



سنجش از دور

و
GIS ایران



سال سوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۰
Vol.3, No.2, Summer 2011

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

۸۶-۷۱

استخراج مقدار کلروفیل محصول برنج با استفاده از معکوس سازی مدل انتقال تابش تاج پوشش و تصاویر ALOS

عبدالحمید دشتی آهنگر^۱، روشنک درویش زاده^{۲*}، علی اکبر متکان^۳، محمد حاجب^۴

۱ و ۴. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

۲. استادیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۳. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۱۰/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۳/۲

چکیده

معکوس سازی مدل های مبتنی بر فیزیک - براساس انتشار تابش درون تاج پوشش - مشخصاً در زمره روش های موفق در تخمین مقدار پارامترهای پوشش گیاهی از قبیل شاخص سطح برگ و کلروفیل با استفاده از داده های سنجش از دور است. در این تحقیق مقدار کلروفیل گیاه برنج در سطح تاج پوشش به عنوان شاخص وضعیت گیاه تخمین زده شد. بدین منظور، مدل انتقال تابش PROSAIL و تصویر سنجنده AVNIR-۲ ماهواره ALOS مورد استفاده قرار گرفت. تحقیق میدانی جامعی نیز در طول ماه های تیر و مرداد ۱۳۸۹ در ناحیه شمال ایران - آمل - صورت گرفت. ۶۰ پلات: ۲۰ × ۲۰ متر مربعی به صورت تصادفی انتخاب شدند و در هر یک از آنها ۴ تا ۷ زیرپلات با توجه به همگنی محصول انتخاب گردید. سپس مقدار کلروفیل در هر زیرپلات با استفاده از دستگاه SPAD-۵۰۲ اندازه گیری شد. تصحیحات اتمسفری با استفاده از مدل MODTRAN انجام گرفت. در گام بعد مدل PROSAIL برای شبیه سازی طیف در باندهای AVNIR-۲ اصلاح گردید. آنالیز حساسیت مدل نیز برای تعیین پارامترهای ثابت و آزاد صورت پذیرفت، و سپس براساس مطالعات میدانی دامنه پارامترهای آزاد ورودی به مدل تعیین شد. با استفاده از روش بهینه سازی درون تکرار مدل معکوس و مقدار کلروفیل در دو سطح برگ و تاج پوشش (مقدار کلروفیل برگ × شاخص سطح برگ) تخمین زده شد. از شاخص های R^2 و RMSE بین مقادیر تخمین زده شده و داده های میدانی به منظور ارزیابی مدل استفاده شد. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل PROSAIL استخراج کلروفیل در سطح برگ دقت چندان مناسبی ندارد، اما می توان کلروفیل را با دقت نسبتاً مطلوبی در سطح تاج پوشش تخمین زد ($R^2=0/57$ و $RMSE=0/47$) و در تحقیقات اکولوژیک و پایش محصول استفاده کرد.

کلیدواژه ها: کلروفیل، مدل انتقال تابش، بهینه سازی درون تکرار.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان وصال، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۱- مقدمه

اگرچه محاسبه‌ها در این روش سریع‌اند، اما استفاده از تعداد محدود باندهای تصویر و همچنین در نظر نگرفتن تأثیرات نامطلوب (اتمسفرف، هندسه خورشید - سنجنده نسبت به یکدیگر و خاک) به صورت مستقیم، در زمرة نقاط ضعف آن به شمار می‌آیند (Dorigo et al., 2007). البته به هر حال تلاش‌هایی برای رفع این مشکلات صورت گرفته‌اند - مانند شاخص‌هایی که تأثیرات اتمسفر و یا خاک را تصحیح می‌کنند. مشکل دیگر روش‌های آماری، وابستگی آنها به مکان مورد مطالعه و نوع سنجنده است (Darvishzadeh et al., 2008; Colombo et al., 2003).

(روش دوم) رنگدانه‌های گیاهی طول موج مرئی را به شدت جذب می‌کنند. این انرژی سپس به صورت فلئورسنت^۴ کلروفیل (Chlf)، بازگسیل می‌شود. گسیل Chlf تنها ۲-۳ درصد از بازتاب الکترومغناطیسی را در ناحیه مادون قرمز نزدیک و مرئی در بر می‌گیرد (Malenovsky et al., 2009). این روش هنوز نیازمند تحقیقات زیادی است، تا عملاً بتوان از آن در پژوهش‌های مبتنی بر سنجنش از دور استفاده کرد.

(روش سوم) روش‌های فیزیکی، بر پایه کنش متقابل بین فوتون‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده تاج پوشش، جایگزینی مناسب برای دو روش یاد شده‌اند. در این روش از معادلات انتقال تابش^۵ برای شبیه‌سازی بازتاب در شرایط مختلف استفاده می‌شود. صورت کلی این معادلات به صورت رابطه ۱ است:

رابطه (۱)

$$\mu dL_v(z, \theta) = -L_v(z, \theta)k_p dz + J_v(z, \theta)pdz$$

که در آن جمله یکم مربوط به کاهش انرژی تابش

سنجنش از دور در ناحیه اپتیکال (مرئی و مادون قرمز نزدیک) منبعی مناسب برای استخراج اطلاعات پوشش گیاهی در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف به شمار می‌آید. کلروفیل در بررسی وضعیت سلامت و تنش گیاه، شاخصی شناخته شده است. به عنوان مثال، مقدار کلروفیل می‌تواند شاخصی از پتانسیل فتوسنتزی و همچنین قابلیت تولید گیاه باشد (Filella et al., 2004). به علاوه، با توسعه کشاورزی دقیق^۱ که به تازگی مورد توجه قرار گرفته، نیاز به اندازه‌گیری کلروفیل به عنوان پارامتری گیاهی در طول زمان به خاطر ارتباط مستقیم آن با نیتروژن افزایش پیدا کرده است (Gitelson et al., 2002; Ustin et al., 2004).

به‌طور معمول برای تعیین مقدار کلروفیل از روش‌های اسپکتروفوتومتری در آزمایشگاه استفاده می‌شود. در این روش ابتدا مقدار جذب نور به وسیله کلروفیل تعیین می‌گردد و سپس با استفاده از روابطی، مقدار جذب به مقدار کلروفیل تبدیل می‌شود. اگرچه این روش به عنوان روشی استاندارد پذیرفته شده است، اما بایستی توجه داشت که نمونه‌برداری و اندازه‌گیری به صورت تخریبی - یعنی جدا کردن برگ از ساقه - است و به همین دلیل نمی‌توان تغییرات کلروفیل را در طول زمان در یک برگ و یا تاج پوشش مشخص به دست آورد (Xue and Yang, 2009). به علاوه روش مذکور هزینه‌بر و نقطه‌ای است. در مقابل، روش‌های مبتنی بر سنجنش از دور غیرتخریبی، دارای قابلیت تکرار در طول زمان و به صورت توزیع یافته در مکان در سطح اندازه پیکسل سنجنده‌های مختلف‌اند.

برای استخراج کلروفیل براساس داده‌های سنجنش از دور، سه روش وجود دارد:

(روش نخست) در روش‌های تجربی - آماری^۲ از تکنیک‌های آماری استفاده می‌شود تا رابطه بین متغیر مورد نظر و میدان تابشی^۳ به دست آید (Darvishzadeh et al., 2008) و شاخص‌های گیاهی و تکنیک‌های مختلف رگرسیون در این روش‌ها کاملاً شناخته شده‌اند.

1. Precision agriculture
2. Statistical / Empirical
3. Radiation field
4. fluorescence
5. Radiative transfer equation

برقرار نیست؛ و بنابراین بایستی از دیگر روش‌ها برای معکوس‌سازی آنها استفاده کرد. بدین منظور نیز روش‌های گوناگونی وجود دارند، که از جمله می‌توان به اینها اشاره کرد: روش جداول مرجع^۱ (LUT) (Combal et al., 2003a; Darvishzadeh et al., 2008; Knyazikhin et al., 1998; Weiss et al., 2000) روش‌های بهینه‌سازی عددی (Jacquemoud et al., 2010, Vohland et al., 1995) و شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ (ANN) (Bacour et al., 2006; Fang and Liang 2005; Walthall et al., 2004; Weiss and Baret 1999)، که هر یک در بردارندهٔ پاره‌ای نقاط مثبت و منفی است. عدم قطعیت در مدل و اندازه‌گیری‌ها معمولاً به تعداد زیادی جواب می‌انجامد که مسئله معکوس را با مشکل مواجه می‌سازد و به شکل‌گیری مسئله ناسازگار^۳ می‌انجامد (Koetz et al., 2005; Atzberger, 2004; Combal et al., 2002).

محصول برنج با توجه به شرایط رشد آن (وجود رطوبت زیاد در منطقه و تعداد روزهای ابری فراوان) که در سنجش از دور، شرایط نامناسب تلقی می‌شود، و همچنین دشوار بودن عملیات میدانی آن، تاکنون کمتر مورد مطالعه سنجش از دور قرار گرفته است. از طرفی اهمیت این محصول به لحاظ تأمین امنیت غذایی کشور و نیز استراتژیک بودن، موجب انتخاب برنج به عنوان محصول مورد مطالعه شد. با توجه به مزایای مختلف روش‌های فیزیکی مانند در نظر گرفته شدن همهٔ باندها در استخراج پارامترها، توجه به تأثیرات مستقیم اتمسفر و خاک و نیاز به داده‌های میدانی فقط برای اعتبارسنجی مدل، در این تحقیق از مدل انتقال تابش

به علت جذب و پخش در محیط (محیط تاج پوشش به عنوان مثال) و جمله دوم مربوط به افزایش انرژی به علت گسیل و پخش چندگانه^۱ است. با استفاده از این مدل‌ها ارتباطی صریح بین مقدار بازتاب ثبت شده به وسیله سنجنده و متغیرهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی مورد نظر ایجاد می‌شود. تثبیت‌شده‌ترین روش در مدل‌سازی بازتاب در پوشش گیاهی، ترکیب مدل اپتیکی برگ با مدل بازتاب تاج پوشش^۲ و مدل بازتاب خاک و محاسبه بازتابندگی گیاه در سطح بالای تاج پوشش^۳ است (Dorigo et al., 2007).

کلروفیل در تحقیقات مختلف با استفاده از مدل‌های فیزیکی تخمین زده شده است (Bacour et al., 2006; Combal et al., 2003b; Darvishzadeh et al., 2008; le Maire et al., 2008; Zarco-Tejada et al., 2004; Zarco-Tejada and Ustin 2001; Zhang et al., 2005). در حالت مستقیم^۴ مدل‌های انتقال تابش با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی بازتابندگی شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین برای استخراج متغیرها باید این مدل‌ها معکوس^۵ گردند.

معکوس‌سازی جزو مدل‌های انتقال تابش به معنای یافتن مجموعه پارامترهایی (ورودی به مدل) است که منجر به شبیه‌سازی نزدیک‌ترین طیف به طیف شبیه‌سازی شده به وسیله سنجنده گشته‌اند (رابطه ۲):

رابطه (۲)

$$R = f(V, \Omega) + \varepsilon$$

که در آن V پارامترهای ورودی، Ω هندسه خورشید و سنجنده و ε نیز خطاهای اندازه‌گیری (سنسور)، پردازش و مدل است. بنابراین با دانستن شرایط هندسه خورشید و سنجنده، هدف معکوس‌سازی همانا یافتن بهترین V است.

با توجه به شرایط هادامارد^۶ مدل‌های ریاضی پدیده‌های فیزیکی هنگامی به صورت ریاضی معکوس‌شدنی‌اند که جواب‌های مسئله معکوس وجود داشته باشند و یگانه باشند و در عین حال به صورت پیوسته به داده‌ها وابسته باشند (Knyazikhin et al., 1998). در بیشتر مدل‌های انتقال تابش این شرایط

1. Multiple Scattering
2. Canopy
3. Top of canopy reflectance
4. Forward mode
5. Inversion
6. Hadmard condition
7. Lookup table
8. Artificial neural network
9. III-posed problem

PROSAIL که مدلی فیزیکی است و همچنین تصویر سنجنده چندطیفی ۲-AVNIR استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری

مطالعات میدانی در طول ماه‌های تیر و مرداد ۱۳۸۹ در منطقه آمل در شمال ایران (شکل ۱)، که بین دریاچه خزر و رشته کوه‌های البرز محصور است، انجام گرفت. کشت غالب در مناطق جلگه‌ای برنج است و با افزایش ارتفاع، کاربری به باغ تغییر می‌یابد. تقویم زراعی نواحی مختلف منطقه نیز به تبعیت از تغییرات دمایی، متفاوت است. در نتیجه مزارع برنج به هنگام انجام عملیات میدانی در مراحل مختلف رشد بودند، و این خود باعث شد که تغییرات کافی در بازتابندگی محصول برنج ایجاد شود.

۶۰ پلات ۲۰ × ۲۰ متر به صورت تصادفی انتخاب شدند. برای کاهش تأثیر همسایگی در بازتاب، سعی شد که نقاط نمونه تا حد امکان دور از ساختمان‌ها و مرز مزارع انتخاب شوند. تعدادی از پلات‌ها به علت افتادن در ابر و یا اندازه‌گیری اشتباه از محاسبات حذف شدند و تعداد ۴۳ پلات باقی ماند. در هر پلات با توجه به همگونی آن ۳ تا ۵ زیرپلات ۱ × ۱ مترمربعی انتخاب شدند. در هر زیرپلات با استفاده از دستگاه ۵۰۲-

SAPD مقدار کلروفیل برای ۳۰ برگ از قسمت‌های مختلف تاج پوشش اندازه‌گیری شد و میانگین آنها محاسبه گردید. مقادیر SAPD بی‌بُعد هستند و بایستی به واحد کلروفیل ($\mu\text{g cm}^{-2}$) تبدیل شوند. Markwell (1995) بدین منظور فرمولی تجربی ارائه کرد (رابطه ۳) که در گونه‌های مختلف گیاهی جواب مناسبی می‌دهد.

رابطه (۳)

$$\text{Chl} = 10.6 + (7/39 \times A) + 0.114 \times (A^2)$$

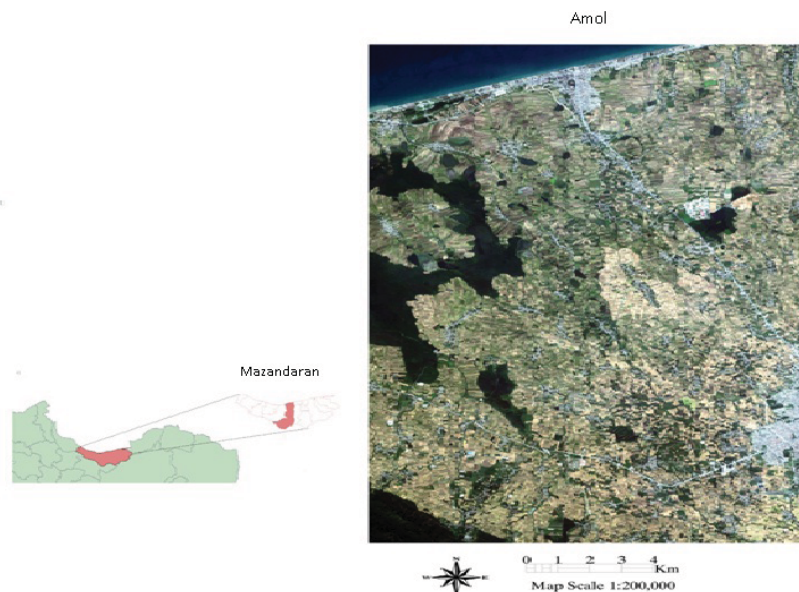
که در آن A مقادیر SPAD است.

برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ، ابتدا تعداد کپه‌های برنج موجود در هر مترمربع (تراکم گیاه)^۱ شمارش شد. سپس تعداد پنجه‌های نصف کپه‌های موجود شمارش گردید و مقدار میانگین پنبه در کپه به دست آمد. در گام بعد دو کپه که تعداد پنجه‌های‌شان به میانگین به دست آمده نزدیک بود، به عنوان نماینده آن زیرپلات انتخاب شدند و تا رسیدن به آزمایشگاه در آب نگاه‌داری گردیدند. در آزمایشگاه مقدار سطح برگ هر کپه با استفاده از دستگاه LI-۳۰۰ محاسبه شد و میانگین دو کپه به دست آمد. با ضرب این میانگین در تراکم و تقسیم آن بر یک متر مربع، شاخص سطح برگ برای هر زیرپلات به دست آمد. در جدول ۱ خلاصه آماری داده‌های برداشت شده درج گردیده است.

جدول ۱. خلاصه آماری پارامترهای اندازه‌گیری شده در منطقه مطالعاتی برای ۴۳ نمونه

پارامترهای اندازه‌گیری شده	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
SPAD	۳۰/۸	۴۳/۵۰	۳۷/۹۶	۲/۵۳
شاخص سطح برگ ^۲	۰/۴۹	۷/۷۱	۳/۸۴	۱/۷۷
کلروفیل برگ ^۳	۲۶/۵۰	۴۵/۸۰	۳۶/۸۰	۳/۸۶
کلروفیل تاج پوشش ^۴	۰/۲۱	۳/۸۰	۱/۵۵	۰/۸۰

1. Plant density
2. Leaf Area Index
3. Leaf chlorophyll content
4. Canopy chlorophyll content



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

جدول ۲. مشخصات سنجنده ۲-AVNIR ماهواره ALOS

تعداد باندها	۴
طول موج	میکرومتر ۰/۵ به ۰/۴۲ ۱ بانده میکرومتر ۰/۶۰ به ۰/۵۲ ۲ بانده میکرومتر ۰/۶۹ به ۰/۶۱ ۳ بانده میکرومتر ۰/۸۹ به ۰/۷۶ ۴ بانده
قدرت تفکیک مکانی	۱۰ Meter (نادیر)
عرض نوار تصویر	۷۰ Kilometer (نادیر)
دوره بازگشت	۴۲ روز
زاویه اشاره	.
تاریخ تصویربرداری	۲۰۱۰/۰۷/۰۷

جدول ۳ ورودی‌های مدل FLAASH و همچنین نحوه تعیین آن‌ها درج شده است. خروجی FLAASH مقادیر بازتابندگی تصحیح شده از تأثیرات اتمسفری است. تصحیح هندسی نیز از طریق چندجمله‌ای‌های درجه ۲ و با استفاده از GPS-Garmin Oregon 550^۱ و نقشه ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مورد مطالعه - تهیه شده در سازمان نقشه‌برداری کشور - انجام شد.

1. Garmin Oregon 550

۲-۲- داده‌های تصویری

سازمان فضایی ژاپن در سال ۱۹۹۴ ماهواره ALDS را که دربردارنده سنجنده‌های ۲-AVNIR و PRISM و PLASAR است، پرتاب کرد. سنجنده ۲-AVNIR اطلاعات را در باندهای آبی و سبز و قرمز و مادون قرمز نزدیک جمع‌آوری می‌کند (جدول ۲). تصویر منطقه مورد مطالعه همزمان با مطالعات میدانی تهیه شد. تصحیح اتمسفری نیز با ماژول FLAASH در نرم‌افزار ENVI انجام شد. FLAASH بر پایه مدل اتمسفری MODTRAN (Matthew et al., 2000) است. در

جدول ۳. ورودی‌های مدل FLAASH برای انجام تصحیحات اتمسفری

نحوه تعیین	مقدار و نوع	نوع پارامتر ورودی
استفاده از Gain و Offset تصویر از header فایل همراه تصویر به دست آمد	رادیناس	تصویر ورودی
بر اساس عرض جغرافیایی و میانگین دما تعیین شد بر اساس مدل اتمسفری از جدول استاندارد FLAASH استخراج گردید	Mid-Latitude Summer ۲/۹۲ (g/cm ²)	مدل اتمسفری ستون آب
بر اساس جدول استاندارد FLAASH انتخاب گردید از ایستگاه هواشناسی منطقه گرفته شد	Maritime ۲۵ (km)	مدل هواویزه میدان دید
مرور مقالات بر اساس راهنمای MODTRAN	۳۸۵ (ppm) Disort	نسبت اختلاط CO ₂ مدل پخش

۲-۳- روش‌شناسی (متدولوژی)

معیارهای انتخاب مدل مناسب، مشتمل بر تعداد کم پارامترهای ورودی، معکوس‌پذیری مدل، قابلیت دسترسی و اجرای ساده مدل است. به همین جهت مدل شناخته شده PROSAIL که از ترکیب دو مدل اپتیکی برگ PROSPECT و تاج‌پوشش SAIL است استفاده شد.

۲-۳-۱- مدل اپتیکی برگ

مدل PROSPECT (Jacquemoud, 1990) در طول موج‌های ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر با فاصله‌های ۵ نانومتری، بازتابندی و تراگسیلندگی را در سطح برگ شبیه‌سازی می‌کند. پارامترهای ورودی این مدل شامل یک پارامتر ضخامت برگ (N)، کلروفیل a و b (C_{ab})، ماده خشک (C_m) و آب برگ (C_w) است. شکل عمومی مدل به صورت رابطه (۴) است:

رابطه (۴)

$$[\text{refl}, \text{tran}] = \text{PROSPECT}(N, C_{ab}, C_m, \text{and } C_w)$$

۲-۳-۲- مدل اپتیکی تاج پوشش

مدل تاج پوشش SAIL (Verhoef, 1984, 1985) از قدیمی‌ترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی مقدار بازتاب در سطح بالای گیاه (P_{toc}) است. این مدل را می‌توان

توسعه‌یافته مدل SUITS (1972) برشمرد. ورودی‌های این مدل عبارت‌اند از خصوصیات اپتیکی برگ که از مدل PROSPECT شبیه‌سازی می‌گردند و یا با دستگاه اسپکترومتر اندازه‌گیری می‌شوند. ورودی‌های SAIL عبارت‌اند از: شاخص سطح برگ (LAI)^۱، میانگین زوایای برگ‌ها^۲ (ALA)، اندازه نقطه حساس^۳ (HOT) که تابعی است از LAI، و نسبت تابش ورودی به تاج پوشش^۴ (SKYL). بدین ترتیب، این مدل به صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود:

رابطه (۵)

$$P_{\text{toc}} = \text{SAIL}(\text{refl}, \text{tran}, \text{LAI}, \text{ALA}, \text{HOT}, \text{SKYL}, R_s, \theta_s, \theta_v, \varphi)$$

که در آن θ_s و θ_v زاویه زنیت خورشید و سنجنده است، و φ زاویه آزمون بین سنجنده و خورشید. بازتابندگی خاک پشت زمینه شرط مرز پایینی مدل SAIL است، که با R_s نشان داده می‌شود. بازتاب خاک پشت زمینه بستگی به شرایط هندسه تصویربرداری، زبری سطح، ترکیبات کانی‌ها، مقدار مواد غیرآلی و رطوبت خاک دارد. بر این اساس، می‌توان رطوبت و زبری و شرایط هندسی را به صورت پارامتری مستقل از

1. Leaf area index
2. Average leaf angle
3. Hos spot
4. Fraction of sky light

می‌نهد. از میان نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت، پارامترهای متغیر و ثابت تعیین شدند و در نهایت ۵ پارامتر (زاویه زنیت خورشید، زاویه آزیموت، SKYL، زاویه دید سنجنده و C_w) ثابت فرض گردید و بقیه متغیر در نظر گرفته شدند (جدول ۴).

۲-۴- معکوس‌سازی

موفقیت در معکوس‌سازی مدل‌های انتقال تابش، به این سه تصمیم یا گزینش بستگی می‌یابد:

- انتخاب مدل تابش مناسب برای شبیه‌سازی بازتاب گیاه؛
 - انتخاب روش مناسب معکوس‌سازی؛ و
 - تعریف و انتخاب جواب نهایی (بهینه).
- بهینه‌سازی درون‌تکرار^۱ از روش‌های قدیمی به‌منظور معکوس‌سازی مدل‌های انتقال تابش است. در این روش، منظور همانا یافتن بهترین تطبیق بین طیف شبیه‌سازی شده و طیف اندازه‌گیری شده با اجرای مکرر مدل با ترکیب‌های مختلف پارامترهای ورودی است. معیار توقف تکرارها، هم‌گرایی تابع هزینه است. تابع هزینه استفاده شده در این تحقیق، تابع RMSE (رابطه ۸) است.

رابطه (۸)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{measured} - R_{simulated})^2}{n}}$$

طول موج بیان کرد (Baret et al., 2005; Weiss et al., 2002). با استفاده از این مفهوم بازتاب خاک به‌صورت رابطه (۶) نمایش داده می‌شود:

$$R_s = (\lambda_i, \Omega_i, H_j, Z_k) \quad (6)$$

در آن، R_s بازتاب خاک، λ_i طول موج، Ω_i هندسه تصویربرداری، H_j رطوبت و Z_k زبری خاک است؛ و R_s متناسب با بازتاب خاک در همان طول موج اما با رطوبت و هندسه و زبری متفاوت فرض می‌شود (رابطه ۷):

رابطه (۷)

$$R_s = (\lambda_i, \Omega_i, H_j, Z_k) = B_s(\lambda_i, \Omega_i, H_m, Z_n)$$

در آن B_s پارامتر روشنایی است، که مستقل از طول موج و وابسته به دیگر پارامترهاست. این پارامتر در مناطق با پوشش کم مورد نقد است (Verhoef, 2007). در سنجنده‌هایی که دید یک‌جهته و نادیر دارند، B_s فقط برای زبری و رطوبت سطح به کار می‌رود (Darvishzadeh, 2008; Lauvernet et al., 2008) (Atzberger, 2003). در کل به ۱۲ پارامتر به عنوان ورودی برای اجرای مدل نیاز است. افزون بر اینها، آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترهای مدل نیز صورت گرفت. انجام این آنالیز بدین شکل بود. آنالیز که یک متغیر به تناوب تغییر داده شد و دیگر متغیرها ثابت در نظر گرفته شدند. بدین منظور بررسی گردید که تغییر در یک متغیر در مدل چگونه بر بازتاب تاج پوشش در دامنه طول موج‌های ۲-AVNIR تأثیر

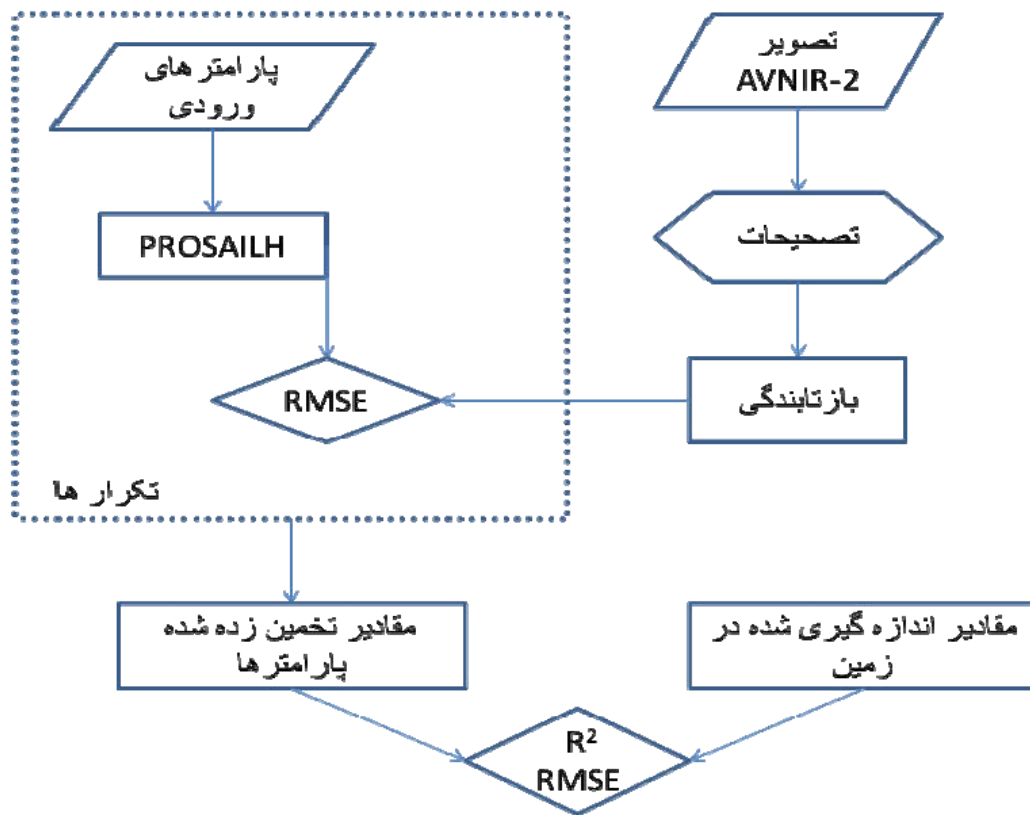
جدول ۴. دامنه پارامترهای ورودی به مدل PROSAIL

پارامتر	واحد	حداقل	حداکثر
شاخص سطح برگ (LAI)	$m^2 m^{-2}$	۲	۱۰
میانگین زوایای برگ‌ها (ALA)	Deg	۵۰	۸۰
مقدار کلروفیل برگ (Cab)	$\mu g cm^{-2}$	۲۰	۵۰
پارامتر ساختاری برگ (N)	بی بعد	۱	۲
ماده خشک (C_m)	$g cm^{-2}$	۰/۰۰۱	۰/۰۲
نقطه حساس (HOT SPOT)	$m m^{-1}$	۰/۰۱	۰/۱
ضریب درخشندگی خاک (Bs)	بی بعد	۰/۱	۱/۲

1. Iterative optimization

پارامترهایی که به شبیه‌سازی طیفی بینجامند که با طیف به‌دست آمده از تصویر کمترین RMSE را داشته باشد، انتخاب می‌شود. در تکرار بعد بازه‌هایی که در تکرار نخست بهترین جواب را داشتند، انتخاب و به ۵ قسمت تقسیم‌بندی می‌شوند و مراحل بالا تکرار می‌گردد. در نهایت، پس از ۵ بار تکرار و هم‌گرا شدن مقادیر RMSE، مقادیر کلروفیل برگ و شاخص سطح برگ که منجر به شبیه‌سازی نزدیک‌ترین طیف به طیف تصویر شده‌اند، به‌عنوان جواب نهایی مد نظر می‌گیرند. این الگوریتم در شکل ۲ داده شده است.

که در آن R_{measured} بازتابندگی به دست آمده از تصویر، $R_{\text{simulated}}$ بازتابندگی شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل، و n تعداد باندهای سنجنده است. در ابتدا برای هر پارامتر با توجه به مطالعات میدانی، یک بازه حداقل تا حداکثر انتخاب می‌شود (براساس جدول ۳)؛ و سپس این بازه‌ها به ۵ قسمت تقسیم می‌گردد. با در نظر گرفتن مقادیر میانه این بازه‌ها تمام ترکیب‌های موجود از پارامترهای مختلف وارد مدل می‌شوند و طیف مربوط به هر ترکیب شبیه‌سازی می‌گردد. پس از مقایسه این طیف شبیه‌سازی شده با طیف به‌دست آمده از تصویر،



شکل ۲. الگوریتم استخراج پارامترهای برنج

۳- بحث و نتایج

ترکیب روش‌های آماری و فیزیکی از شاخص مناسب استفاده کرد (Houborg and Boegh, 2008).

البته بایستی توجه داشت که آنالیز حساسیت به این روش (تغییر یک متغیر و ثابت نگه داشتن دیگر متغیرها) ساده‌تر است. در شرایط طبیعی، رخ دادن آنچه که در شکل ۳ مشخص شده است به ندرت اتفاق می‌افتد، چرا که در اکوسیستم‌ها با تغییر در هر یک از پارامترها، آن‌های دیگر نیز به تناسب تغییر می‌کنند. بنابراین، به‌منظور انجام آنالیز حساسیت دقیق باید از روش‌های جایگزین مانند طراحی آزمایش‌های مختلف و یا تحلیل فوریه استفاده کرد.

بعد از آنالیز حساسیت، که از مهم‌ترین گام‌های اجرای هر مدلی به شمار می‌آید، مدل معکوس و کلروفیل در سطح برگ استخراج گردید. شکل ۴ رابطه بین کلروفیل تخمین زده شده در سطح برگ را با مقادیر اندازه‌گیری شده در زمین نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل پیداست، این رابطه بسیار ضعیف است.

در مطالعات مختلف نیز نتایج مشابهی به دست آمده‌اند (Curran et al., 1992; Darvishzadeh et al., 2008; Weiss et al., 2000a). نمودار پراکندگی مقادیر استخراج شده (شکل ۵) نشان می‌دهد که این مقادیر تمایل دارند به حدهای بالا و بیشتر پایین خود برسند. این نتیجه از آن رو دور از انتظار نیست که مدل PROSAIL اگرچه طیف شبیه‌سازی در سطح برگ را از مدل PROSPECT به عنوان ورودی می‌گیرد، اما خروجی نهایی آن بازتاب در سطح تاج پوشش است. بازتابی که سنجنده از گیاه ثبت می‌کند، بازتاب حاصل از تاج پوشش است - و نه برگ - و بنابراین از تغییرات در ساختار گیاه و الگوی پراکندگی گیاهان و نیز درصد تاج پوشش تأثیر می‌پذیرد. ساختار گیاه تابعی از شاخص سطح برگ، تعداد لایه‌های برگ و توزیع زاویه‌ای برگ‌هاست (Ustin et al., 2004). مواد بیوشیمیایی برگ اگرچه در جذب و پخش نور دخیل‌اند، اما در مقیاس‌های مکانی، مانند آنچه که در

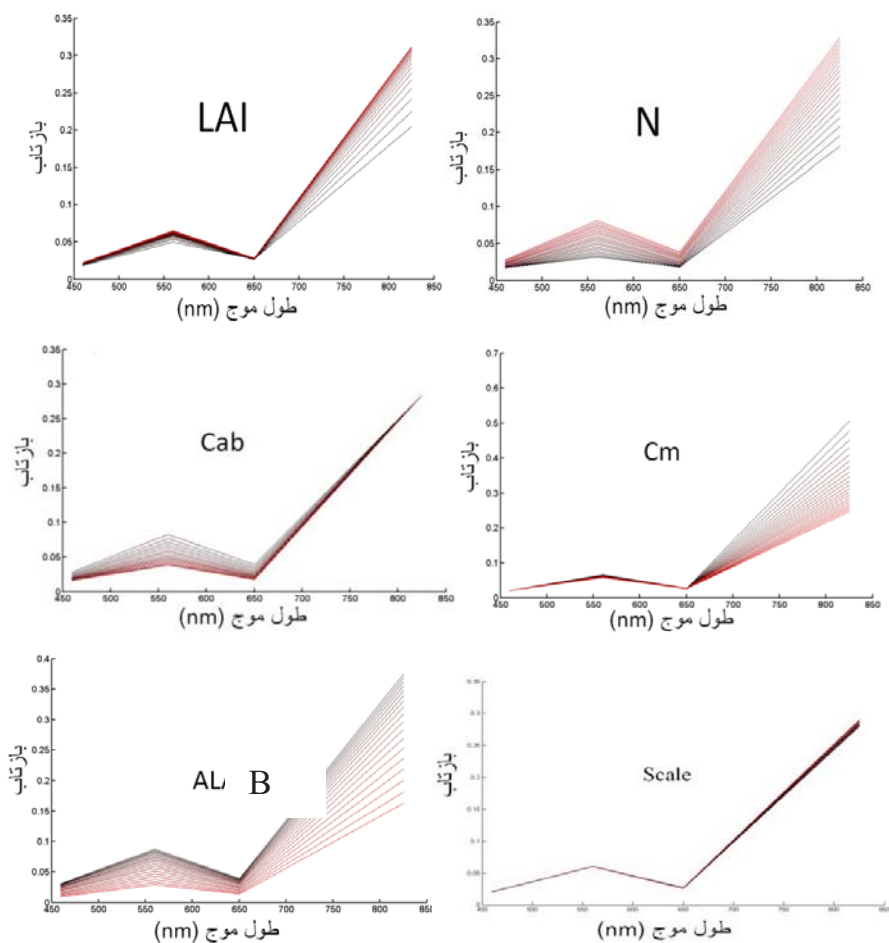
نتایج مربوط به آنالیز حساسیت مدل PROSAIL در شکل ۳ نشان داده شده است. این آنالیز از چند جنبه دارای اهمیت است: (یکم) پارامترهایی که تأثیری مشابه بر خروجی دارند، مشخص می‌شوند. استخراج این پارامترها از مدل، معمولاً دشوار است (Jacquemoud et al., 2009). به عنوان مثال، در شکل ۳ تأثیر تغییرات پارامترهای N و LAI روی بازتاب شبیه‌سازی شده به‌وسیله PROSAIL در طول موج‌های سنجنده ۲-AVNIR نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش مقادیر این دو پارامتر بازتاب نیز افزایش پیدا می‌کند. (دوم) یکی از راه‌های کم کردن تعداد جواب‌های مشابه (مسئله ناسازگار) به حداقل رساندن پارامترهای آزاد (جدول ۳) و ثابت کردن آنهاست. با استفاده از آنالیز حساسیت متغیرهایی که تغییرات آنها تأثیری در شبیه‌سازی بازتاب در طول موج‌های دلخواه ندارد، تعیین می‌شوند. به‌عنوان مثال، تأثیرات مقدار آب در طول موج‌های بیش از ۱۳۰۰ نانومتر است، که خارج از دامنه مورد نظر در سنجنده ۲-AVNIR است.

یکی از نگرانی‌های موجود درباره گیاه برنج تفاوت بستر کشت آن (غرقابی بودن) با دیگر محصولات مشابه (مانند گندم و جز آن) است. در شکل مشخص است که پارامتر $scale$ - که در بازتاب خاک ضرب می‌شود - تأثیر چندانی در کل باندها ندارد. (سوم) تعیین حساسیت مدل در باندهای مختلف نسبت به تغییرات متغیرها باعث می‌شود که بتوان در معکوس‌سازی از باندها و یا ترکیبات باندهای مناسب (مانند شاخص‌های گیاهی) استفاده کرد.

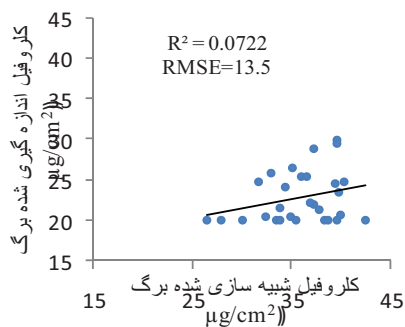
به عنوان نمونه، پارامتر Cm در باند ۴ بیشترین تأثیر را دارد و یا کلروفیل دارای بیشترین تأثیر در باند سبز است. با کمک این گونه اطلاعات می‌توان شاخص‌های مختلف گیاهی را مطالعه کرد و یا شاخص‌های جدیدی را شکل داد و به وجود آورد (Broge and Leblanc, 2001) و همچنین می‌توان در

به خوبی مدل نشوند، که به همین علت برخی از پارامترها تمایل به رسیدن به حدهای بالا و پایین خود پیدا کنند.

این مقاله آمده است، کمتر تأثیر دارد. همچنین درویش‌زاده (۲۰۰۸) چنین بحث و استدلال می‌کند که ممکن است برخی از باندها از طریق مدل PROSAIL



شکل ۳. تأثیر پارامترهای مختلف بر بازتاب شبیه‌سازی شده با PROSAIL

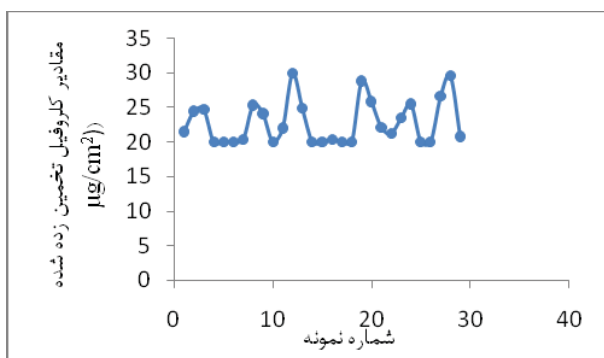


شکل ۴. رابطه بین مقادیر کلروفیل تخمین زده شده در سطح برگ با مقادیر اندازه‌گیری شده

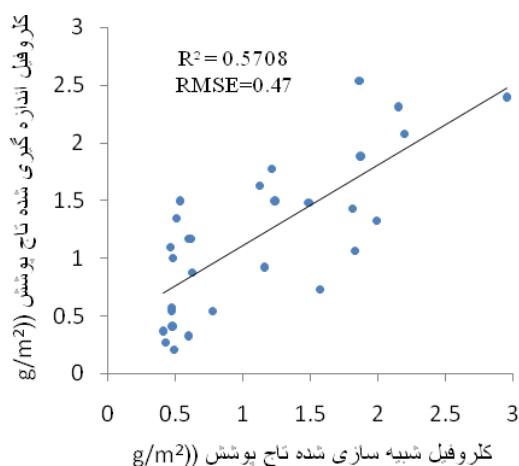
استخراج مقدار کلروفیل محصول برنج با استفاده از معکوس‌سازی مدل انتقال تابش تاج پوشش و تصاویر ALOS

می‌توان به استفاده از اطلاعات جانبی^۱ (Combal et al., 2002)، به کارگیری فیدهای مکانی یا زمانی، و ایجاد متغیرهای ترکیبی^۲ اشاره کرد (Dorigo et al., 2007). در این تحقیق از متغیر ترکیبی کلروفیل تاج پوشش که از حاصل ضرب دو متغیر تاج پوشش برگ و شاخص سطح برگ به دست می‌آید استفاده شد. رابطه کلروفیل تاج پوشش در مقایسه با رابطه کلروفیل برگ، بهبودی نسبی یافته است (شکل ۶).

معمولاً در تخمین پارامترهای گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش از دور تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معلومات (اطلاعات رادیومتریکی) است (Baret, 2008). برای مثال ۱۲ مجهول در مدل PROSAIL وجود دارند که بایستی از اطلاعات ۴ بانده (در مورد سنجنده ALOS) و یک جهت (نادیر) و یک تصویر از منطقه در یک زمان استخراج شوند. چنین حالتی در اصطلاح، حالت یا مسئله ناسازگار نامیده می‌شود که روش‌های گوناگونی برای حل آن وجود دارند؛ و به‌عنوان مثال،

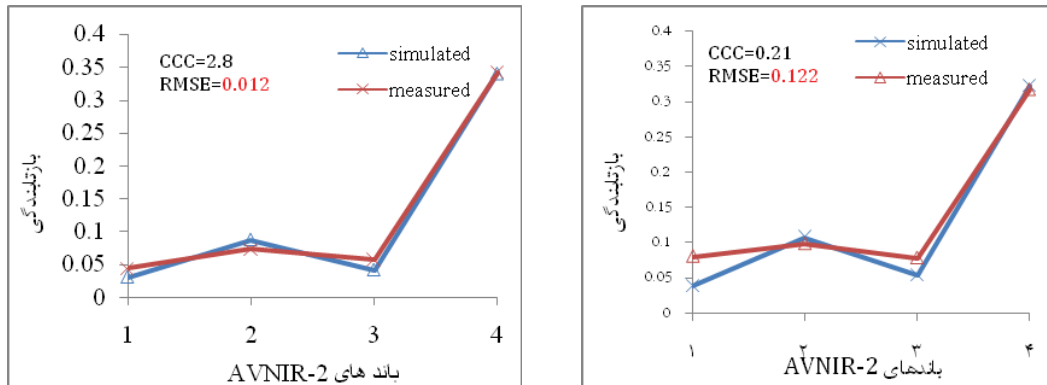


شکل ۵. نمودار پراکنش مقادیر تخمین زده شده کلروفیل برگ



شکل ۶. رابطه بین مقادیر کلروفیل تخمین زده شده در سطح تاج پوشش (CCC) با مقادیر اندازه‌گیری شده

1. Prior knowledge
2. Synthetic Variables



شکل ۷. طیف شبیه‌سازی شده در ۴ باند سنجنده ۲-AVNIR برای گیاه برنج در اوایل رشد، هنگامی که کلروفیل تاج پوشش (ccc) حداقل است (سمت راست)؛ و بلوغ، هنگامی که کلروفیل تاج پوشش حداکثر است (سمت چپ).

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل PROSAIL پارامتر اصلی و تعیین‌کننده مقدار کلروفیل گیاه برنج در دو سطح برگ و تاج پوشش تخمین زده شد. برای معکوس کردن مدل، روش بهینه‌سازی درون تکرار به کار گرفته شد. با استفاده از آنالیز حساسیت پارامترهای ثابت و متغیر تعیین گردیدند و براساس آنها با بهره‌گیری از معکوس‌سازی به روش بهینه‌سازی درون تکرار مقادیر کلروفیل در دو سطح برگ و تاج پوشش استخراج شد. نتایج نشان داد که تخمین کلروفیل در سطح برگ با دقت چندان مناسبی امکان‌پذیر نیست؛ و نیز استدلال گردید که علت این امر مشکل ناسازگاری مسئله است. برای رفع این مشکل چندین روش وجود دارد که از آن میان می‌توان به استفاده از متغیرهای ترکیبی همچون مقدار کلروفیل تاج پوشش اشاره کرد، که ترکیبی است از دو متغیر مقدار کلروفیل برگ و شاخص سطح برگ. افزون بر اینها، نشان داده شد که کلروفیل تاج پوشش با دقت بسیار بهتری تخمین زده شد.

روش معکوس‌سازی بهینه‌سازی درون تکرار، بسیار زمان‌بر است (حدود ۱۸ ساعت در هر بار اجرای مدل در این تحقیق؛ و بنابراین استفاده از آن در

از آنجا که مدل SAIL برای پوشش‌های گیاهی همگون طراحی شده است، به نظر می‌رسد عملکرد آن هنگامی که پوشش به حداکثر رشد خود رسیده باشد، در مقایسه با زمانی که گیاه اوایل رشد را طی می‌کند (با پوشش پراکنده) بهتر است. برای بررسی این موضوع طیف شبیه‌سازی شده در مقابل طیف اندازه‌گیری شده برای دو نمونه با حداکثر و حداقل مقدار کلروفیل در منطقه رسم شده است (شکل ۷). با استفاده از این نمودار می‌توان فهمید که با افزایش کلروفیل تاج پوشش (زمانی که گیاه به حداکثر رشد رسیده باشد) شبیه‌سازی طیف بهتر صورت می‌گیرد. می‌بایست توجه داشت که افزایش کلروفیل تاج پوشش تنها به معنای افزایش سبزیگی (کلروفیل برگ) نیست بلکه بیشتر به دلیل افزایش در شاخص سطح برگ است. معمولاً تغییرات کلروفیل در طول دوره رشد، کمتر از تغییرات سطح برگ است و بنابراین بهبود یاد شده را - همان‌گونه که بحث گردید - می‌توان با حساسیت PROSAIL به خصوصیات بیوفیزیکی (شاخص سطح برگ) گیاه مرتبط دانست. علت عملکرد ضعیف مدل را در اوایل رشد، می‌توان تأثیر ساختار ناهمگون تاج پوشش و همچنین تأثیر بازتابندگی پشت زمینه بر بازتابندگی گیاه قلمداد کرد.

۵- منابع

- Atzberger, C., 2004, **Object-based Retrieval of Biophysical Canopy Variables Using Artificial Neural Nets and Radiative Transfer Models, Remote Sensing of Environment**, 93, 53-67.
- Atzberger, C., Jarmer, T., Schlerf, M., Kötz, B., & Werner, W., 2003, **Retrieval of Wheat Bio-physical Attributes from Hyperspectral Data and SAILH + PROSPECT Radiative Transfer Model**, In M. Habermeyer, A. Müller, & S.
- Bacour, C., Baret, F., Béal, D., Weiss, M., & Pavageau, K., 2006, **Neural Network Estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI×Cab, from top of canopy MERIS reflectance data: Principles and validation**, Remote Sensing of Environment, 105, 313-325.
- Baret, F., Pavageau, K., Bacour, C., Béal, D., Weiss, M., Bruniquel, V. and Regner, P., 2005b, **Algorithm Theoretical Basis Document for Meris Top of Canopy Land Products (toc veg)**, Technical report, INRA & Noveltis.
- Baret, F. and Buis, S., 2008, **Estimating Canopy Characteristics From Remote Sensing Observations: Review of Methods and Associated Problems**, In S. Liang (Ed.), *Advances in Land Remote Sensing: System, Modeling, Inversion and Application*, Springer, 171-200.
- Curran, P.J., Dungan, J.L., & Gholz, H.L., 1992, **Seasonal LAI in Slash Pine Estimated with Landsat TM**, Remote Sensing of

معکوس‌سازی مدل‌های پیچیده‌تر انتقال تابش عملی نیست، و به‌نظر می‌رسد که روش‌های دیگری چون جداول مرجع و یا شبکه‌های عصبی جایگزین‌های بهتری باشند. از طرفی در این روش درستی جواب به انتخاب نوع تابع هزینه نیز وابسته است. این توابع در طیف گسترده‌ای وجود دارند: از نوع بسیار ساده که فقط در بردارنده اطلاعات رادیومتریک‌اند گرفته، تا توابعی که از اطلاعات جانبی نیز استفاده می‌کنند.

آنچه که می‌بایست در مورد این مدل‌ها توجه داشت، این است که اجرای صحیح مدل‌های ساده، بسیار بهتر از اجرای ناصحیح مدل‌های پیچیده‌تری است که در آنها کوشش بر نزدیک‌شدن هر چه بیشتر به واقعیت است. بنابراین، وجود آگاهی و دانش اولیه درباره متغیرها و دامنه آنها در طبیعت می‌تواند به بهبود معکوس‌سازی بسیار کمک کند. همچنین پیشنهاد می‌شود که به‌جای استفاده از روش‌های فیزیکی یا آماری، به تنهایی روش‌های تلفیقی به کار روند. این امر باعث افزایش سرعت اجرای مدل و همچنین دقت استخراج پارامترها می‌گردد.

برنج عموماً در مناطق بسیار مرطوب و ابری کشت می‌شود. این رطوبت تأثیر منفی زیادی بر بازتاب رسیده به سنجنده می‌گذارد. به‌علاوه، بستر کشت برنج نیز غرقابی است و با دیگر محصولات فرق می‌کند. دیگر اینکه مزارع برنج به خصوص در ایران به صورت خرده‌مالکی اداره می‌شوند که این به معنای کوچک بودن مزارع است (معمولاً با مساحتی کمتر از یک هکتار)؛ و بازتاب رسیده به سنجنده چه‌بسا از زمین‌های مجاور نیز تأثیر بپذیرد. تمام موارد مذکور باعث می‌شوند که سنجنش از دور این محصول با مشکلات زیادی همراه باشد. حل این مشکلات مستلزم انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه است.

- Environment, 39, 3-13 Colombo, R., Bellingeri, D., Fasolini, D., & Marino, C.M., 2003, **Retrieval of Leaf Area Index in Different Vegetation Types Using High Resolution Satellite Data**, Remote Sensing of Environment, 86, 120-131.
- Combal, B., Baret, F., Weiss, M., Trubuil, A., Macé, D., Pragnère, A., Myneni, R., Knyazikhin, Y., & Wang, L., 2003a, **Retrieval of Canopy Biophysical Variables from Bidirectional Reflectance Using Prior Information to Solve the Ill-posed Inverse Problem**, Remote Sensing of Environment, 84, 1-15.
- Combal, B., Baret, F., Weiss, M., Trubuil, A., Macé, D., Pragnère, A., Myneni, R., Knyazikhin, Y., & Wang, L., 2003b, **Retrieval of Canopy Biophysical Variables From Bidirectional Reflectance: Using Prior Information to Solve the Ill-posed Inverse Problem**, Remote Sensing of Environment, 84, 1-15.
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., & Atzberger, C., 2008, **Inversion of a Radiative Transfer Model for Estimating Vegetation LAI and Chlorophyll in a Heterogeneous Grassland**, Remote Sensing of Environment, 112, 2592-2604.
- Dorigo, W.A., Zurita-Milla, R., de Wit, A.J.W., Brazile, J., Singh, R., & Schaepman, M.E., 2007, **A Review on Reflective Remote Sensing and Data Assimilation Techniques for Enhanced Agroecosystem Modeling**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9, 165-193.
- Fang, H., & Liang, S., 2005, **A Hybrid Inversion Method for Mapping Leaf Area Index from MODIS data: Experiments and Application to Broadleaf and Needle Leaf Canopies**, Remote Sensing of Environment, 94, 405-424.
- Filella, I. and Peñuelas, J., 1994, **The Red Edge Position as Indicators of Plant Chlorophyll Content**, biomass and hydric.
- Gitelson, A.A., Gritz, Y., & Merzlyak, M.N., 2002, **Relationships Between Leaf Chlorophyll Content and Spectral Reflectance and Algorithms for Non-destructive Chlorophyll Assessment in Higher Plant Leaves**, Journal of Plant Physiology, 160, 271-282.
- Jacquemoud, S., & Baret, F., 1990, **PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra**, Remote Sensing of Environment, 34, 75-91.
- Jacquemoud, S., Baret, F., Andrieu, B., Danson, F.M., & Jaggard, K., 1995, **Extraction of Vegetation Biophysical Parameters by Inversion of the PROSPECT + SAIL Models on Sugar Beet Canopy Reflectance Data**. Application to TM and AVIRIS sensors. Remote Sensing of Environment, 52, 163-172.
- Knyazikhin, Y., Kranigk, J., Myneni, R.B., Panforyov, O., & Gravenhorst, G., 1998, **Influence of Small-scale Structure on Radiative Transfer and Photosynthesis in Vegetation Canopies**, Journal of Geophysical Research D: Atmospheres, 103, 6133-6144.

- Koetz, B., Baret, F., Poilvé, H., & Hill, J., 2005, **Use of Coupled Canopy Structure Dynamic and Radiative Transfer Models to Estimate Biophysical Canopy Characteristics**, Remote Sensing of Environment, 95, 115-124.
- Lauvernet, C., Baret, F., Hascoët, L., Buis, S., & Le Dimet, F.X., 2008, **Multitemporal-Patch Ensemble Inversion of Coupled Surface-atmosphere Radiative Transfer Models for Land Surface Characterization**. Remote Sensing of Environment, 112, 851-861.
- le Maire, G., François, C., Soudani, K., Berveiller, D., Pontailier, J.Y., Bréda, N., Genet, H., Davi, H., & Dufrêne, E., 2008, **Calibration and Validation of Hyperspectral Indices for the Estimation of Broadleaved Forest Leaf Chlorophyll Content, Leaf Mass Per Area, Leaf Area Index and Leaf Canopy Biomass**, Remote Sensing of Environment, 112, 3846-3864.
- Liang, N. S., 2004, **Qualitative Remote Sensing of Land Surfaces**, John Wiley & Sons.
- Malenovsky, Z., Mishra, K. B., Zemek, F., Rascher, U., Nedbal, L., 2009, **Scientific and Technical Challenges in Remote Sensing of Plant Canopy Reflectance and Fluorescence**, Journal of Experimental Botany, Vol. 60, No. 11.
- Markwell, J., Osterman, J. C., & Mitchell, J. L., 1995, **Calibration of Minolta SPAD-502 Leaf Chlorophyll Meter**, Photosynthetic Research, 46(3), 467-472.
- Matthew, M.W., Adler-Golden, S.M., Berk, A., Richtsmeier, S.C., Levine, R.Y., Bernstein, L.S., Acharya, P.K., Anderson, G.P., Felde, G.W., Hoke, M.P., Ratkowski, A., Burke, H.-H., Kaiser, R.D., Miller, D.P., 2000, **Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-Based Algorithm**, Proceedings of the SPIE 4049, 199-207.
- Suits, G. H., 1972, **The Calculation of the Directional Reflectance of a Vegetative Canopy**, Remote Sensing of Environment, 2, 117-125.
- Ustin, S. L., Jacquemoud, S., Zarco-Tejada, P. J., & Asner, G. P., 2004, **Remote Sensing of the Environment: State of the Science and New Directions**, In S. L. Ustin (Ed.), Manual of Remote Sensing, Volume 4: Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring (pp. 848). John Wiley & Sons.
- Verhoef, W., 1984, **Light Scattering by Leaf Layers With Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model**, Remote Sensing of Environment, 16(2), 125-141.
- Verhoef, W., 1985, **Earth Observation Modeling Based on Layer Scattering Matrices**, Remote Sensing of Environment, 17, 165-178.
- Vohland, M., Mader, S., & Dorigo, W., 2010, **Applying Different Inversion Techniques to Retrieve Stand Variables of Summer Barley with PROSPECT + SAIL**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12, 71-80.

- Walthall, C., Dulaney, W., Anderson, M., Norman, J., Fang, H., & Liang, S., 2004, **A Comparison of Empirical and Neural Network Approaches for Estimating Corn and Soybean Leaf Area Index from Landsat ETM+ Imagery**, Remote Sensing of Environment, 92, 465-474.
- Weiss, M., Baret, F., Myneni, R.B., Pragnère, A., & Knyazikhin, Y., 2000a, **Investigation of a Model Inversion Technique to Estimate Canopy Biophysical Variables From Spectral and Directional Reflectance Data**, Agronomie, 20, 3-22.
- Weiss, M., Baret, F., Myneni, R.B., Pragnère, A., & Knyazikhin, Y., 2000b, **Investigation of a Model Inversion Technique to Estimate Canopy Biophysical Variables from Spectral and Directional Reflectance Data**, Agronomie, 20, 3-22.
- Xue, L., & Yang, L., 2009, **Deriving Leaf Chlorophyll Content of Green-Leafy Vegetables from Hyperspectral Reflectance**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 97-106.
- Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R., Harron, J., Hu, B., Noland, T.L., Goel, N., Mohammed, G.H., & Sampson, P., 2004, **Needle Chlorophyll Content Estimation Through Model Inversion Using Hyperspectral Data From Boreal Conifer Forest Canopies**, Remote Sensing of Environment, 89, 189-199.
- Zhang, Q., Xiao, X., Braswell, B., Linder, E., Baret, F., & Moore Iii, B., 2005, **Estimating Light Absorption by Chlorophyll, Leaf and Canopy in a Deciduous Broadleaf Forest Using MODIS Data and a Radiative Transfer Model**, Remote Sensing of Environment, 99, 357-371.