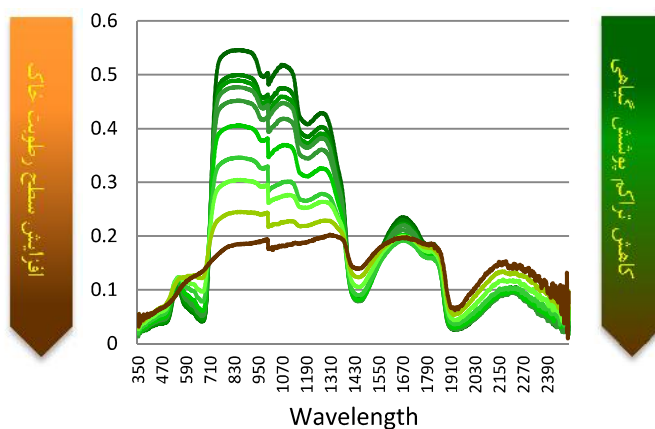


الف ب پ ت

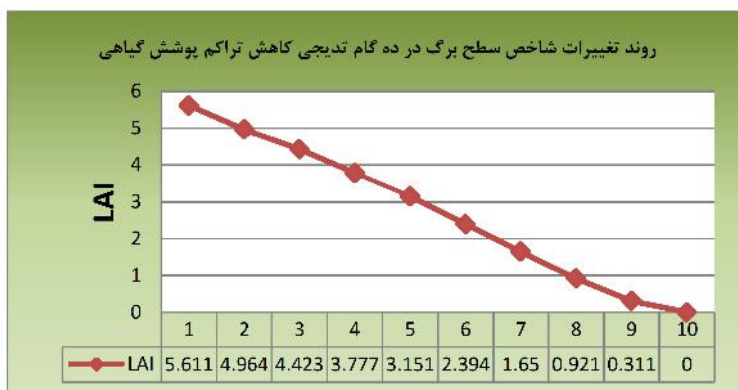
شکل ۴. مراحل اجرایی روند ابتکاری برآورد مساحت برگ در هر گام از جمع‌آوری داده



(ب) منحنی رفتار بازتابندگی خاک



(الف) منحنی رفتار بازتابندگی پوشش گیاهی



(پ) روند تغییرات شاخص سطح برگ در ده گام تدریجی کاهش تراکم پوشش گیاهی

شکل ۵. نمودارهای نتایج جمع‌آوری داده‌ها (کاهش تدریجی بازتاب طیف گیاه و خاک و LAI)

رابطه (۲)

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{VI - VI_{\infty}}{VI_S - VI_{\infty}}\right)}{-K_{VI}}$$

پارامترهای کالیبراسیون استفاده شده در این مدل ریاضی، کمیت های  $[VI_S, VI_{\infty}, K_{VI}]$  بودند، که به طور معمول دو پارامتر  $[VI_S, VI_{\infty}]$  از اطلاعات موجود در منطقه و به صورت عملیاتی تعیین می شود. در این میان، ضریب  $K_{VI}$  تنها پارامتر کالیبراسیون مدل به شمار می آید و با وجود حداقل یک داده کنترلی (داده ای که مقادیر LAI و  $VI$  متنظر آن معلوم باشد) امکان محاسبه آن وجود خواهد داشت. از این روش معمول در کالیبراسیون این مدل مبتنی بر تخمین عددی پارامتر  $K_{VI}$  به کمک حداقل یک داده کنترلی  $[VI, LAI]$  خواهد بود.

### ۲-۲-۱- پدیده اشباع شدگی

به دلیل ساختار نمایی مدل بارت، وقوع پدیده اشباع شدگی و به تبع آن تخمین نادرست LAI در شرایط مرزی (کاهش شدید تراکم گیاهی یا افزایش شدید تراکم گیاهی) طبیعی است. با استناد به تحقیقات گوناگون انجام شده در حوزه مدل سازی LAI به وسیله مدل بارت، معمولاً بروز شرایط تخمین نادرست LAI به دلیل پدیده اشباع شدگی، برای تراکم های بالای پوشش گیاهی رخ خواهد داد (Chen et al., 2005; Chen & Chilar, 1996; Tuner et al., 1987).

از منظر تحلیلی با در نظر گرفتن رابطه (۲)، آرگومان تابع Ln به ازای تراکم بالای پوشش گیاهی به مقدار عددی صفر نزدیک می شود. در نتیجه با در نظر گرفتن تغییر متغیری به شکل  $x = VI - VI_{\infty}$ ، رابطه (۲) به شکل رابطه (۳) بازنویسی می شود.

رابطه (۳)

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{x}{VI_S - VI_{\infty}}\right)}{-K_{VI}}$$

با مشتق گیری از رابطه (۳) نسبت به متغیر  $x$ ،

در نهایت تصاویر تصحیح شده طی عملیات قطعه بندی به روش K-Means به دو کلاس کاغذ و پوشش گیاهی طبقه بندی و مساحت سطح برگ در هر گام به طور دقیق محاسبه شد (شکل ۴-ت).  
منحنی بازتابندگی نمونه های اندازه گیری شده به تفکیک روند کاهش تراکم پوشش گیاهی (شکل ۵-الف)، کاهش سطح رطوبت خاک (شکل ۵-ب)، و نمودار تغییر پارامتر فیزیکی LAI در ده گام کاهش مذکور (شکل ۵-پ) به عنوان نتایج نهایی از فرایند جمع آوری داده و پیش پردازش داده ها در شکل ۵ نمایش داده شده است.

### ۲-۲-۲- مدل بارت به منظور برآورد LAI از طریق

#### شاخص های گیاهی

از آنجاکه استخراج پارامتر بیوفیزیکی شاخص سطح برگ (LAI) به صورت غیر مستقیم و با استفاده از داده های طیفی اهمیت بسیاری برای استفاده کنندگان داده های سنجنش از دوری دارد، بارت در سال ۱۹۹۱ با تعریف یک مدل ریاضی عمومی، نحوه ارتباط میان شاخص های گیاهی استخراج شده از داده های طیفی و LAI را مطابق رابطه (۱) بیان کرد.

رابطه (۱)

$$VI = VI_{\infty} + (VI_S - VI_{\infty})e^{-K_{VI} \times LAI}$$

که در آن،  $VI_{\infty}$  مقدار شاخص گیاهی مفروض به ازای تراکم حداکثری پوشش گیاهی،  $VI_S$  مقدار شاخص گیاهی به ازای خاک لخت،  $K_{VI}$  ضریب کالیبراسیون مدل ریاضی، LAI مقدار عددی شاخص سطح برگ و  $VI$  مقدار عددی شاخص گیاهی متنظر با LAI است.

با در نظر گرفتن این فرض که شاخص های گیاهی با استفاده از رابطه ای غیر خطی (نمایی) نسبت به LAI برآورد شدنی هستند، به منظور برآورد LAI بر اساس شاخص های گیاهی می توان معکوس این رابطه را از طریق رابطه (۲) محاسبه کرد.

مذکور (به عنوان مثال مدل بارت) انحراف بیشتری نسبت به خط مستقیم داشته باشد، شدت و میزان اشباع‌شدگی آن بالاتر خواهد بود (شکل ۶- الف). از آنجاکه تمامی مدل‌های برازش یافته در پژوهش حاضر در سیستم مختصات دویبعدی ( $x = VI$ ,  $y = LAI$ ) نگاشت شده، معیار اشباع‌شدگی مدل بارت صرف نظر از نوع شاخص گیاهی به کاررفته در ساختار مدل‌سازی مطابق شکل (۶- ب) تعیین شده است.

همان‌طور که در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود، به منظور محاسبه معیار اشباع‌شدگی، نخست مجموع اختلافات مدل لگاریتمی بارت و خط برازش داده‌شده به دو نقطه مربوط به بیشینه و کمینه تراکم پوشش گیاهی به صورت گسسته و به تعداد  $n$  نمونه مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

رابطه (۵)

$$d_i = L(VI_i) - B(VI_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

که در آن،  $L(VI_i)$  و  $B(VI_i)$  به ترتیب مقادیر عددی برآوردشده LAI با استفاده از مدل بارت و خط برازش یافته در  $n$ مین نقطه نمونه برداری و  $d_i$  میزان اختلاف این دو مقدار است. در این رابطه،  $VI_i$  و  $L(VI_i)$  به ترتیب از طریق روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

زمانی که پوشش گیاهی به بیشینه نزدیک شود و پارامتر  $x$  به مقدار عددی صفر متمایل شود، حاصل این مشتق به سمت مقدار بی‌نهایت میل می‌کند (رابطه ۴).

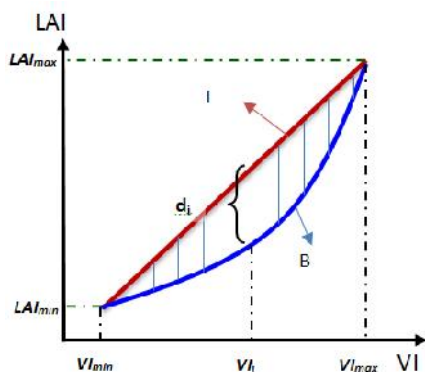
رابطه (۴)

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{dLAI}{dx} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{1}{-K_{VI} \times x} \right) = \pm \infty$$

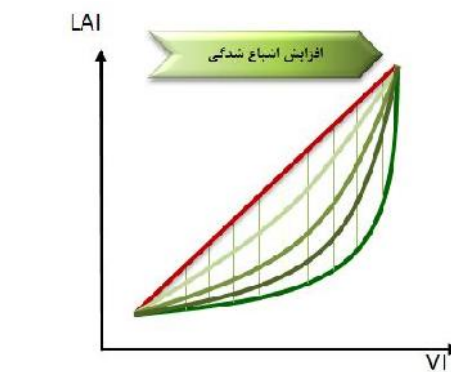
این تابع، صعودی است و بیشینه مشخصی ندارد، به همین دلیل می‌توان ادعا کرد که این مدل لزوماً با افزایش تراکم پوشش گیاهی توانایی خود را در تخمین صحیح LAI از دست می‌دهد و اشباع می‌شود. بدیهی است که شدت اشباع شدن مدل به ازای مقادیر بزرگ‌تر LAI به ضریب کالیبراسیون مدل ( $K_{VI}$ ) وابسته است و از آن می‌توان به عنوان یکی از معیارهای بهینه‌بودن برازش مدل یاد کرد. هرچه میزان ( $K_{VI}$ ) کوچک‌تر باشد، اشباع‌شدگی مدل در تراکم‌های پوشش گیاهی کمتر نیز رخ می‌دهد و کارایی مدل در برآورد LAI از شاخص‌های طیفی کاهش می‌یابد.

### ۲-۲-۲- معرفی فاکتور اشباع‌شدگی

پدیده اشباع‌شدگی یک تابع لگاریتمی و نمایی را می‌توان با میزان انحراف آن نسبت به خط متصل‌کننده نقطه ابتدایی و انتهایی آن ارزیابی کرد. هرچه منحنی



ب) روال شماتیک محاسبه  $d_i$



الف) نمایی شماتیک از نمودارهای نمایی با اشباع‌شدگی متفاوت

شکل ۶. نمایی شماتیک از نمودارهای نمایی با اشباع‌شدگی متفاوت و روال محاسبه  $d_i$



$$VI = a + b \times e^{cLAI} \quad \text{رابطه (۶)} \quad (۵)$$

که در آن، (a,b,c) پارامترهای کالیبراسیون مدل هستند و با استفاده از حداقل سه زوج مرتب [VI, LAI] با درجه آزادی صفر می‌توان آنها را تخمین زد. بدیهی است در صورت وجود تعداد بیشتر داده‌های کنترلی مناسب، برآورد پارامترهای مدل توأم با قابلیت اعتماد بیشتر و به تبع آن با دقت بالاتری میسر خواهد بود. بنابراین می‌توان به منظور افزایش دقت نتایج مدل ریاضی برآورد شاخص سطح برگ، پارامترهای [VI<sub>s</sub>, VI<sub>∞</sub>] را نیز به شرط دراختیار داشتن تعداد داده‌های کنترلی مناسب برآورد کرد و تا حد امکان از ورود خطای ناشی از اندازه‌گیری عملیاتی آنها به مدل ریاضی جلوگیری کرد.

$$VI_i = \min(VI) + \frac{i}{n} (\max(VI) - \min(VI)) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$L(VI_i) = \frac{\max(LAI) - \min(LAI)}{\max(VI) - \min(VI)} \times (VI_i - \min(VI)) + \min(LAI)$$

با محاسبه میانگین این اختلافات (d<sub>i</sub>)، معیار اشباع‌شدگی محاسبه می‌گردد (رابطه ۸).

رابطه (۸)

$$\text{Saturation Factor} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

با توجه به یکسان بودن مقیاس d<sub>i</sub> (امتداد محور LAI) برای تمام شاخص‌ها، می‌توان ادعا کرد که این معیار به خوبی امکان مقایسه نتایج برآورد LAI حاصل از شاخص‌های گیاهی گوناگون را فراهم می‌سازد و می‌توان از آن به عنوان معیاری برای ارزیابی از منظر میزان اشباع‌شدگی مدل‌های مختلف در تراکم‌های بالای پوشش گیاهی بهره گرفت. در صورت تبدیل شدن مدل بارت به تابع خطی می‌توان انتظار داشت که به‌ازای افزایش VI، شیب تخمین LAI تغییر فاحشی نداشته باشد و در مورد تراکم‌های بالاتر پوشش گیاهی، میزان عدم قطعیت نتایج تغییری نکند. در بخش پیاده‌سازی و ارائه نتایج، پس از برازش مدل لگاریتمی بارت با استفاده از شاخص‌های گیاهی مختلف، از مؤلفه Saturation Factor به منظور مقایسه مدل‌های برازش‌یافته از نظر میزان اشباع‌شدگی استفاده شد.

### ۳-۲-۲- نظریه برازش منحنی

از آنجاکه از نظر تئوری برازش منحنی می‌توان تابع ریاضی مناسبی را به مجموعه‌ای از زوج مرتب‌های نمونه برداری شده برازش داد، برای مدل ارائه‌شده در رابطه (۱) نیز می‌توان چنین کرد. بر این اساس می‌توان این رابطه ریاضی را به صورت رابطه (۵) بازنویسی کرد.

### ۳-۲- تولید شاخص‌های گیاهی

استخراج شاخص‌های گیاهی بهترین روش ارتباط بین مشاهدات طیفی و پارامترهای بیوفیزیکی گیاهان قلمداد می‌شود. لبه قرمز، فصل تمایز منحنی رفتار طیفی گیاهان در مقایسه با سایر عوارض طبیعی و مصنوعی است. بیشتر شاخص‌های گیاهی با در نظر گرفتن این تمایز طیفی طراحی می‌شوند و معمولاً انتخاب دو باند طیفی قرمز و مادون قرمز نزدیک مناسب، در تولید انواع شاخص‌های گیاهی اهمیت بسیاری دارد. در مدل عمومی بارت از شاخص‌های گیاهی با عنوان عمومی VI استفاده شده و در پژوهش حاضر از چند شاخص گیاهی متداول و مرسوم به عنوان یکی از متغیرهای آنالیز حساسیت مدل بارت استفاده شده است. با توجه به انجام مشاهده‌های طیفی در محیط کنترلی آزمایشگاهی و تأثیرنداشتن پارامترهای اتمسفری، در مطالعه حاضر از بررسی شاخص‌هایی مانند SARVI، ARVI و نظایر اینها که هدف اصلی شان در نظر گرفتن اثر این پارامترهاست، صرف نظر شده است. رابطه ریاضی تمامی شاخص‌های به کار گرفته شده در پژوهش حاضر، در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. شاخص‌های متداول گیاهی استفاده شده به منظور مدل سازی LAI

مخفف نام شاخص	نام شاخص	ساختار مدل ریاضی	مرجع
SR	Simple Ratio Vegetation Index	$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$	Pearson & Miller (1972)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	Rouse et al. (1974)
SAVI	Soil-adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L)}$	Huete (1988)
SAVIZ	Second Soil-adjusted Vegetation Index	$SAVIZ = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED} + b/a}$	Major et al. (1990)
RSR	Reduced Simple Ratio	$RSR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} * \frac{\rho_{SWIR_{max}} - \rho_{SWIR}}{\rho_{SWIR_{max}} - \rho_{SWIR_{min}}}$	Brown et al. (2000)
TVI	Transformed Vegetation Index	$TVI = \sqrt{\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}} + 0.5$	Deering et al. (1975)
DVI	Difference Vegetation Index	$DVI = \rho_{NIR} - \rho_{RED}$	Tucker (1979)
PVI	Perpendicular Vegetation Index	$PVI = \frac{\rho_{NIR} - a\rho_{RED} - b}{\sqrt{1+a^2}}$	Richardson et al. (1977)

### ۲-۳-۱- تولید شاخص گیاهی جدید مبتنی بر مساحت زیر سطح نمودار طیفی

با مشاهده شکل ۵- الف می توان گفت که کاهش تدریجی تراکم پوشش گیاهی منجر به تمایز سراسری در شکل منحنی طیفی آن می شود. از آنجاکه بیشتر شاخص‌های گیاهی متداول صرفاً با نمونه برداری‌های نقطه‌ای از منحنی رفتار طیفی اقدام به استخراج محتوای اطلاعاتی گیاه می کنند، به نظر می رسد این کار توأم با ازدست دادن حجم زیادی از اطلاعات ارزشمند مستتر در منحنی رفتار طیفی گیاه باشد. از این رو در مطالعه حاضر شاخص جدیدی مبتنی بر مساحت سطح زیر نمودار منحنی بازتابندگی به عنوان شاخص گیاهی جدید طراحی شده است که از رابطه (۹) تبعیت می کند. بدیهی است که این شاخص صرفاً در مورد داده‌های فراطیفی اجراشدنی است و انگیزه طراحی آن، بهره‌گیری کلی‌تر از منحنی رفتار طیفی به منظور برقراری ارتباط شاخص استخراجی با LAI است.

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} d\lambda \quad \text{رابطه (۹)}$$

در روابط ارائه شده در جدول ۱،  $\rho_{RED}$ ،  $\rho_{NIR}$  و  $\rho_{SWIR}$  به ترتیب مقادیر بازتابندگی مادون قرمز نزدیک، قرمز و مادون قرمز کوتاه و دو پارامتر  $a$  و  $b$  به ترتیب شیب و عرض از مبدأ خط خاک در سیستم مختصات دوبعدی ( $x = Red, y = NIR$ ) هستند.

تولید این شاخص‌های گیاهی به دو شکل اساسی شاخص‌های باریک باند، و شاخص‌های پهن باند. در تولید شاخص‌های باریک باند که عمدتاً در حوزه داده‌های ابرطیفی پیاده‌سازی می شوند، تولید هر شاخص معطوف به انتخاب باندهای باریک طیفی است و فرایند انتخاب باندهای بهینه از عوامل تأثیرگذار در کیفیت و محتوای اطلاعاتی هر شاخص به شمار می آید. به شاخص‌های گیاهی تولیدشده به وسیله تصاویر چندطیفی، به دلیل قدرت تفکیک طیفی پایین تر این سنجنده‌ها، شاخص‌های پهن باند اطلاق شده است. این شاخص‌ها به علت انجام میانگین‌گیری طیفی در محدوده وسیع تری از منحنی رفتار طیفی، محتوای اطلاعاتی کمتری را در بر خواهند داشت. در پژوهش حاضر از شاخص‌های باریک باند در تحلیل‌های مرتبط بهره گرفته شده است.

1. Narrow Band Vegetation Indices
2. Broad Band Vegetation Indices

## تحلیل و مدل سازی همبستگی بین LAI و شاخص های گیاهی حاصل از مشاهدات طیفسنجی

معنادار بودن ارتباط آنها با شاخص LAI ارزیابی شده است. بر این اساس، ترکیب باندی بهینه برای تولید هر شاخص گیاهی منوط به بیشینه شدن همبستگی آن شاخص با LAI اندازه گیری شده است.

از آنجاکه مطابق رابطه بارت، ارتباط نمایی بین LAI و VIها برقرار است، در برآورد شاخص همبستگی علاوه بر همبستگی خطی بین VI و LAI، از معیار همبستگی نمایی (رابطه ۱۰) نیز بهره گرفته شده است. رابطه (۱۰)

Exponential Correlation =

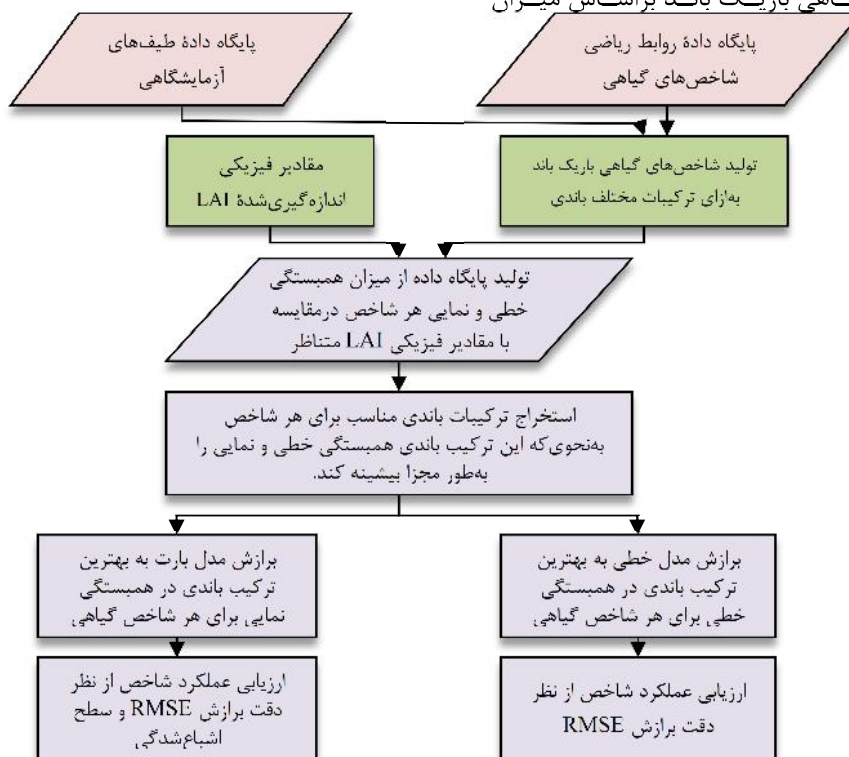
$$\frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\ln(VI_k) - \overline{\ln(VI)}) \times (LAI_k - \overline{LAI})}{\text{Std}(\ln(VI)) \times \text{Std}(LAI)}$$

که در آن، Std بیانگر انحراف استاندارد نسبت به میانگین و n تعداد گام های تدریجی کاهش سطح پوشش گیاهی است. سایر نماد گذاری ها مشابه تعاریف قبلی آنها صورت گرفته است.

که در آن،  $S_{\lambda}$  مقادیر بازتابندگی طیف ثبت شده است و مقادیر  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  دامنه انتگرال گیری از منحنی بازتابندگی طیفی را مشخص می کنند. در این مطالعه با توجه به در اختیار داشتن داده های کنترلی اندازه گیری شده در محیط آزمایشگاهی، امکان تعیین موقعیت مناسب بازه انتگرال گیری طی جست و جویی سراسری میسر خواهد بود. شایان ذکر است که ملاحظات اجرایی مبنی بر هم مقیاس کردن محورهای فضای امضای طیفی<sup>۱</sup> در محاسبه این شاخص طیفی ضروری است.

### ۲-۳-۲- تولید شاخص های گیاهی باریک باند

همان طور که در بخش قبل ذکر شد، یکی از مسائل مهم در به کارگیری شاخص های باریک باند، شناسایی باندهای مؤثر در تولید شاخص های گیاهی است. انتخاب باندهای بهینه از عوامل تأثیرگذار در میزان ارتباط پذیری یک شاخص گیاهی با پدیده ای بیوفیزیکی به شمار می آید. در پژوهش حاضر، روال اجرایی تولید شاخص های گیاهی باریک باند بر اساس میزان



شکل ۷. روال اجرایی تولید شاخص های گیاهی باریک باند

## 1. Spectral Signature

همبستگی کم در محدوده طول موج سبز با سایر باندهای طیفی نیز کاملاً مشهود است.

از سوی دیگر در محدوده طیفی بین ۳۵۰ تا ۱۹۰۰ نانومتر، مطابق شکل ۸ تغییرات ناگهانی در روند همبستگی بین باندهای طیفی در هفت طول موج مشخص رخ داده است که به وضوح می توان آنها را تشخیص داد. این طول موج ها که آنها را طول موج های گذر<sup>۱</sup> می نامیم، نقاط عطف در تغییر حالت همبستگی از مستقیم به معکوس و برعکس را نشان می دهند و معمولاً مناسب ترین نقاط برای طراحی شاخص های طیفی و بررسی رفتار یک عارضه مشخص اند.

اگرچه محل وقوع این گذرها را می توان به صورت بصری و تقریبی شناسایی کرد، نقاط مذکور در این تحقیق با بهره گیری از الگوریتمی ترکیبی به طور خودکار و دقیق شناسایی شدند. پس از تعیین محل تقریبی وقوع این نقاط، با اعمال اپراتور استخراج لبه Canny و اپراتور Erosion به تصویر، کلیه لبه های قائم آشکارسازی شدند و در نهایت با شناسایی نقاط بیشینه مربوط به نتایج تبدیل Hough و اعمال آن به تصویر لبه های عمودی، پارامترهای خطوط مربوط به آنها استخراج شد. محل دقیق نقاط گذر در طول موج های ۵۲۶، ۵۶۱، ۷۰۵، ۱۳۹۴، ۱۵۸۸، ۱۷۵۳ و ۱۸۳۰ نانومتر مورد شناسایی قرار گرفت.

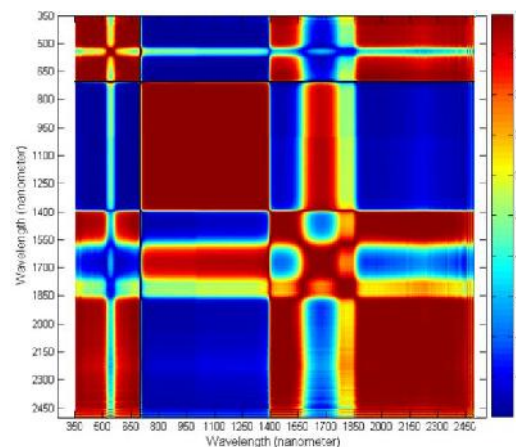
گذرهای ۵۲۶ و ۵۶۱ نانومتر، مرزهای محدوده طیف سبز را مشخص می کنند که همبستگی باندهای طیفی در این محدوده کاهش می یابد. گذر شناسایی شده در طول موج ۷۰۵ نانومتر نیز بیانگر محدوده شناخته شده و مشهور لبه قرمز<sup>۲</sup> است. به علت وجود نویزهای ناشی از مرحله کالیبراسیون اسپکترالون و نواحی جذب آب موجود در جو در محدوده بالاتر از ۱۹۰۰ نانومتر، از تحلیل های مربوط به محدوده های طیفی بالاتر صرف نظر شد.

فلوچارت ارائه شده در شکل ۷، روال اجرایی این بخش (تولید شاخص های گیاهی باریک باند) را نشان می دهد.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- ارزیابی ماتریس همبستگی بین باندی نتایج مشاهده های آزمایشگاهی

بدون شک یکی از ابزارهای اصلی و سودمند در زمینه بررسی و بازسازی روند تغییرات تدریجی طیف نمونه مورد آزمایش، استفاده از ماتریس همبستگی است. در تحقیق حاضر، ماتریس همبستگی خطی بین باندهای طیفی مختلف به ازای تغییرات تراکم سطح پوشش گیاهی ایجاد و بررسی شد. در شکل ۸ ماتریس همبستگی ذکر شده در قالب تصویر نمایش داده شده است.



شکل ۸. نمایش تصویری ماتریس همبستگی بین باندی طیفی به ازای ده گام تدریجی کاهش تراکم پوشش گیاهی

از بررسی و تحلیل این ماتریس نتایج مهمی استنباط می شوند. نخست اینکه نواحی قرمز رنگ و آبی رنگ به ترتیب وجود همبستگی مستقیم و معکوس خطی بین داده های طیفی مورد اندازه گیری در طول موج های مختلف را نشان می دهند. تحلیل بصری روند تغییرات منحنی بازتابندگی طیفی پوشش گیاهی نیز این نظر را تأیید می کند (شکل ۵- الف). وجود

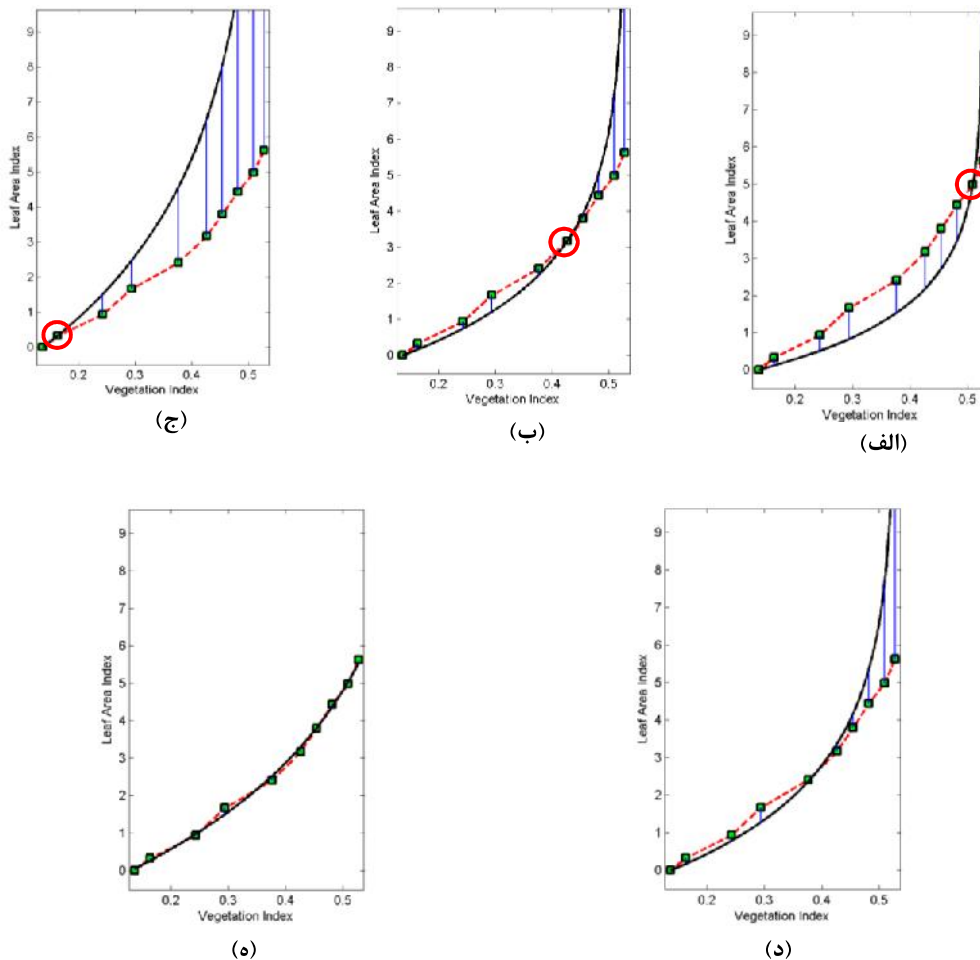
1. Transition Wavelength  
2. Red Edge

### ۳-۲- پیاده‌سازی و مقایسه روش‌های

#### کالیبراسیون مدل بارت

به‌منظور بررسی و مقایسه نتایج روش تک‌پارامتری و روش پیشنهادی سه‌پارامتری در کالیبراسیون پارامترهای مدل بارت، از شاخص گیاهی NDVI به‌عنوان یکی از متداول‌ترین شاخص‌های گیاهی استفاده شد. بدین منظور، شاخص NDVI محاسبه شده برای کاهش تدریجی تراکم پوشش گیاهی به‌ازای باندهای بهینه برآورد شد و از آن در روند کالیبراسیون استفاده گردید. بدیهی است که معیار بهینه‌بودن باندهای انتخابی، بیشینه‌بودن همبستگی نمایی شاخص تولیدشده با LAI خواهد بود. در گام نخست، برازش

مدل بارت در حالت تک‌پارامتری به دو صورت انجام شد: ۱. تخمین پارامتر کالیبراسیون با در نظر گرفتن شاخص‌های NDVI و LAI معلوم به‌ازای تک‌تک گام‌های اندازه‌گیری بدون وجود درجات آزادی، و ۲. استفاده از کلیه داده‌های کنترلی با روش سرشکنی کمترین مربعات. در گام بعدی، برازش مدل در حالت سه‌پارامتری با استفاده از روش سرشکنی کمترین مربعات و حل دستگاه معادلات غیرخطی انجام شد و نتایج به‌دست‌آمده مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. شکل ۹ نمونه‌هایی از نتایج به‌دست‌آمده در این دو گام بررسی را نمایش می‌دهد.



شکل ۹. مقایسه دقت برازش مدل بارت به‌ازای اتخاذ روش‌های کالیبراسیون مختلف

پوشش گیاهی متراکم هستند، استفاده از روش سه پارامتری در برآورد LAI توصیه می‌شود.

- اگرچه کالیبراسیون مدل در روش تک پارامتری با داده کنترل نیز انجام پذیر است، با افزایش تعداد این داده‌ها خصوصاً با تراکم‌های پوشش گیاهی متنوع، دقت برازش مدل آشکارا افزایش می‌یابد.

### ۳-۳- ارزیابی حساسیت برآورد LAI با استفاده

#### از شاخص‌های گیاهی تولیدشده باریک باند

با مبنا قرار دادن فلوچارت اجرایی ارائه شده در بخش ۲-۳-۲ در زمینه به کارگیری شاخص‌های طیفی باریک باند (شکل ۷)، در این بخش از مقاله نتایج مربوط به پیاده‌سازی‌ها ارائه شده است. با توجه به اینکه: ۱- در استراتژی طراحی شده در تولید شاخص‌های باریک باند (شکل ۷)، میزان بهینه بودن هر ترکیب باندی براساس پیشینه شدن همبستگی میان شاخص ذی ربط و LAI تعیین می‌شود، ۲- بیشتر شاخص‌های گیاهی از نمونه برداری طیفی در دوسوی لبه قرمز بهره می‌گیرند، و ۳- نتایج بررسی ماتریس همبستگی بین باندی (بخش ۳-۱) باند طیفی ۷۰۵ نانومتر را به عنوان لبه تغییر رفتار همبستگی طیفی نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داد، در این بخش مرزهای جست‌وجو برای باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک به منظور تولید شاخص‌های گیاهی در محدوده ۵۶۲ تا ۷۰۴ نانومتر برای باندهای قرمز و در محدوده ۷۰۶ تا ۱۳۹۴ نانومتر برای باندهای مادون قرمز نزدیک انتخاب شد. به عبارت دیگر، بازه‌های انتخابی مبتنی بر نقاط گذر شناسایی شده از ماتریس همبستگی تعیین شدند. در مورد بازه‌های جست‌وجوی طیفی مربوط به شاخص مساحت (بخش ۲-۳-۱) از کل بازه طیفی (۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) به منظور انجام فرایند جست‌وجو و شناسایی بازه انتگرال گیری بهینه استفاده شده است. جدول ۳ باندهای بهینه انتخاب شده برای شاخص‌های گیاهی مختلف را نشان می‌دهد.

نقاطی که به صورت خط چین به هم متصل شده‌اند مربوط به مقادیر معلوم شاخص‌های NDVI و LAI در ده گام مختلف اندازه گیری هستند. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) در شکل ۹ مربوط به حالتی است که تنها با استفاده از یک داده کنترل، کالیبراسیون تک پارامتری انجام شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، این سه نقطه به ترتیب نقاط مربوط به گام‌های ۲ (تراکم بالای پوشش گیاهی)، ۶ (تراکم متوسط پوشش گیاهی)، و ۹ (تراکم اندک پوشش گیاهی) هستند. در هر کدام از این سه نمودار، مدل بارت با استفاده از یک داده کنترل برازش داده شده و همان‌طور که از سه نمودار بالا مشخص است برازش هریک از آنها با توجه به تراکم پوشش گیاهی متفاوت است. نمودار (د) نیز نتیجه کالیبراسیون تک پارامتری را با استفاده از کلیه داده‌های کنترلی به روش سرشکنی کمترین مربعات نمایش می‌دهند. در نمودار (ه) نتیجه کالیبراسیون سه پارامتری که با روش کمترین مربعات و با استفاده از کلیه داده‌های کنترلی به دست آمده است، مشاهده می‌شود.

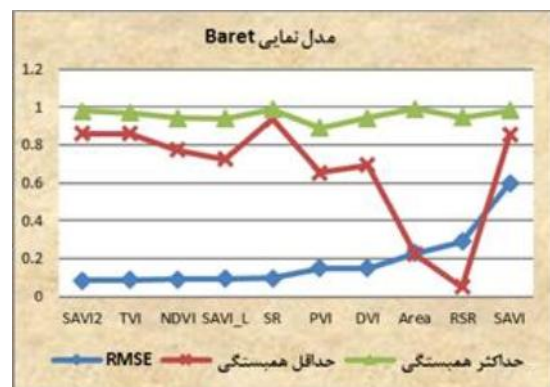
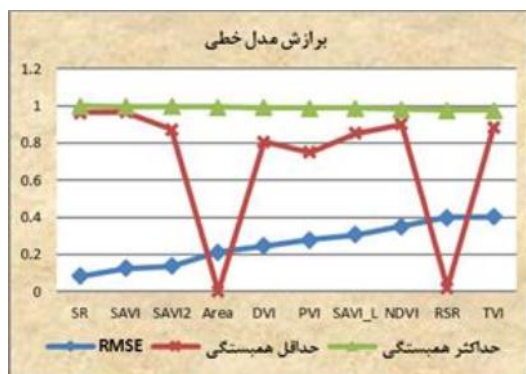
از بررسی و مقایسه نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل بارت در دو حالت تک پارامتری و سه پارامتری، موارد زیر را می‌توان بیان کرد.

- با وجود آنکه در هر دو روش کالیبراسیون، استفاده از مقادیر بیشینه و کمینه شاخص پوشش گیاهی موجب ایجاد برآوردهای توأم با خطا می‌شود، روش کالیبراسیون سه پارامتری در این مورد کارایی به مراتب بالاتری دارد.
- اگرچه کارایی روش سه پارامتری در مقایسه با روش تک پارامتری بیشتر است، برای انجام کالیبراسیون دقیق نیاز به داده‌های معلوم بیشتری از منطقه مورد مطالعه است.
- نتایج نشان می‌دهند که شاخص اشباع شدگی مدل بارت در روش تک پارامتری از روش کالیبراسیون سه پارامتری بیشتر خواهد بود. در مناطقی که دارای

## تحلیل و مدل سازی همبستگی بین LAI و شاخص های گیاهی حاصل از مشاهدات طیف سنجی

جدول ۳. باندهای بهینه شناسایی شده در فرایند جست و جو برای شاخص های مختلف گیاهی براساس بیشینه همبستگی خطی و نمایی میان شاخص گیاهی و LAI

شاخص گیاهی	مدل		معیار بهینگی براساس بیشینه همبستگی خطی		معیار بهینگی براساس بیشینه همبستگی نمایی	
	باند قرمز (نانومتر)	باند مادون قرمز (نانومتر)	باند مادون قرمز (نانومتر)	باند قرمز (نانومتر)	باند مادون قرمز (نانومتر)	باند مادون قرمز (نانومتر)
NDVI	۷۰۴	۹۸۸	۹۸۸	۷۰۴	۹۸۸	۷۰۴
SR	۶۹۳	۹۳۱	۹۳۱	۷۰۴	۹۸۸	۷۰۴
DVI	۷۰۴	۹۷۰	۹۷۰	۵۷۰	۹۸۸	۷۰۴
TVI	۷۰۴	۹۸۸	۹۸۸	۷۰۴	۹۸۸	۷۰۴
PVI	۷۰۴	۹۶۳	۹۶۳	۷۰۴	۹۸۸	۷۰۴
SAVI	۷۰۴	۹۷۰	۹۷۰	۵۷۱	۷۰۶	۷۰۶
SAVI_L	۷۰۴	۹۷۰	۹۷۰	۷۰۴	۹۸۸	۷۰۴
SAVI2	۶۹۵	۷۶۰	۷۶۰	۷۰۴	۹۷۴	۷۰۴
Area	۹۴۰	۱۸۹۹	۱۸۹۹	۱۲۴۰	۱۴۷۹	۱۴۷۹



ب) RMSE برازش مدل خطی و دامنه تغییرات همبستگی خطی در فرایند جست و جوی باندهای بهینه

الف) RMSE برازش مدل Baret و دامنه تغییرات همبستگی نمایی در فرایند جست و جوی باندهای بهینه

شکل ۱۰. RMSE برازش مدل خطی و بارت و دامنه تغییرات مربوط به همبستگی شاخص ها با LAI در فرایند جست و جوی باندی

مدل بارت (شکل ۱۰- الف) و RMSE استفاده از مدل خطی (شکل ۱۰- ب) را برای شاخص های مختلف نشان می دهند. در این نمودارها، به منظور بررسی میزان حساسیت هر شاخص به انتخاب باند، دامنه تغییرات (بیشینه و کمینه) همبستگی که در فرایند جست و جوی باندهای بهینه به دست آمده بود، ترسیم شده است.

در این پیاده سازی از شاخص SAVI با دو نماد گذاری SAVI و SAVI\_L استفاده شده است. در شاخص SAVI، برای پارامتر تعدیل اثر خاک (L) مقدار عددی ۰/۵ انتخاب شده و در شاخص SAVI\_L، این مقدار طی شیبی ثابت و در ده گام کاهش تراکم پوشش گیاهی، مقادیر عددی بین صفر تا ۱ در نظر گرفته شده است.

نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۰، RMSE برازش

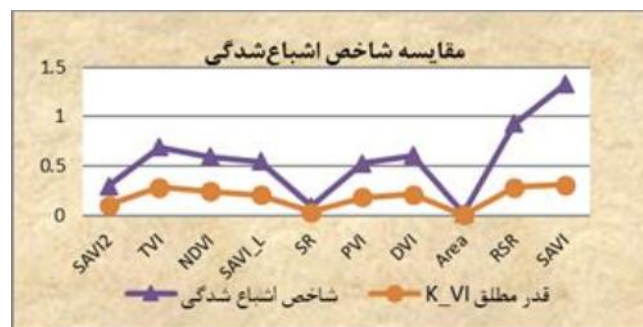
که در بخش ۲-۲-۲ معرفی شد، استفاده گردید (شکل ۱۱). با استناد به تحلیل‌های انجام شده در بخش ۲-۲-۱ مبنی بر اثبات ریاضی وجود ارتباط بین پارامتر  $K_{VI}$  و شدت اشباع‌شدگی، به منظور مقایسه این دو شاخص (شاخص اشباع‌شدگی و  $K_{VI}$ )، در شکل ۱۱ هر دو معیار ترسیم شده‌اند.

نتایج نمودار شکل ۱۱ نشان می‌دهند که شاخص‌های SR، SAVI2 و شاخص پیشنهادی مساحت، کمترین مقدار اشباع‌شدگی و مدل بارت برازش یافته به این شاخص‌ها شباهت زیادی به یک خط مستقیم دارند. ارتباط هم‌سوی بین دو شاخص اشباع‌شدگی و  $K_{VI}$  نیز در نمودار شکل ۱۱ مشاهده می‌شود؛ این موضوع را نیز می‌توان مهر تأییدی برای مطالب مطرح شده در بخش‌های ۱-۲-۲ و ۲-۲-۲ قلمداد کرد.

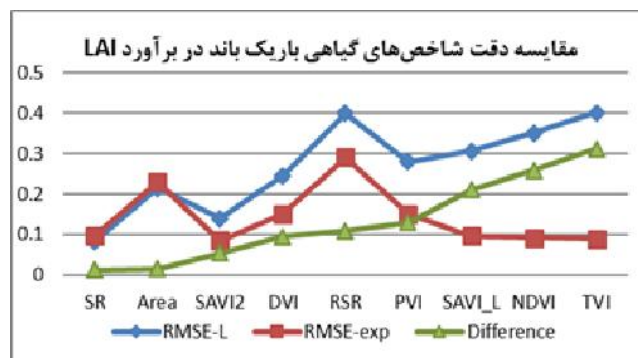
نمودار مربوط به مقایسه دقت‌های به دست آمده از دو روش مدل‌سازی خطی و مدل بارت در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

در شکل ۱۰ محور افقی نمودارها براساس بزرگی مقدار RMSE مرتب شده و فاصله میان کمینه و بیشینه همبستگی برآورد شده می‌تواند معیاری از تأثیرگذاری انتخاب باند در تولید شاخص‌های مختلف قلمداد شود. هرچه فاصله میان مقادیر بیشینه و کمینه پارامتر همبستگی برای یک شاخص گیاهی کمتر باشد، می‌توان ادعا کرد که شاخص ذی‌ربط نسبت به انتخاب باند حساسیت کمتری دارد. بر این اساس، شاخص‌های RSR و مساحت حساسیت بالایی در انتخاب باند از خود نشان می‌دهند و شاخص SR کمترین حساسیت را دارد. البته توجه به این نکته ضروری است که میزان حساسیت انتخاب باند تنها عامل اثرگذار در بهینه‌بودن شاخص نیست و تصمیم‌گیری نهایی منوط به ارزیابی همزمان این موارد است: ۱- حساسیت شاخص نسبت به انتخاب باند، ۲- RMSE برازش مدل، و ۳- معیار اشباع‌شدگی خصوصاً در برازش مدل نمایی بارت.

برای ارزیابی سطح اشباع‌شدگی مدل نمایی بارت در شاخص‌های گیاهی مختلف، از فاکتور اشباع‌شدگی



شکل ۱۱. نمایش شاخص اشباع‌شدگی و  $K_{VI}$  برای مدل بارت در بهترین ترکیب باندی انتخاب شده براساس معیار همبستگی نمایی



شکل ۱۲. نمودار مقایسه دقت‌های حاصل از برازش مدل خطی و بارت با استفاده از شاخص‌های گیاهی باریک باند



دقت را کم می‌کنند. مدل‌های آماری مبتنی بر رابطه آماری بین انواع شاخص‌های گیاهی و شاخص سطح برگ هستند. در این راستا آنالیز همبستگی به‌عنوان روش متداول آماری، به‌خوبی ارتباط میان انواع شاخص‌های گیاهی و LAI را با استفاده از داده‌های سنجش از دوری فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر، ارزیابی پتانسیل شاخص‌های گیاهی استخراج‌شده از منحنی رفتار طیفی گیاهان در زمینه استخراج این کمیت فیزیکی مورد کاوش و بررسی قرار گرفت.

بررسی‌های انجام‌شده در تحقیق حاضر را می‌توان در دو بخش کلی دسته‌بندی کرد. در بخش نخست، تحلیل ساختاری و کالیبراسیون مدل ارائه‌شده از سوی بارت در سال ۱۹۹۱ به‌عنوان محور اصلی بحث در نظر گرفته شد. به‌عنوان مهم‌ترین نتیجه این بخش می‌توان به ارجحیت کالیبراسیون سه پارامتری این مدل بر کالیبراسیون تک پارامتری ( $K_{VI}$ ) اشاره کرد. در بخش دوم، با طراحی روالی منطقی، پتانسیل شاخص‌های گیاهی باریک باند در مدل‌سازی LAI بررسی شدند. این فرایند با هدف به‌کارگیری مستقیم در تصاویر ابرطیفی انجام شد. به‌عنوان مهم‌ترین دستاورد می‌توان به بهینه‌بودن شاخص‌های گیاهی SR، SAVI2 و شاخص پیشنهادی مساحت در زمینه مدل‌سازی خطی و نمایی LAI اشاره کرد.

#### ۵- تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از سرکار خانم دکتر روشنک درویش‌زاده به‌دلیل راهنمایی‌های ارزنده ایشان در پروژه تحقیقاتی انجام‌شده تشکر و قدردانی کنند.

#### ۶- منابع

Atzberger, C., 1997, **Estimates of Winter Wheat Production through Remote Sensing and Crop Growth Modeling**, VWF Verlag, Berlin, Germany.

با استناد به نتایج به‌دست‌آمده از نمودار شکل ۱۲، استفاده از مدل نمایی بارت توان مدل‌سازی LAI را با دقت‌های بالاتر فراهم می‌آورد. نکته مهم در این نمودار، تفاوت اندک در دقت مدل خطی و بارت برای شاخص‌های SR و مساحت است، که نشان از نبود تفاوت فاحش در انتخاب نوع مدل‌سازی برای این شاخص‌ها دارد.

با استناد به نتایج به‌دست‌آمده از این بخش، در جمع‌بندی کلی می‌توان مدل‌سازی خطی شاخص باریک باند SR را به‌عنوان راهکاری ساده و قابل اعتماد در روند تخمین LAI قلمداد کرد.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

استخراج پارامترهای بیوفیزیکی گیاهان از طریق مشاهدات طیفی، همواره از موضوعات مهم تحقیقاتی در مجامع سنجش از دوری بوده است. در این زمینه، پژوهشگران راهکارهای گوناگونی را به‌منظور استخراج این اطلاعات از داده‌های طیفی مطرح کرده‌اند که می‌توان آنها را در دو بخش اصلی تقسیم‌بندی کرد: ۱. مدل‌های فیزیکی مبتنی بر مدل‌سازی برهم‌کنش فیزیکی امواج الکترومغناطیس با پوشش گیاهی، و ۲. مدل‌های آماری برآورد شاخص‌های فیزیکی. در مدل‌های فیزیکی که براساس حل معکوس معادلات انتقال انرژی تعریف می‌شوند، اطلاعات مربوط به مدل بازتابندگی تاج‌پوشش گیاهی مورد نیاز است. تاکنون انواع گوناگونی از این مدل‌ها ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های SAIL و MCRM اشاره کرد. محدودیت اصلی این مدل‌ها محاسبات زیاد و پیچیده آنهاست که باعث می‌شود در مطالعات جهانی و منطقه‌ای کاربرد نداشته باشند. جداول مرجع نیز که برای حل این مشکل استفاده می‌شوند، برای اینکه به‌دقت بالایی برسند باید شامل تعداد زیادی اندازه‌گیری باشند. همچنین در این جداول باید بسیاری از متغیرها را ثابت در نظر گرفت که یقیناً این فرضیات

- Bacour, C., Jacquemoud, S., Tourbier, Y., Dechambre, M. & Frangi, P., 2002, **Design and Analysis of Numerical Experiments to Compare Four Canopy Reflectance Models**, Remote sensing of Environment, 79(1), PP. 72-83.
- Baret G. & Guyot F., 1991, **Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment**, Remote Sensing, Environment, Vol. 35, PP. 161-173.
- Broge, N.H. & Leblanc E., 2000, **Comparing Prediction Power and Stability of Broadband and Hyperspectral Vegetation Indices for Estimation of Green Leaf Area Index and Canopy Chlorophyll Density**, Remote Sensing of Environment 76, PP. 156-172.
- Broge, N.H. & Mortensen, J.V., 2002, **Deriving Green Crop Area Index and Canopy Chlorophyll Density of Winter Wheat From Spectral Reflectance Data**, Remote Sensing of Environment, 81(1), PP. 45-57.
- 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, PP. 16-25.
- Chen, J.M. & Cihlar, J., 1996, **Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests using Landsat TM Images**, Remote Sensing of Environment, 55 (2), PP. 153-162
- Chen, J.M., Pavlic, G., Brown, L., Cihlar, J., Leblanc, S.G., White, H.P., Hall, R.J., Peddle, D.R., King, D.J. & Trofymow, J.A., 2002, **Derivation and Validation of Canada-wide Coarse-resolution Leaf Area Index Maps using High-resolution Satellite Imagery and Ground Measurements**, Remote Sensing of Environment, 80 (1), PP. 165-184.
- Cohen, W.B., Maier-Sperger, T.K., Gower, S.T., Turner, D.P., 2003. **An Improved Strategy for Regression of Biophysical Variables and Landsat ETM+ Data**, Remote Sensing of Environment, 84 (4), PP. 561-571.
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Atzberger, C. & Sip van Wieren, 2008, **Estimation of Vegetation LAI from Hyperspectral Reflectance Data: Effects of soil type and plant architecture**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 10, PP. 358-373.
- Darvishzadeh, R., Atzberger, C. & Skidmore, A.K., 2009, **Leaf Area Index Derivation from Hyperspectral Vegetation Indices and the Red Edge Position**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 30, No. 23, PP. 6199-6218.
- Darvishzadeh, R. et al., 2008, **LAI and Chlorophyll Estimation for a Heterogeneous Grassland using Hyperspectral Measurements**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(4), PP. 409-426.
- Deering D.W. & Rouse J.W., 1975, **Measuring "Forage Production" of Grazing units from Landsat MSS Data**, International Symposium on Remote Sensing of

- Environment, 10th, Ann Arbor, Mich, PP. 1169-1178.
- Dorigo, W. et al., 2007, **A Review on Reflective Remote Sensing and Data Assimilation Techniques for Enhanced Agroecosystem Modeling**, International journal of applied earth observation and geoinformation, 9(2), PP. 165-193.
- Houborg, R., Soegaard, H. & Boegh, E., 2007, **Combining Vegetation Index and Model Inversion Methods for the Extraction of Key Vegetation Biophysical Parameters using Terra and Aqua MODIS Reflectance Data**, Remote Sensing of Environment, 106, PP. 39-58.
- Huete, A.R., 1988, **A Soil-adjusted Vegetation index (SAVI)**, Remote Sensing of Environment, 25, PP. 295-309.
- Lee, K.S., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Maieringer, T.K. & Gower, S.T., 2004, **Hyperspectral versus Multispectral Data for Estimating Leaf Area Index in four Different Biomes**, Remote Sensing of Environment, 91 (3-4), PP. 508-520.
- le Maire, G. et al., 2011, **Leaf Area Index Estimation with MODIS Reflectance Time Series and Model Inversion during Full Rotations of Eucalyptus Plantations**, Remote Sensing of Environment, 115(2), PP. 586-599.
- Liang, L. et al., 2011, **Wheat Leaf Area Index Inversion using Hyperspectral Remote Sensing Technology, Spectroscopy Spectral Analysis**, 31(6), PP. 1658-1662.
- Lin, H. et al., 2013, **Wheat Leaf Area Index Inversion with Hyperspectral Remote Sensing based on Support Vector Regression Algorithm**, Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(11), PP. 139-146.
- Major, D.J., Baret, F. & Guyot, G., 1990, **A Ratio Vegetation Index Adjusted for Soil Brightness**, International Journal of Remote Sensing, 11 (5), PP. 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), PP. 1380-1393.
- Pearson, R.L. & Miller, L.D., 1972, **Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of the Productivity of the Short-grass Prairie, Pawnee National Grassland**, Colorado, 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment, ERIMA, Ann Arbor, MI, PP. 1357-1381.
- Peterson, D.L., Spanner, M.A., Running, S.W. & Teuber, K.B., 1987, **Relationship of Thematic Mapper Simulator Data to Leaf Area Index of Temperate Coniferous Forests**, Remote Sensing of Environment, 22 (3), PP. 323-341.
- Pierce, L.I. & Running, S.W., 1988, **Rapid Estimation of Coniferous Forest Leaf Area Index using a Portable Integration Radiometer**, Ecology, 69, PP. 1762-1767.

- Richardson, A.J. & Wiegand, C.L., 1977, **Distinguishing Vegetation from Soil Background Information**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43, PP. 1541-1552.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. & Harlan, J.C., 1974, **Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation**, NASA/GSFC, Type III, final report, Greenbelt, MD.
- Schlerf, M., Atzberger, C. & Hill, J., 2005, **Remote Sensing of Forest Biophysical Variables using HyMap Imaging Spectrometer Data**, Remote Sensing of Environment, 95 (2), PP. 177-194.
- Tucker, C.J., 1979, **Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation**, Remote Sensing of the Environment, 8, PP. 127-150.
- Turner, D.P., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Fassnacht, K.S. & Briggs, J.M., 1999, **Relationships between Leaf Area Index and LandsatTM Spectral Vegetation Indices across three Temperate Zone Sites**, Remote Sensing of Environment, 70 (1), PP. 52-68.
- Van der Meer, F. et al., 2001, **Spatial Scale Variations in Vegetation Indices and above-ground Biomass Estimates: Implications for MERIS**, International Journal of Remote Sensing, 22(17), PP. 3381-3396.
- Wiegand, C.L., Maas, S.J., Aase, J.K., Hatfield, J.L., Pinter, P.J.Jr., Jackson, R.D., Kanemasu, E.T. & Lapitan, R.L., 1992, **Multisite Analyses of Spectral - biophysical Data for Wheat**, Remote Sensing of the Environment, 42, PP. 1 -21.