

به نام آن که تن را نور جان داد

خرد را سوی دانایی عنان داد



پروین کشاورزی و منابع طبیعی  
دانشکده منابع طبیعی  
گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل

### عنوان

بررسی مشخصه‌های طیفی برگ گونه‌های راش، ممرز، توسکا، بلوط و انجیلی با استفاده از  
طیف‌سنجی زمینی

### نخاست

مژگان عباسی

### استادان راهنما

دکتر علی اصغر درویش صفت  
Prof. Michael Schaepman

### استادان مشاور

دکتر محمد رضا مروی مهاجر  
دکتر هوشنگ سبحانی  
دکتر انوشیروان شیروانی

رساله برای دریافت درجه دکتری

در رشته جنگلداری و اقتصاد جنگل

شهریور ۱۳۸۸

متن سوگند نامه دانش آموختگان دکتری پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

بسم الله الرحمن الرحيم

سپاس یزدان پاک را که مرا مشمول الطاف خویش نمود که با طی مراحل تحصیل به اخذ درجه دکتری نائل شوم. به شکرانه این نعمت بزرگ الهی که با امکانات این مرز و بوم فراهم و نزد اینجانب به امانت گذاشته شده است، در پیشگاه ملت ایران به کتاب آسمانی خود، قرآن کریم سوگند یاد می کنم که:

- در سراسر زندگی حرفه ایف به نحو احسن در راه اعتلای کشور ایران و جامعه بشری قدم برداشته و در این راه از هیچ کوششی دریغ نکنم.
- در تمامی فعالیت های تخصصی رضای خدا را همراه با صداقت علمی و اجتماعی مد نظر داشته و از موقعیت های به دست آمده در جهت رفع مشکلات مردم استفاده کنم و در همه امور منافع کشور را بر منافع فردی مقدم بدارم.
- همواره علم و دانش خود را به روز نگاه داشته و در ادای وظایف و تعهدات حرفه ای در حد توان سعی و تلاش خود را به کار گیرم.
- و اینک از خداوند متعال توفیق بندگی و پای بندی به مفاد این سوگند نامه را خواستارم و از او می خواهم که مرا در ادامه و پیمودن مسیر و فتح قله های رفیع علم و دانش و ایفای رسالت علمی و انسانی خویش موفق بدارد.

و ایمان دارم که:

" ان الله يعلم السموات و الارض و الله بصیر بما تعملون (سوره حجرات آیه ۱۸)"

و السلام علی من اتبع الهدی

## چکیده

پایه و اساس سنجش از دور به ویژه سنجش از دور ابر طیفی (Hyperspectral) برای تشخیص گونه‌ها و تهیه نقشه تپ جنگل، آگاهی از چگونگی انعکاس طیفی گونه‌های مورد نظر می‌باشد. بخشی از سنجش از دور به نام طیف‌سنجی زمینی به تعیین این مشخصه‌های طیفی می‌پردازد و سعی در ایجاد کتابخانه‌های طیفی (Spectral library) پدیده‌ها دارد. در این راستا و با هدف تهیه و بررسی تفاوت طیفی مشخصه طیفی برگ گونه‌های درختی اصلی جنگل‌های شمال ایران شامل پنج گونه راش، ممرز، توسکا، بلوط و انجیلی انعکاس طیفی آنها با استفاده از یک دستگاه طیف سنج زمینی پیشرفته در تابستان ۱۳۸۶ مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. هدف دیگر این تحقیق بررسی تفاوت مشخصه طیفی برگ گونه راش در سه رویشگاه ارتفاعی پایین بند، میان‌بند و بالابند بوده است. در مجموع ۶۴۲ نمونه مجموعه برگ در شرایط نور و سایه از ۱۰۷ درخت از گونه‌های یاد شده و در دامنه ارتفاعی ۲۵۰ تا ۲۲۰۰ متر از سطح دریا تهیه و در شرایط مناسب و نور طبیعی در عرصه جنگل مورد طیف‌سنجی قرار گرفت. همچنین میزان کلروفیل و نیتروژن نمونه‌های طیف‌سنجی شده در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. پس از بررسی‌های اولیه کیفیت داده‌ها و حذف داده‌های نویز، منحنی انعکاس طیفی گونه‌های یاد شده در طول موج ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر تهیه شد. به منظور بررسی تفاوت‌های احتمالی بازتاب طیفی گونه‌ها، پنج شاخص طیفی مهم و حساس به غلظت کلروفیل و نیتروژن محاسبه شدند. پس از بررسی میزان حساسیت آنها از طریق بررسی رابطه رگرسیون ساده، این شاخص‌ها در تجزیه و تحلیل‌های آماری مربوط به تفاوت طیفی گونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی تفکیک طیفی گونه‌ها و تعیین مناسب‌ترین طول موج‌ها برای تفکیک، از رگرسیون حداقل مربعات بخشی (PLS) استفاده گردید. از بین شاخص‌های مورد مطالعه شاخص طیفی ANCB بیشترین ارتباط ( $r=0.81-0.60$ ) را با غلظت نیتروژن برگ گونه‌ها نشان می‌دهد. در همه گونه‌ها انعکاس طیفی برگ نور بیشتر از برگ سایه بوده است. این تفاوت در گونه‌های راش، ممرز و انجیلی معنی‌داری می‌باشد. نتایج آماری به دست آمده از غلظت کلروفیل و نیتروژن اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نیز با این نتایج همخوانی دارد. نتایج نشان داده که حساسیت شاخص‌های مورد مطالعه به دامنه‌های مختلف از تغییرات غلظت کلروفیل و نیتروژن یکسان نمی‌باشد. نتایج به دست آمده از تحلیل رگرسیون PLS نشان داده که با وارد کردن متغیر نیتروژن در مدل، نتایج بهتری در تفکیک گونه‌ها حاصل می‌شود و گونه انجیلی با گونه‌های توسکا و بلوط بیشترین و راش با ممرز کمترین تفکیک طیفی را نشان داده‌اند. نتایج حاصل از مدل PLS نشان داده که نمونه‌های راش در رویشگاه ارتفاعی بالابند از پایین‌بند و میان‌بند بهتر تفکیک شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از شاخص‌های مورد مطالعه و تحلیل رگرسیون PLS، محدوده لبه قرمز نقش زیادی در تفکیک طیفی گونه‌های مورد مطالعه نشان داده است.

**کلمات کلیدی:** طیف‌سنجی زمینی، شاخص طیفی، کلروفیل، نیتروژن، رگرسیون PLS، درختان جنگل‌های خزری.

به نام خدا

پاس پروردگار یکتا که همه بندگان را حق حیات، نعمت سلامتی و اندیشه عنایت فرمود.

عرض پاس ویژه خود را به پیشگاه استادان را به نام محترم، که انقدر و فریخته خود جناب آقایان دکتر درویش صفت و پروفور شپمن تقدیم می دارم.

همچنین از خداوند منان برای تمامی عزیزان که در اجرای این تحقیق مریاری نمودند، آرزوی توفیق روز افزون می نمایم:

از استادان مشاور محترم جناب آقایان دکتر مروی مهابر، دکتر سبحانی و دکتر شیروانی

از استادان که انقدر داور جناب آقایان دکتر نمیرانیان، دکتر اعتماد، دکتر اسلام بنیاد و دکتر ناصری

از تمامی استادان محترم گروه جنگلداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

از کارشناس و کارکنان محترم بخش خیرود، آقایان مهندس فتحی و قومی به بهت نهایت همکاری شان در انجام کارهای میدانی

از تمامی دوستان و استادان محترم گروه بخش از دور دانشگاه و اکسپنشن هلند به دلیل نقطه نظرات ارزنده آن ها در مراحل تحقیق

از کاداداری دانشگاه و اکسپنشن هلند به دلیل مساعدت در انتقال دستگاه طیف سنج به ایران برای انجام نمونه برداری طیفی

در پایان از پدر و مادر مهربان و دلسوزم و همچنین مجموعه عزیز و صمیمی خانواده ام به دلیل شکیبایی و حمایت های بی شائبه شان در تمام مراحل تحصیل

نهایت پاس و قدر دانی خود را تقدیم می دارم.

## فهرست مطالب

| شماره صفحه | عنوان                                |
|------------|--------------------------------------|
|            | فصل اول                              |
| ۱          | ۱- مقدمه و هدف                       |
|            | فصل دوم                              |
| ۵          | ۲- کلیات                             |
| ۶          | ۲-۱- طیف سنجی                        |
| ۱۱         | ۲-۲- کتابخانه‌های طیفی               |
| ۱۲         | ۲-۳- منحنی طیفی گیاهان               |
| ۱۷         | ۲-۳-۱- محدوده لبه قرمز               |
| ۱۹         | ۲-۴- شاخص‌های طیفی                   |
| ۲۲         | ۲-۵- منحنی حذف پیوستار (CR)          |
|            | فصل سوم                              |
| ۲۵         | ۳- پیشینه تحقیق                      |
|            | فصل چهارم                            |
| ۴۴         | ۴- مواد و روش‌ها                     |
| ۴۵         | ۴-۱- مواد                            |
| ۴۵         | ۴-۱-۱- منطقه مورد مطالعه             |
| ۴۵         | ۴-۱-۲- دستگاه طیف سنج زمینی          |
| ۴۷         | ۴-۱-۳- نمونه‌ها و اندازه‌گیری طیفی   |
| ۵۰         | ۴-۱-۴- نرم افزارهای مورد استفاده     |
| ۵۰         | ۴-۲- روش‌ها                          |
| ۵۰         | ۴-۲-۱- شاخص‌های طیفی                 |
| ۵۱         | ۴-۲-۱-۱- شاخص‌های طیفی PRI           |
| ۵۲         | ۴-۲-۱-۲- شاخص طیفی SIPI              |
| ۵۳         | ۴-۲-۱-۳- شاخص طیفی Datt              |
| ۵۳         | ۴-۲-۱-۴- شاخص طیفی ANCB ۶۵۰-۷۲۵      |
| ۵۵         | ۴-۲-۲- اندازه‌گیری کلروفیل و نیتروژن |
| ۵۶         | ۴-۲-۳- پیش پردازش‌ها و حذف خطاها     |
| ۵۷         | ۴-۲-۴- تحلیل‌های آماری               |

|          |       |  |
|----------|-------|--|
| ۵۷       | ..... | ۱-۴-۲-۴- تفاوت طیفی گونه‌ها  |
| ۵۸       | ..... | ۲-۴-۲-۴- رگرسیون   |
| ۵۸       | ..... | رگرسیون خطی ساده   |
| ۵۸       | ..... | رگرسیون حداقل مربعات بخشی (PLS)  |
| فصل پنجم |       |  |
| ۶۱       | ..... | ۵- نتایج   |
| ۶۲       | ..... | ۱-۵- مشخصه طیفی گونه‌ها  |
| ۶۴       | ..... | ۲-۵- میزان کلروفیل و نیتروژن برگ گونه‌ها                                 |
| ۶۴       | ..... | ۲-۲-۵- تفاوت گونه‌ها از نظر میزان کلروفیل و نیتروژن                      |
| ۶۶       | ..... | ۳-۲-۵- رابطه نیتروژن و کلروفیل اندازه‌گیری شده در برگ‌ها                 |
| ۶۷       | ..... | ۴-۲-۵- رابطه شاخص‌های طیفی با کلروفیل و نیتروژن                          |
| ۶۷       | ..... | ۱-۳-۲-۵- رابطه رگرسیون شاخص‌های طیفی PRI با کلروفیل و نیتروژن            |
| ۶۷       | ..... | - شاخص طیفی PRI1   |
| ۶۹       | ..... | - شاخص طیفی PRI2   |
| ۶۹       | ..... | - شاخص طیفی PRI3   |
| ۷۰       | ..... | ۲-۳-۲-۵- رابطه رگرسیون شاخص طیفی SIPI با کلروفیل و نیتروژن               |
| ۷۱       | ..... | ۳-۳-۲-۵- رابطه رگرسیون شاخص طیفی Datt با کلروفیل و نیتروژن               |
| ۷۲       | ..... | ۴-۳-۲-۵- رابطه رگرسیون شاخص طیفی ANCB با کلروفیل و نیتروژن               |
| ۷۵       | ..... | ۳-۵- تفاوت بازتاب طیفی گونه‌ها   |
| ۷۵       | ..... | ۱-۳-۵- تفاوت بازتاب گونه‌ها بر اساس شاخص‌های طیفی                        |
| ۷۵       | ..... | - شاخص طیفی PRI1   |
| ۷۷       | ..... | - شاخص طیفی SIPI   |
| ۷۹       | ..... | - شاخص طیفی Datt   |
| ۸۰       | ..... | - شاخص طیفی ANCB   |
| ۸۱       | ..... | ۲-۳-۵- تفاوت بازتاب طیفی گونه‌ها بر اساس رگرسیون حداقل مربعات بخشی (PLS) |
| ۸۱       | ..... | ۱-۲-۳-۵- تفکیک طیفی گونه‌ها بدون در نظر گرفتن متغیر نیتروژن              |
| ۸۴       | ..... | ۲-۲-۳-۵- تفکیک طیفی گونه‌ها با در نظر گرفتن متغیر نیتروژن                |
| ۸۷       | ..... | ۴-۵- بخش دوم نتایج   |
| ۸۷       | ..... | - بررسی تفکیک طیفی راش در سه رویشگاه ارتفاعی                             |

## فصل ششم

- ۶- بحث، نتیجه گیری و پیشنهادها ..... ۹۰
- ۶-۱- مشخصه طیفی گونه‌ها ..... ۹۱
- ۶-۲- تفکیک طیفی گونه‌ها بر اساس شاخص‌های طیفی ..... ۹۲
- شاخص‌های طیفی PRI ..... ۹۲
- شاخص طیفی SIPI ..... ۹۵
- شاخص طیفی Datt ..... ۹۶
- شاخص طیفی ANCB ..... ۹۷
- ۶-۳- رگرسیون حداقل مربعات بخشی (PLS) ..... ۹۷
- ۶-۴- پیشنهادها ..... ۱۰۰

## فصل هفتم

- منابع مورد استفاده ..... ۱۰۲

### فهرست شکل‌ها

### شماره صفحه

- شکل ۱-۲: طیف‌سنجی زمینی در شرایط آزمایشگاهی، اندازه‌گیری انعکاس طیفی پدیده مورد نظر (برگ) و نتیجه حاصل از اندازه‌گیری به صورت منحنی طیفی ..... ۷
- شکل ۲-۲: طیف‌سنجی تصویری، تصویر برداری توسط سنجنده ابرطیفی ماهواره‌ای و نتیجه حاصل از آن به صورت تعداد زیادی تصویر در باندهایی با محدوده طول موج باریک (الف) و امکان تهیه منحنی بازتاب طیفی پیوسته برای هر یک از پیکسل‌های تصاویر (ب). ..... ۷
- شکل ۲-۳: تصویر تعدادی از دستگاه‌های طیف‌نگار ..... ۱۰
- شکل ۲-۴: مقایسه نمودار انعکاس طیفی حاصل از داده‌های سنجنده‌های چند طیفی (الف)، ناپیوسته و ابر طیفی (ب)، پیوسته ..... ۱۲
- شکل ۲-۵: انرژی رسیده به برگ و انرژی‌های جذب، انعکاس، عبور و پخش درون سلولی در محدوده‌های طول موج‌های آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز در طیف انعکاسی برگ (الف)، منحنی انعکاس طیفی یک گیاه به طور کلی (ب). ..... ۱۳
- شکل ۲-۶: منحنی معمول انعکاس طیفی برگ در محدوده‌های مختلف طیفی و عوامل تأثیر گذار ..... ۱۵
- شکل ۲-۷: مشخصه جذبی کلروفیل a و b و کاروتنوئید ..... ۱۵
- شکل ۲-۸: تغییرات انعکاس طیفی برگ در شرایط تاباندن نور زیاد در طول ۸ ساعت و ۱۸ دقیقه (اندازه‌گیری طیفی پس هر ۵۵ دقیقه) و ایجاد استرس خشکی و تغییر غلظت مواد شیمیایی در گیاه بنجامین (شپمن، ۲۰۰۴). ..... ۱۶
- شکل ۲-۹: موقعیت محدوده لبه قرمز بر روی منحنی طیفی و نقاط جذب طیفی کلروفیل در محدوده مرئی ..... ۱۸
- شکل ۲-۱۰: مراحل تبدیل منحنی طیفی به منحنی CR در محدوده لبه قرمز ..... ۲۴
- شکل ۴-۱: مجموعه دستگاه طیف سنج شامل a: طیف سنج، b: حسگر فیبر نوری، c: pistol grip، d: نوت بوک، f: صفحه سفید مینا، h: مجموعه دستگاه در کیف مخصوص ..... ۴۶
- شکل ۴-۲: توده برگی تهیه شده بر روی پارچه‌ای سیاه رنگ برای اندازه‌گیری طیفی ..... ۴۷

- شکل ۴-۳: اندازه گیری طیفی و تعداد نمونه های حاصل ..... ۴۸
- شکل ۴-۴: نمونه آماده شده برای اندازه گیری طیفی (الف)، صحنه اندازه گیری در محل (ب) ..... ۴۹
- شکل ۴-۵: پراکنش مکانی درختان اندازه گیری شده بر روی تصویر ماهواره های منطقه مورد مطالعه ..... ۴۹
- شکل ۴-۶: خطای پرش منحنی طیفی در طول موج ۱۰۰۰ نانومتر و در محدوده های جذب آب ..... ۵۷
- شکل ۵-۱: سه منحنی انعکاس طیفی مربوط به سه تکرار طیف سنجی از یک پایه درختی ..... ۶۳
- شکل ۵-۲: انحراف معیار انعکاس های طیفی اندازه گیری شده برای تمامی طول موج ها (الف)، منحنی بازتاب طیفی یک نمونه پس از حذف بازتاب های دارای خطا (ب). ..... ۶۳
- شکل ۵-۳: منحنی های نهایی انعکاس طیفی برگ گونه های توسکا، ممرز، راش، انجیلی و بلوط در دو موقعیت برگ نور (منحنی پیوسته) و سایه (منحنی منقطع) به عنوان مشخصه طیفی آنها ..... ۶۴
- شکل ۴-۴: میانگین و انحراف معیار کلروفیل (الف) و نیتروژن (ب) اندازه گیری شده برگ گونه ها (کلروفیل راش و ممرز اندازه گیری نشده است). ..... ۶۵
- شکل ۵-۵: رابطه نیتروژن و کلروفیل برگ در نور و سایه هر یک از گونه ها به طور جداگانه ..... ۶۶
- شکل ۵-۶: میانگین و انحراف معیار مقدار شاخص طیفی SIPI در برگ نور و سایه هر یک از گونه ها ..... ۷۷
- شکل ۵-۷: میانگین و انحراف معیار مقدار شاخص طیفی ANCB در برگ نور و سایه هر یک از گونه ها ..... ۸۰
- شکل ۵-۸: میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده پیش بینی شده تجمعی (CumPRESS) در هر فاکتور و انتخاب بهترین فاکتور بر اساس حداقل PRESS بر اساس لحاظ کردن تنها نمونه های طیفی (با فلش مشخص شده است). ..... ۸۲
- شکل ۵-۹: نتایج مدل PLS در برآورد طبقه مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ های نور (راست) و سایه (چپ) آنها به طور جداگانه و طبقه بندی گونه ها بر اساس در نظر گرفتن تنها نمونه های طیفی بدون دخالت نیتروژن (محورهای X و Y به ترتیب طبقه های تعیین شده و برآورد شده توسط مدل برای هر گونه که به نام همان گونه نشان داده شده است). ..... ۸۳
- شکل ۵-۱۰: نمودار ضرایب همبستگی حاصل از مدل PLS در طول موج های مختلف در رابطه با تفکیک گونه ها بر اساس در نظر گرفتن تنها نمونه های طیفی بدون دخالت نیتروژن (محدوده طیفی ۳۵۰ تا ۱۳۵۰ نانومتر به علت وجود کمترین خطا در نظر گرفته شده است). ..... ۸۳
- شکل ۵-۱۱: میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده پیش بینی شده تجمعی (CumPRESS) در هر فاکتور و انتخاب بهترین فاکتور بر اساس حداقل PRESS با لحاظ کردن متغیر نیتروژن (با فلش مشخص شده است). ..... ۸۵
- شکل ۵-۱۲: نتایج مدل PLS در برآورد نیتروژن مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ های نور (راست) و سایه (چپ) آنها به طور جداگانه و طبقه بندی گونه ها بر اساس تفاوت غلظت نیتروژن آنها (دایره: نیتروژن اندازه گیری شده، ستاره: نیتروژن برآورد شده، محور X گونه ها و محور Y میزان نیتروژن برآورد شده برای هر گونه توسط مدل را نشان می دهد). ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۳: نمودار ضرایب همبستگی حاصل از مدل PLS در طول موج های مختلف در رابطه با تفکیک گونه ها بر اساس تفاوت طیفی آنها بر اساس تفاوت غلظت نیتروژن ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۴: میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده پیش بینی شده تجمعی (CumPRESS) در هر فاکتور و انتخاب بهترین فاکتور بر اساس حداقل PRESS ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۵: نتایج مدل PLS در برآورد طبقه مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ های نور (راست) و ..... ۸۸

سایه (چپ) آنها به طور جداگانه و طبقه بندی گونه‌ها بر اساس تفاوت طیفی آنها بدون دخالت نیتروژن (محور X: طبقه‌های وارد شده، محور Y: طبقه‌های برآورد شده توسط مدل رگرسیون PLS، طبقه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب رویشگاه‌های پایین‌بند، میان‌بند و بالا‌بند).

شکل ۵-۱۶: نمودار ضرایب همبستگی حاصل از مدل PLS در طول موج‌های مختلف در مورد با تفکیک درختان راش در سه رویشگاهی بالا‌بند، میان‌بند و پایین‌بند (به ترتیب طبقه‌های ۱، ۲ و ۳) بر اساس تفاوت طیفی آنها ..... ۸۹

## شماره صفحه

## فهرست جدول‌ها

|    |   |
|----|---|
| ۹  | جدول ۱-۲: فهرست اسامی و مشخصات تعدادی از دستگاه‌های طیف سنج   |
| ۲۰ | جدول ۲-۲: تعدادی از شاخص‌های طیفی مورد استفاده در طیف سنجی حساس به عوامل مختلف در سطح برگ و تاج گیاه                                      |
| ۵۰ | جدول ۱-۴: تعداد و مشخصات کمی نمونه‌های اندازه‌گیری شده  |
| ۵۴ | جدول ۲-۴: شاخص‌های طیفی حساس به غلظت کلروفیل مورد استفاده در این تحقیق  |
| ۶۵ | جدول ۱-۵: مقایسه میانگین غلظت کلروفیل و نیتروژن ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) بین برگ‌های نور و سایه هر یک از گونه‌ها بر اساس نتایج آزمون t |
| ۶۶ | جدول ۲-۵: جدول تجزیه واریانس تفاوت غلظت کلروفیل و نیتروژن برگ گونه‌ها با یکدیگر در دو موقعیت نور و سایه                                   |
| ۶۸ | جدول ۳-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRI1 حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با کلروفیل   |
| ۶۸ | جدول ۴-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRI1 حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با نیتروژن   |
| ۷۰ | جدول ۵-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی SIPI حاصل از برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه با کلروفیل و نیتروژن                  |
| ۷۲ | جدول ۶-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی Datt حاصل از برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه با کلروفیل و نیتروژن                  |
| ۷۳ | جدول ۷-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی ANCB حاصل از برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه با کلروفیل و نیتروژن                  |
| ۷۴ | جدول ۸-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی ANCB از برگ نور و سایه گونه‌های توسکا، انجیلی و بلوط با کلروفیل                            |
| ۷۴ | جدول ۹-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی ANCB حاصل از برگ نور و سایه گونه‌های مورد مطالعه با نیتروژن                                |
| ۷۶ | جدول ۱۰-۵: نتایج حاصل از آزمون t برای مقایسه برگ‌های نور و سایه هر گونه توسط شاخص‌های طیفی PRI  |
| ۷۶ | جدول ۱۱-۵: جدول تجزیه واریانس مقایسه میانگین شاخص طیفی PRI1 تمامی گونه‌های مورد مطالعه در دو شرایط برگ نور و سایه                         |
| ۷۷ | جدول ۱۲-۵: سطح معنی داری حاصل از مقایسه میانگین شاخص طیفی PRI1 بین گونه‌های مختلف در دو شرایط برگ   |

نور و سایه بر اساس آزمون توکی ( $\alpha=0/05$ )

- جدول ۵-۱۳: جدول تجزیه واریانس مقایسه میانگین شاخص طیفی SIPI بین گونه‌های مختلف در دو شرایط برگ نور و سایه ..... ۷۸
- جدول ۵-۱۴: سطح معنی داری حاصل از مقایسه میانگین شاخص طیفی SIPI تمامی گونه‌های مورد مطالعه در دو شرایط برگ نور و سایه بر اساس آزمون توکی ( $\alpha=0/05$ ) ..... ۷۸
- جدول ۵-۱۵: جدول تجزیه واریانس مقایسه میانگین شاخص طیفی Datt تمامی گونه‌های مورد مطالعه در دو شرایط برگ نور و سایه ..... ۷۹
- جدول ۵-۱۶: سطح معنی داری حاصل از مقایسه میانگین شاخص طیفی Datt بین گونه‌های مختلف در دو شرایط برگ نور و سایه بر اساس آزمون توکی ( $\alpha=0/05$ ) ..... ۷۹
- جدول ۵-۱۷: جدول تجزیه واریانس مقایسه میانگین شاخص طیفی ANCB تمامی گونه‌های مورد مطالعه در دو شرایط برگ نور و سایه ..... ۸۱
- جدول ۵-۱۸: سطح معنی داری حاصل از مقایسه میانگین شاخص طیفی ANCB بین گونه‌های مختلف در دو شرایط برگ نور و سایه بر اساس آزمون توکی ( $\alpha=0/05$ ) ..... ۸۱
- جدول ۵-۱۹: نتایج مدل PLS برای برآورد طبقه مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ‌های نور و سایه آنها به طور جداگانه و تعیین بهترین طول موج‌ها در تفکیک گونه‌ها در محدوده ۱۳۲۰-۳۵۰ نانومتر، I: ضریب همبستگی مدل اعتبارسنجی شده بین کدهای برآورد شده و تعیین شده ..... ۸۴
- جدول ۵-۲۰: نتایج مدل PLS برای برآورد نیتروژن مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ‌های نور و سایه آنها به طور جداگانه و طبقه بندی گونه‌ها بر اساس تفاوت غلظت نیتروژن آنها و تعیین بهترین طول موج‌ها در تفکیک گونه‌ها در محدوده ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر، I: ضریب همبستگی مدل اعتبارسنجی شده بین نیتروژن برآورد شده و اندازه گیری شده ..... ۸۷
- جدول ۵-۲۱: نتایج مدل PLS برای برآورد طبقه هر رویشگاه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ‌های نور و سایه آنها به طور جداگانه و تعیین بهترین طول موج‌ها در تفکیک گونه‌ها در محدوده ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر، I: ضریب همبستگی مدل اعتبارسنجی شده بین طبقه وارد شده و برآورد شده توسط مدل ..... ۸۹

# فصل اول

## مقدمه و هدف

### مقدمه و هدف

اهمیت جنگل‌های خزری به عنوان رویشگاه باقی مانده از دوران سوم زمین‌شناسی و جنگل‌های با ارزش سبز تابستانه در نیمکره شمالی و جایگاه آن‌ها به عنوان میراث طبیعی جهانی به وضوح آشکار است. تهیه اطلاعات مکانی دقیق از جمله نقشه تیپ جنگل و پراکنش مکانی گونه‌ها و توده‌های مختلف، لازمه مدیریت پایدار این جنگل‌ها به خصوص در روش‌های جنگلداری نزدیک به طبیعت می‌باشد. با توجه به زمان‌بر و هزینه‌بر بودن روش‌های میدانی تهیه این چنین اطلاعاتی، تحقیقات زیادی به منظور تهیه نقشه تیپ جنگل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای چند طیفی، انجام شده است (درویش صفت و همکاران، ۲۰۰۳؛ لطیفی و اولادی، ۲۰۰۶؛ شتایی و همکاران، ۱۳۸۶). تنوع گونه‌ای زیاد و ساختار ناهمگون و پیچیده این جنگل‌ها، ضرورت استفاده از داده‌هایی با توان تفکیک طیفی و مکانی زیاد برای دستیابی به نقشه تیپ و اطلاعات دقیق‌تر را توجیه می‌کند.

امروزه نسل جدید سنجنده‌ها در شاخه‌ای از سنجش از دور تحت عنوان طیف سنجی تصویری<sup>۱</sup>، با ایجاد تصاویر ابرطیفی (با حدود ۲۵۲-۱۰۰ باند تصویر) تهیه داده‌هایی با توان طیفی زیاد و در حد ۱۰ نانومتر را فراهم نموده است. با افزایش تعداد باندهای طیفی امکان مطالعه پدیده‌ها در محدوده وسیعی از طول موج طیفی از مرئی تا مادون قرمز دور فراهم شده است. به این ترتیب ضرورت تعیین طول موج‌هایی که گونه‌های مورد نظر در آن‌ها دارای بازتابی متفاوت و تفکیک پذیری مناسب هستند، مشهود می‌باشد. این امر می‌تواند توسط طیف سنجی زمینی محقق گردد. در طیف سنجی زمینی با افزایش قدرت تفکیک طیفی به حدود ۱۰-۱ نانومتر امکان مطالعه پدیده‌ها با جزئیات بسیار دقیق تا حد ایجاد اثر انگشت طیفی (منحنی دقیق بازتاب طیفی پدیده) فراهم شده است. طیف سنجی زمینی به منظور تهیه کتابخانه طیفی از پدیده‌های مورد نظر و نهایی<sup>۲</sup>، در بسیاری از روش‌های طبقه‌بندی و تحلیل داده‌های سنجنده‌های هوایی و فضایی به ویژه از انواع ابر طیفی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ چنان‌چه مبحث گسترده و جدیدی را در علم سنجش از دور مطرح کرده است.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در خصوص تعیین مشخصه‌های طیفی پدیده‌های مختلف از جمله گونه‌های درختی انجام شده است (گاسمن و آلن<sup>۳</sup>، ۱۹۷۳؛ نوبولر<sup>۴</sup> و همکاران، ۱۹۹۷؛ شپمن و دنگل<sup>۵</sup>، ۲۰۰۰؛ رویو<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۳؛ مالنویسکی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۵). مشخصه‌های طیفی گیاهان در طول موج‌های مختلف تحت

<sup>1</sup> Imaging spectroscopy

<sup>2</sup> Endmember

<sup>3</sup> Gausman & Allen

<sup>4</sup> Kneubühler

<sup>5</sup> Schaepman & Dangel

<sup>6</sup> Royo

<sup>7</sup> Malenovsky

تأثیر ساختار درون سلولی و برون سلولی برگ، غلظت مواد بیوشیمیایی از جمله کلروفیل، کاروتنوئید، نیتروژن و میزان آب موجود در برگ است (اسنر<sup>۱</sup>، ۱۹۹۸؛ جاکمود و آستین<sup>۲</sup>، ۲۰۰۰؛ استیمسون<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۵؛ شپمن و همکاران، ۲۰۰۵). هر یک از عوامل یاد شده دارای تأثیر ویژه‌ای بر بازتاب در بعضی طول موج‌های خاص می‌باشند. به عنوان مثال موقعیت لبه قرمز<sup>۴</sup> که در اطراف طول موج ۷۰۰ nm قرار دارد، نسبت به تغییرات کلروفیل بسیار حساس است (فیللا و پنوالاس<sup>۵</sup>، ۱۹۹۴؛ چو و اسکیدمور<sup>۶</sup>، ۲۰۰۶).

پویایی و تغییرات فنولوژیک پوشش گیاهی موجب افزایش تعداد عوامل تأثیرگذار بر منحنی انعکاس طیفی و پیچیدگی مطالعات مربوطه شده است. به علاوه میزان انرژی تابشی، موقعیت درخت در رویشگاه و همچنین وضعیت برگ در تاج درخت نیز از عوامل مؤثر در چگونگی بازتاب بوده و باید در مطالعات طیف سنجی مد نظر قرار گیرند. نتایج مطالعات زیادی نشان داده که برگ‌های نور و سایه از نظر ساختار اپیدرم و همچنین غلظت و ترکیب مواد بیوشیمیایی آن می‌تواند متفاوت باشد. آگاهی از این تفاوت‌ها به خصوص در گونه‌هایی که ساختار تاج آن‌ها به نحوی است که میزان نور دریافتی برگ در نقاط مختلف تاج متفاوت می‌باشد، از اهمیت زیادی برخوردار است. شرایط رویشگاهی به ویژه ارتفاع از سطح دریا و نقش آن در وضعیت متغیرهای یاد شده و همچنین تأثیر میزان شدت نور تابشی به برگ، از جمله دیگر عوامل محیطی مؤثر بر بازتاب است. گونه‌هایی که در دامنه ارتفاعی وسیعی گسترش پیدا می‌کنند با تغییرات مرفولوژیکی بیشتری مواجه هستند (ریچاردسون<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۴؛ آستین و همکاران، ۲۰۰۶). از این رو بررسی مشخصه طیفی گونه‌هایی نظیر راش با دامنه رویشگاهی وسیع، مطرح می‌گردد.

همچنین منحنی انعکاس طیفی می‌تواند تحت تأثیر عوامل مزاحم محیطی و غیر محیطی از جمله نور پخش ناشی از پدیده‌های مجاور نیز باشد. ضرورت دارد که با پردازش‌های مناسب مانند شاخص‌های طیفی، نسبت‌گیری‌های طیفی و تبدیل‌های آماری و ریاضی نسبت به حذف و یا کاهش اثرات منفی این عوامل اقدام نمود. ضمناً این چنین پردازش‌ها می‌توانند باعث بارزسازی و تشدید اختلاف بازتاب پدیده‌ها شده و نتایج حاصل از آن‌ها حساسیت بیشتری را به ویژگی‌های برگ و متغیرهای مورد نظر نشان دهد. مطالعات زیادی در خصوص تعریف و تعیین شاخص‌های طیفی مناسب و مرتبط با ترکیبات بیوشیمیایی گیاه در سطح برگ و تاج به منظور بررسی تفاوت طیفی

<sup>1</sup> Asner

<sup>2</sup> Jacquemoud & Ustin

<sup>3</sup> Stimson

<sup>4</sup> Red edge position

<sup>5</sup> Filella & Peñuelas

<sup>6</sup> Cho & Skidmore

<sup>7</sup> Richardson

گونه‌های درختی انجام شده است ( بلک برن<sup>۱</sup>، ۱۹۹۸b؛ لاولوک و روبینسون<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲؛ لمایره<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۴؛ کلورز<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۵؛ مالنووسکی و همکاران، ۲۰۰۶؛ آستین و همکاران، ۲۰۰۶). هر چند که بسیاری از شاخص‌های طیفی تعریف شده ارتباط بسیار خوبی را با مشخصه‌های گیاهی نشان داده است، اما تحقیقات نتایج متفاوتی را برای گونه‌های مختلف نشان می‌دهند. بنابراین قبل از کاربرد این شاخص‌های طیفی ضروری است که میزان حساسیت آن‌ها به مشخصه‌های مورد نظر از طریق تحلیل‌های رگرسیونی بررسی گردد. ماهیت داده‌های طیفی حاصل از طیف سنجی زمینی به گونه‌ای است که مستلزم به کارگیری روش‌های خاص برای بررسی تفاوت طیفی پدیده‌ها می‌باشد.

یکی از کاراترین روش‌ها در این زمینه، رگرسیون چند متغیره حداقل مربعات بخشی می‌باشد که نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به روش‌های آماری دیگر ارائه داده است. ضمناً با استفاده از این روش می‌توان طول موج‌های مهم و مرتبط با متغیرهای مورد نظر را از بین ۷۰۰ طول موج اندازه‌گیری شده هر منحنی طیفی تعیین نمود.

هدف‌های این تحقیق عبارتند از:

- هدف‌های اصلی:

۱- تهیه مشخصه طیفی برگ مهم‌ترین گونه‌های جنگلی شمال ایران شامل راش (*Fagus orientalis*)، ممرز (*Carpinus betulus*)، توسکا (*Alnus subcordata*)، بلوط (*Quercus castaneifolia*) و انجیلی (*Parrotia persica*) و بررسی تفاوت آن‌ها

۲- تهیه مشخصه طیفی برگ گونه راش در سه رویشگاه ارتفاعی پایین بند، میان‌بند و بالابند و بررسی تفکیک‌پذیری طیفی آن‌ها

- هدف‌های فرعی:

- ۱- بررسی تفاوت طیفی برگ‌های نور و سایه هر یک از گونه‌ها و همچنین بین گونه‌ها
- ۲- بررسی میزان حساسیت شاخص‌های طیفی به غلظت کلروفیل و نیتروژن برگ گونه‌ها
- ۳- تعیین بهترین طول موج‌های مؤثر در تفکیک طیفی گونه‌ها و گونه راش در سه رویشگاه ارتفاعی مورد مطالعه

<sup>1</sup> Blackburn

<sup>2</sup> Lovelock & Robinson

<sup>3</sup> le Maire

<sup>4</sup> Clevers

فصل دوم

کلیات

## ۲-۱- طیف سنجی<sup>۱</sup>

طیف سنجی یا طیف نگاری در مفهوم عام آن عبارت است از تهیه منحنی بازتاب پدیده یا پدیده‌های مورد نظر در محدوده طول موج‌های مشخص (شنايدر و يانگ<sup>۲</sup>، ۱۹۹۸). طیف سنجی می‌تواند به دو صورت زمینی<sup>۳</sup> و تصویری<sup>۴</sup> صورت گیرد. در طیف سنجی زمینی به کمک یک دستگاه قابل حمل و متصل به رایانه نوت بوک و از ارتفاعی کمتر از دو متر، بازتاب پدیده مورد نظر دریافت، اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. این اندازه‌گیری در تعداد زیاد و در یک دامنه وسیع از طول موج (بیش از ۷۰۰ طول موج) صورت می‌گیرد. حاصل اندازه‌گیری طیفی مقادیر اندازه‌گیری شده بازتاب در هر طول موج است که به صورت منحنی بازتاب طیفی نمایان و ثبت می‌شود (شکل ۲-۱). در طیف سنجی تصویری یک سنجنده چند طیفی ولی با تعداد باندهای بسیار زیاد (بیش از ۷۰ باند) با استفاده از یک سکو (مانند هواپیما) از منطقه تصویربرداری می‌نماید. از این رو در طیف سنجی تصویری بازتاب ثبت شده در هر باند به صورت تصویر نمایش داده می‌شود. این چنین سنجنده‌ها (هوایی و فضایی) ابرطیفی<sup>۵</sup> نامیده می‌شوند. با توجه به تعداد زیاد باندها در طیف سنجی تصویری، بر اساس بازتاب‌های ثبت شده برای هر پیکسل می‌توان یک منحنی بازتاب طیفی پیوسته رسم نمود. (شکل ۲-۲).

در هر دو حالت انرژی الکترومغناطیسی گسیل شده از یک منبع نور پس از برخورد به پدیده، سهمی از آن منعکس، قسمتی جذب و بخشی دیگر عبور داده می‌شود. بنابراین طیف سنجی یک نوع اندازه‌گیری کمی انعکاس، جذب و یا عبور است. اسپکترومترها برای این اندازه‌گیری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر حسب این که اندازه‌گیری در طبیعت و یا در شرایط آزمایشگاهی است منبع نور می‌تواند به ترتیب نور خورشید و یا نور لامپ باشد. میزان انرژی جذب، منعکس و عبور داده شده از جسم بستگی به ماهیت و خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن دارد. اجسام جامد سهم بیشتری از انرژی را جذب و یا منعکس می‌کنند در حالیکه در مورد پدیده‌هایی که در ساختار سلولی خود فضای خالی دارند مانند فضای بین سلولی برگ گیاهان، سهم عبور نور بیشتر بوده و بخشی دیگر از آن پس از پخش در فضای بین سلولی مجدداً منعکس و یا به شکل نور عبوری از پدیده خارج می‌شود.

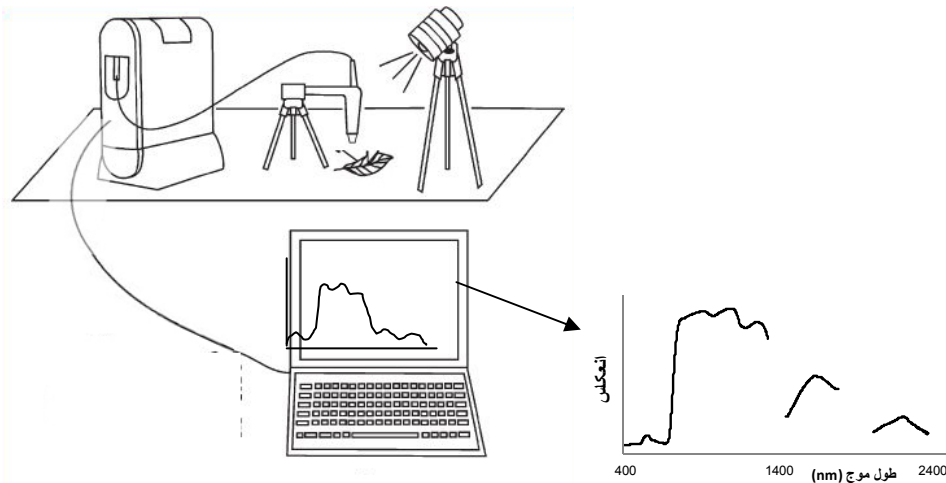
<sup>1</sup> Spectroscopy

<sup>2</sup> Schneider & Young

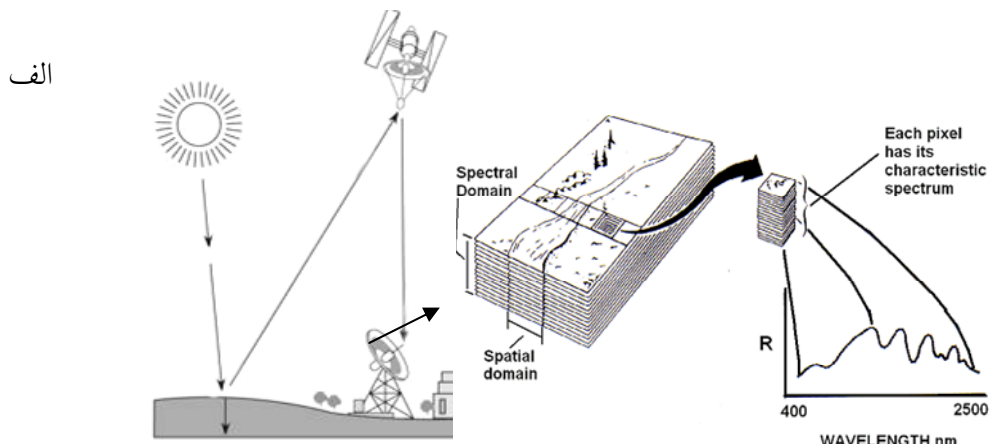
<sup>3</sup> Field spectroscopy

<sup>4</sup> Imaging spectroscopy

<sup>5</sup> Hyperspectral



شکل ۱-۲: طیف‌سنجی زمینی در شرایط آزمایشگاهی، اندازه‌گیری انعکاس طیفی پدیده مورد نظر (برگ) و نتیجه حاصل از اندازه‌گیری به صورت منحنی طیفی



شکل ۲-۲: طیف‌سنجی تصویری، تصویر برداری توسط سنجنده ابرطیفی ماهواره‌ای و نتیجه حاصل از آن به صورت تعداد زیادی تصویر در باندهایی با محدوده طول موج باریک (الف) و امکان تهیه منحنی بازتاب طیفی پیوسته برای هر یک از پیکسل‌های تصاویر (ب).

طیف‌سنجی زمینی می‌تواند در تجزیه و تحلیل دقیق تصاویر ماهواره‌ای و تفسیر آن‌ها کمک زیادی کند. همچنین نقش مهمی در فعالیتهایی همچون کالیبراسیون سنجنده‌های هوایی و ماهواره‌ای، توسعه روش‌های استخراج اطلاعات از داده‌های سنجنش از دوری و تهیه نقشه‌های موضوعی دارد (هونی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). علاوه بر این می‌تواند به عنوان ابزاری برای تشخیص و تفکیک پدیده‌ها و تعیین مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها و همچنین تشریح بعضی فرایندها (مانند فتوسنتز، مراحل رویش تا خزان برگ، ...) با استفاده از سنجنش از دور، مورد استفاده

<sup>۱</sup> Huni

قرار گیرد ( گونگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۷؛ کلارک<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۵). انجام بررسی های طیف سنجی از پدیده ها در محیط طبیعی یا در شرایط آزمایشگاهی سوال های زیر را مطرح ساخته است:

- ۱- چه میزان قدرت تفکیک طیفی برای تفکیک و بررسی پدیده ها مورد نیاز است؟
- ۲- چه زمانی برای بررسی پدیده ها (در چه موقع سال، روز) بهتر است؟
- ۳- حداکثر نسبت خطا به سیگنال<sup>۳</sup> مورد قبول چه میزان باشد؟

اندازه گیری طیفی صحیح نیاز به آگاهی از عوامل موثر همچون منابع مختلف نور، شرایط جوی و پایداری آن از جمله رطوبت محیط، درجه حرارت، باد، زاویه دید، زاویه نور رسیده به پدیده و منعکس شده از آن، مدت اسکن کردن دستگاه و همچنین خصوصیات پدیده مورد نظر از لحاظ متغیرهایی مانند دما، وضعیت مکانی و ساختار فیزیکی و شیمیایی آن دارد. بنابراین قدم اول در توسعه طرح طیف سنجی دقیق زمینی تعریف طرح عملیاتی کلی با در نظر گرفتن موارد مطرح شده می باشد. طرح عملیاتی برای طیف نگاری در شرایط آزمایشگاهی و استفاده از نور مصنوعی لامپ تعریف خاص خود را داشته و در این حالت به علت حذف اثر شرایط محیطی، طرح می تواند ساده تر باشد. در حالیکه در شرایط محیطی ملاحظه شدت نور مناسب در اندازه گیری و شرایط متغیرهای آب و هوایی که دقت کالیبراسیون دستگاه را تحت تأثیر قرار می دهند، خود به پیچیدگی طرح اندازه گیری طیفی می افزاید. علاوه بر این مهم ترین مسئله در نظر گرفتن پدیده مورد نظر می باشد. چنانچه به عنوان مثال پویایی پدیده هایی مانند پوشش گیاهی در محیط طبیعی، به دلیل غیر قابل کنترل بودن عوامل تأثیر گذار، می تواند طرح را با چالش های بیشتری مواجه کند. در نهایت طرح عملیاتی می تواند با در نظر گرفتن خصوصیات ابزار مورد استفاده متفاوت باشد. ویژگی های دستگاه مانند نسبت خطا به سیگنال، کالیبراسیون رادیومتری، قدرت تفکیک طیفی، سرعت اسکن، زاویه دید، همگی محدودیت هایی بر روی نوع اندازه گیری طیفی زمینی ایجاد می کند. به عنوان مثال سرعت کم اسکن کردن طیف نگار گاهی باعث افزایش اثر سایه در طیف نگاری پوشش گیاهی می شود.

ابزارهای طیف سنجی تحت عنوان کلی اسپکترومترها بسته به نحوه ثبت مشخصه طیفی و طول موج های طیفی شامل اسپکتروفتومترها و اسپکترورادیومترها می باشند.

اسپکتروفتومتر تشکیل شده از یک منبع نور و یک منشور که نور را به طول موج های متفاوت تجزیه می کند. بخشی از نور رسیده به پدیده پس از برخورد به آن جذب می شود. میزان نور جذب شده در طول موج و یا در محدوده ای خاص که در دستگاه تنظیم شده، توسط یک ثابت ثبت می شود. معمولاً ثبات قبلاً توسط یک نمونه

<sup>1</sup> Gong

<sup>2</sup> Clark

<sup>3</sup> Noise to signal

استاندارد کالیبره می‌شود. حاصل این اندازه‌گیری طیفی، یک عدد برای طول موج تنظیم شده و یا منحنی طیفی پیوسته‌ای در محدوده ماوراء بنفش و یا مرئی از نمونه مورد نظر می‌باشد (دکوتیو<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۶). اسپکتروراديو مترها نوع پیشرفته‌تری از طیف سنج‌ها نسبت به اسپکتروفتومترها هستند که با داشتن ثبات‌های مختلف میزان انعکاس، عبور و نور جذب شده را در محدوده‌های طیفی وسیع‌تری (مرئی و مادون قرمز) بسته به نوع دستگاه و به صورت منحنی طیفی پیوسته ثبت می‌کنند (دکوتیو و همکاران، ۱۹۹۶). انواع مختلف اسپکتروراديو مترها در شکل ۲-۳ و مشخصات کلی آن‌ها در جدول ۱-۲ آمده است.

جدول ۱-۲: فهرست اسامی و مشخصات تعدادی از دستگاه‌های طیف سنج

| وزن (کیلوگرم) | زمان اسکن<br>(طیف در ۱۰ ثانیه) | تعداد<br>ثبات | قدرت<br>تفکیک<br>طیفی (نانومتر) | محدوده<br>طیفی (نانومتر) | نوع دستگاه                   |
|---------------|--------------------------------|---------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| ۵/۲           | ۱                              | ۳             | ۳-۱۰                            | ۳۵۰-۲۵۰۰                 | FieldSpec® 3 FR              |
| ۵/۲           | ۱                              | ۳             | ۳-۳۰                            | ۳۵۰-۲۵۰۰                 | FieldSpec® 3 JR              |
| ۵/۲           | ۱                              | ۱             | ۳                               | ۳۵۰-۱۰۵۰                 | FieldSpec®3VNIR              |
| ۵/۲           | ۱                              | ۳             | ۳-۸/۵                           | ۳۵۰-۲۵۰۰                 | FieldSpec®3Hi-Res            |
| ۱/۲۳          | ۷                              | ۱             | ۳/۵                             | ۳۲۵-۱۰۷۵                 | FieldSpec®Handheld           |
| ۱/۲۳          | ۳۷                             | ۱             | ۳/۵                             | ۳۲۵-۱۰۷۵                 | FieldSpec®Handheld<br>Pro    |
| ۸/۶           | ۱                              | ۳             | ۳-۱۰                            | ۳۵۰-۲۵۰۰                 | LabSpec®5000<br>350-2500 nm  |
| ۸/۱           | ۱                              | ۲             | ۱۰                              | ۱۰۰۰-۲۵۰۰                | LabSpec®5000<br>1000-2500 nm |
| ۸/۱           | ۱                              | ۱             | ۱۰                              | ۱۰۰۰-۱۸۰۰                | LabSpec®5000<br>1000-1800 nm |

<sup>1</sup> Decoteau



Field Spec 3, Full Range



FieldSpec@Handheld 325-1075



LabSpec@5000

شکل ۲-۳: تصویر تعدادی از دستگاه‌های طیف‌نگار

## ۲-۲- کتابخانه‌های طیفی:

پایه و اساس سنجش از دور به عنوان علم و فن کسب اطلاعات مفید از محیط، آگاهی از چگونگی انعکاس طیفی پدیده‌ها می‌باشد. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، سنجنده‌های ابرطیفی امکان تهیه داده‌هایی با توان تفکیک طیفی زیاد در حد ۱۰ نانومتر در تعداد باندهای بسیار زیاد تا ۲۲۴ باند را فراهم نموده‌اند. از ویژگی‌های بارز داده‌های ابرطیفی، امکان تهیه یک منحنی طیفی پیوسته در یک دامنه طول موج گسترده می‌باشد. لازمه تجزیه و تحلیل هر چه دقیق‌تر این نوع داده‌ها، در اختیار داشتن منحنی دقیق انعکاس طیفی پدیده‌های مورد نظر (عضو نهایی طبقه بندی<sup>۱</sup>) می‌باشد (پرایس<sup>۲</sup>، ۱۹۹۴؛ اسمیت و اسکیدمور<sup>۳</sup>، ۲۰۰۳؛ فنگ<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۵). این چنین منحنی‌ها را می‌توان با انجام طیف سنجی زمینی در محدوده وسیعی از طول موج‌ها از مرئی تا مادون قرمز دور و با قدرت تفکیک طیفی زیاد تهیه نمود. با مقایسه منحنی طیفی داده‌های سنجش از دوری چند طیفی و ابرطیفی می‌توان نشان داد که دقت اطلاعات طیفی به دست آمده از داده‌های طیف سنجی زمینی شباهت بیشتری به داده‌های سنجنده‌های ابرطیفی در مقایسه با داده‌های چند طیفی دارد و می‌تواند کمک شایانی در تجزیه و تحلیل تصاویر ابرطیفی بنماید (شکل ۲-۴). پس از انجام اندازه‌گیری‌های طیف سنجی و پردازش‌های لازم، در صورت ذخیره آن‌ها به گونه‌ای خاص در نرم افزارهای پردازش داده‌های ابرطیفی، کتابخانه‌های طیفی ایجاد می‌شود. کتابخانه‌های طیفی مبنای خوبی را برای برخی از فرایندها و تحلیل‌ها در سنجش از دور از قبیل تفکیک طیفی پدیده‌ها بر اساس طیف عضوهای نهایی طبقه‌بندی و همچنین تصحیحات اتمسفری فراهم می‌آورند (بوجینسکی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۳؛ هونی و همکاران، ۲۰۰۷).

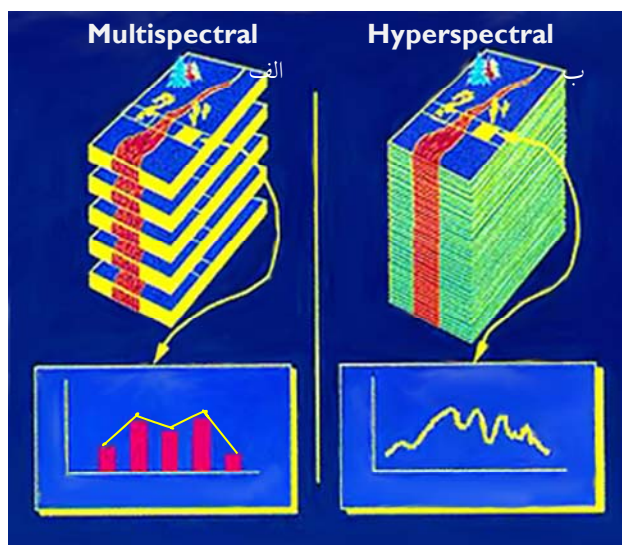
<sup>1</sup> Endmember

<sup>2</sup> Price

<sup>3</sup> Schmitd & Skidmore

<sup>4</sup> Fang

<sup>5</sup> Bojinski



شکل ۲-۴: مقایسه نمودار انعکاس طیفی حاصل از داده‌های سنجنده‌های الف: چند طیفی، ناپیوسته وب: ابر طیفی، پیوسته

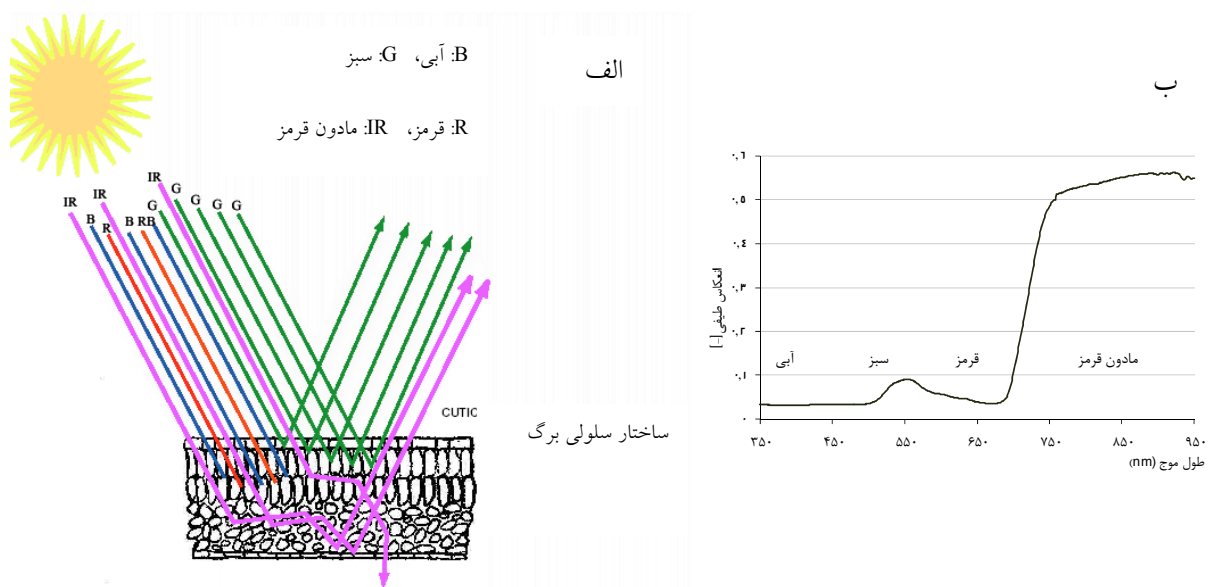
در حال حاضر کتابخانه‌های طیفی در بعضی پایگاه‌های داده‌ای مانند USGS، Thermo، Speclab، Chemlin، Jrtfweb و ... (نشانی سایت‌ها در فهرست منابع آمده است). که شامل منحنی‌های طیفی دقیق از پدیده‌های گوناگون می‌باشند، ذخیره شده‌اند. این کتابخانه‌های طیفی، بیشتر شامل منحنی‌های طیفی مواد معدنی و کانی‌ها می‌باشند که عموماً برای هر پدیده یک منحنی طیفی در شرایط خاص ارائه می‌دهند. چنانچه رفتار طیفی پدیده‌هایی مانند پوشش گیاهی با تغییر شرایط محیطی و رویشگاهی تغییر کند، در این صورت وجود متادیتا<sup>۱</sup> که بتواند شرایط و وضعیت داده‌های اندازه‌گیری شده را بیان کند لازم و ضروری است. علاوه بر این، اطلاعات آماری مانند میانگین و انحراف معیار از منحنی‌های طیفی، لازمی قابل اطمینان بودن داده‌ها می‌باشد. چنانچه متادیتا و اطلاعات آماری کاملی در خصوص طرح اندازه‌گیری طیفی و همچنین شرایط آب و هوایی، زمان، مکان و ابزار مورد استفاده ضمیمه گردد، چه بسا که بتوان از کتابخانه‌های طیفی در پژوهش‌های بین‌المللی نیز استفاده کرد (هونی و همکاران، ۲۰۰۷).

### ۲-۳- منحنی طیفی گیاهان:

خصوصیات طیفی گیاهان در طول موج‌های مختلف تحت تأثیر ساختار درون و برون سلولی برگ، همچنین وجود، غلظت و ترکیب مواد بیوشیمیایی از جمله کلروفیل، نیتروژن و میزان آب موجود در گیاه و عوامل

<sup>۱</sup> Metadata

مرفولوژیک می‌باشد. وضعیت بسیاری از این عوامل نیز به مراحل مختلف در طول دوره رویش برگ بستگی دارد (دمارز<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۹؛ کلارک و همکاران، ۲۰۰۵). پژوهش‌های انجام شده نشان داده که هر یک از عوامل یاد شده در یک یا چند طول موج خاص دارای اثر بارزتری می‌باشد. میزان هر یک از انرژی‌های جذب، انعکاس، عبور و پخش درون سلولی نیز در محدوده‌های طول موج‌های خاصی در طیف انعکاسی برگ بیشتر نمایان می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۵ دیده می‌شود سهم نور پخش شده در فضای بین سلول‌های برگ در منحنی انعکاس طیفی گیاه، در محدوده مادون قرمز نزدیک بیشتر است.



شکل ۲-۵: انرژی رسیده به برگ و انرژی‌های جذب، انعکاس، عبور و پخش درون سلولی در محدوده‌های طول موج‌های آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز در طیف انعکاسی برگ (الف)، منحنی انعکاس طیفی یک گیاه به طور کلی (ب).

به طور کلی مشخصه طیفی برگ همه گیاهان در سه محدوده مشخص و بارز طول موج بررسی می‌گردد: (۱) محدوده طول موج مرئی از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر، (۲) محدوده مادون قرمز نزدیک از ۷۰۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر و (۳) محدوده مادون قرمز میانی و دور از ۱۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر (شکل ۲-۶). در محدوده مرئی، منحنی انعکاس طیفی برگ تحت تأثیر جذب طیفی رنگدانه‌هایی از قبیل کلروفیل و کاروتنوئید می‌باشد. تمامی رنگدانه‌ها حداکثر جذب طیفی را در محدوده ۳۰۰-۵۰۰ نانومتر نشان می‌دهند و تنها جذب کلروفیل علاوه بر طول موج سبز در محدوده قرمز نیز می‌باشد. حداکثر جذب مربوط به کلروفیل a در محدوده ۴۳۰-۶۶۰ نانومتر و کلروفیل b در محدوده ۴۴۰-۴۴۵ نانومتر می‌باشد (شکل ۲-۷). غلظت کلروفیل‌های a و b حدوداً ۱۰ برابر میزان کاروتنوئید می‌باشد و حداکثر

<sup>1</sup> Demarez

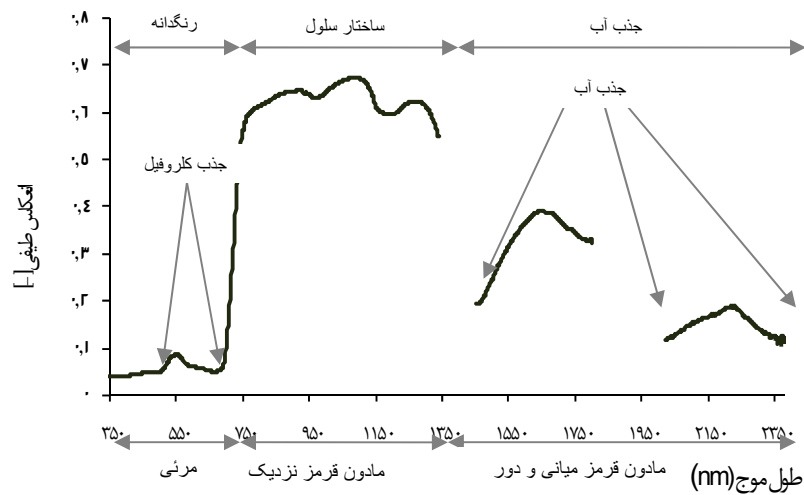
جذب کاروتنوئید نیز در محدوده جذب کلروفیل رخ می‌دهد. بنابراین به علت این همپوشانی تعیین اثر جذب آن در برگ‌های سبز مشکل بوده در حالیکه در مراحل خزان برگ، زمانی که زوال کلروفیل سریع‌تر از کاروتنوئید اتفاق می‌افتد، ساده‌تر است (سانگر<sup>۱</sup>، ۱۹۷۱؛ بویر<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۸۸). جذب کاروتنوئید در محدوده ۴۳۵-۴۴۵ نانومتر به حداکثر خود می‌رسد. انعکاس کم در محدوده طول موج آبی از ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر، ناشی از جذب قوی کلروفیل b و کاروتنوئید می‌باشد (دمارز و همکاران، ۱۹۹۹). در محدوده سبز یک نقطه اوج انعکاسی بزرگی در نزدیکی ۵۵۰ نانومتر دیده می‌شود. در محدوده قرمز یک حداقل انعکاس (حداکثر جذب) در طول موج ۶۸۰ نانومتر و مربوط به جذب طیفی کلروفیل a بارز است. حداکثر جذب کلروفیل همه گیاهان در طول موج ۶۸۰ نانومتر در محدوده قرمز منحنی طیفی می‌باشد، اما از آنجا که این طول موج حساسیت زیادی نسبت به غلظت‌های زیاد کلروفیل ندارد و در غلظت کم کلروفیل جذب طیفی به حد اشباع می‌رسد از این رو برای بررسی تغییرات کلروفیل در همه گونه‌ها مناسب نمی‌باشد (لمایره<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۴). از محدوده ۷۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر انعکاس طیفی به حداکثر میزان خود می‌رسد. بین ۶۸۰ و ۷۵۰ نانومتر منحنی، روند صعودی با شیب تندی را پیدا می‌کند که مربوط به افزایش میزان نور پخش در ساختار درون سلولی و فضای بین سلول‌های برگ بوده و جذب طیفی در این محدوده، تنها مربوط به کلروفیل کلی (a و b) در دامنه گسترده‌ای از غلظت آن می‌باشد. (لمایره و همکاران، ۲۰۰۴). جذب طیفی در طول موج ۷۱۰ نانومتر حداکثر حساسیت را نسبت به غلظت کلروفیل نشان می‌دهد در حالیکه در طول موج ۵۵۰ نانومتر این حساسیت تقریباً کمتر و تنها محدود به بعضی از گونه‌های گیاهی می‌شود. در مطالعه‌ای که دات<sup>۴</sup> (۱۹۹۹) انجام داده به طور کلی چنین نتیجه‌گیری کرده که طول موج‌های ۵۵۰ و ۷۱۰ نانومتر حساس به غلظت کلروفیل هستند اما حساسیت طول موج ۷۱۰ نانومتر بیشتر است. در گونه‌های مختلف اکالیپتوس با میزان زیاد غلظت کلروفیل، طول موج ۷۱۰ نانومتر حساس‌تر و برای بررسی تغییرات مناسب‌تر است اما در گیاهانی که غلظت کلروفیل کم‌تری دارند، طول موج ۵۵۰ نانومتر هم می‌تواند از حساسیت کافی برای نشان دادن تغییرات غلظت کلروفیل برخوردار باشد. تغییر غلظت کلروفیل اثری بر میزان جذب آن در طول موج‌های ۴۹۰ و ۶۸۰ نانومتر ندارد (دات، ۱۹۹۹).

<sup>1</sup> Sanger

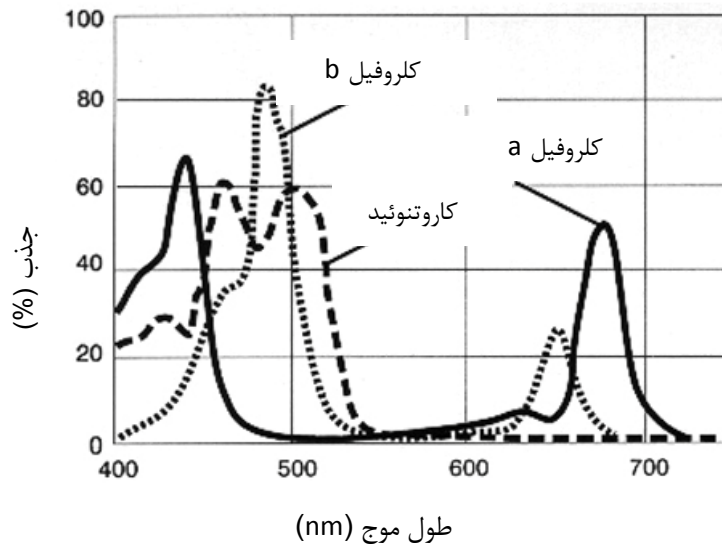
<sup>2</sup> Boyer

<sup>3</sup> le Maire

<sup>4</sup> Datt



شکل ۲-۶: منحنی معمول انعکاس طیفی برگ در محدوده‌های مختلف طیفی و عوامل تأثیر گذار

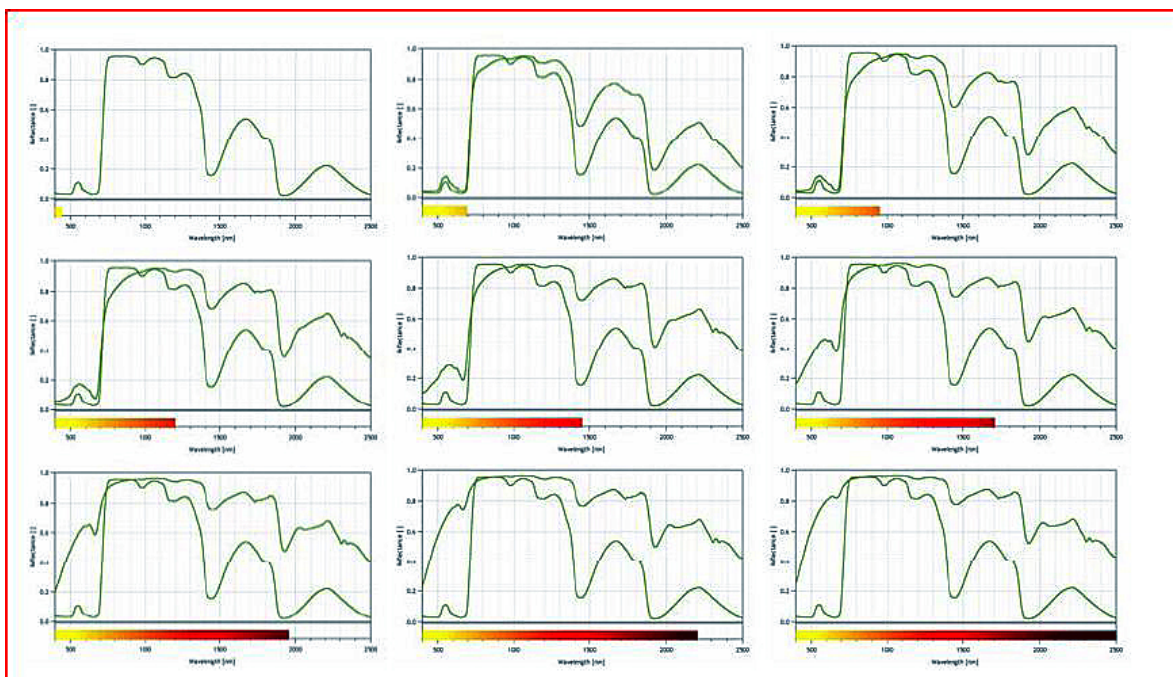


شکل ۲-۷: مشخصه جذبی کلروفیل a و b و کاروتنوئید

در محدوده مادون قرمز نزدیک عامل اصلی تأثیر گذار بر جذب طیفی ساختار درونی برگ می‌باشد. در این محدوده از میزان جذب نور کاسته شده و نور رسیده به برگ تا عمق بیشتری در بافت برگ نفوذ می‌کند که منتج به افزایش میزان انعکاس و عبور می‌شود. مشخصه جذبی آب در محدوده ۹۷۵-۱۱۷۵ نانومتر به خوبی دیده می‌شود. شکل و عمق این مشخصه طیفی تحت تأثیر میزان رطوبت موجود در برگ است (پنوالاس<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۳). در طی مراحل رشد گیاه در طول دوره رویش، تغییرات بسیار مهم و بارزی در محدوده مادون قرمز نزدیک دیده می‌شود به طوری که با تکامل رویش برگ و نزدیک شدن به فصل خزان، از هوای موجود در مزوفیل برگ و میزان

<sup>1</sup> Penuelas

رطوبت آن کاسته می‌شود. تغییرات ایجاد شده در فضای درون سلولی برگ منجر به افزایش انعکاس طیفی می‌شود. زمانی که گیاه دچار استرس خشکی می‌شود نیز گیاه مواجه با چنین پاسخ‌های طیفی می‌گردد (نوبولر، ۲۰۰۲). چگونگی انعکاس طیفی گیاه در محدوده مادون قرمز میانی و دور (۲۵۰۰-۱۳۰۰ نانومتر) تحت تأثیر رطوبت برگ و مواد شیمیایی از جمله سلولز، لیگنین، پروتئین و نشاسته می‌باشد (کوران<sup>۱</sup>، ۱۹۸۹؛ هیملسباچ<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۶؛ فورتی<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۶). زمانی که گیاه دچار استرس کم آبی می‌گردد، انعکاس و عبور طیفی در این محدوده طیفی افزایش پیدا می‌کند (نوبولر، ۲۰۰۲). در تحقیقی که شپمن<sup>۴</sup> و (۲۰۰۷) انجام داده این تغییرات طیفی را در برگ گیاه بنجامین در شرایط آزمایشگاهی با تاباندن نور زیاد در طول ۸ ساعت و ۱۸ دقیقه (اندازه‌گیری طیفی پس هر ۵۵ دقیقه) بررسی کرده است. همان‌طور که در شکل ۲-۸ مشاهده می‌گردد ایجاد استرس خشکی و تغییر غلظت مواد شیمیایی برگ منجر به کاهش جذب آب (در محدوده مادون قرمز میانی) و رنگدانه‌ها (در محدوده مرئی) و در نتیجه افزایش میزان انعکاس طیفی شده است. پاسخ طیفی گیاه در اثر استرس خشکی در محدوده مادون قرمز میانی و دور نسبت به محدوده‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک سریع‌تر می‌باشد (شکل ۲-۸).



شکل ۲-۸: تغییرات انعکاس طیفی برگ در شرایط تاباندن نور زیاد در طول ۸ ساعت و ۱۸ دقیقه (اندازه‌گیری طیفی پس هر ۵۵ دقیقه) و ایجاد استرس خشکی و تغییر غلظت مواد شیمیایی در گیاه بنجامین (شپمن، ۲۰۰۷).

<sup>1</sup> Curran

<sup>2</sup> Himmelsbach

<sup>3</sup> Fourty

<sup>4</sup> Schaepman

۲-۳-۱- محدوده لبه قرمز

چنانچه قبلاً بیان شد در محدوده ۷۴۰-۶۸۰ نانومتر انعکاس طیفی پوشش گیاهی به یک باره افزایش پیدا می‌کند. شیب شدید منحنی در این محدوده، دیواره‌ای را به وجود می‌آورد که به لبه قرمز و محدوده طیفی مربوط به آن به محدوده لبه قرمز<sup>۱</sup> معروف است (شکل ۲-۹) (بونام کارتر<sup>۲</sup>، ۱۹۸۸؛ برت<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۴؛ کومار<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۱؛ سیگر<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۵). محدوده لبه قرمز به عنوان بارزترین محدوده در تمایز مشخصه طیفی پوشش گیاهی از پدیده‌های دیگر و همچنین حساس‌ترین منطقه به میزان غلظت کلروفیل، نیتروژن و ساختار سلولی برگ و متغیرهایی در رابطه با ساختار تاج پوشش گیاه از جمله شاخص سطح برگ و همچنین شرایط سلامت گیاه از نظر استرس و آلودگی می‌باشد (یودر و پتیگرو کراسبی<sup>۶</sup>، ۱۹۹۵؛ جاگو<sup>۷</sup> و همکاران، ۱۹۹۹؛ موتانگا<sup>۸</sup> و اسکیدمور، ۲۰۰۷). افزایش زیاد انعکاس در این محدوده ناشی از وضعیت ساختار سلولی گیاه می‌باشد (داوسون<sup>۹</sup> و همکاران، ۱۹۹۹؛ لمایره و همکاران، ۲۰۰۴). اثر نور پخش در ساختمان سلولی برگ باعث افزایش چشم‌گیر انعکاس طیفی در این محدوده می‌شود. طول موج مربوط به حداکثر شیب در این لبه طیفی تحت عنوان موقعیت لبه قرمز<sup>۱۰</sup> معروف است (فیللا<sup>۱۱</sup> و پنوالاس، ۱۹۹۴؛ کلورز<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۷؛ سیگاندا<sup>۱۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۹). در صورت ثابت ماندن دیگر عوامل مؤثر جابجایی این لبه به سمت طول موج‌های بلندتر نشان دهنده غلظت بیشتر کلروفیل و برعکس جابجایی به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر، بیانگر غلظت کمتر کلروفیل در مقایسه نمونه‌های مختلف می‌باشد (هورلر<sup>۱۴</sup> و همکاران، ۱۹۸۳؛ آستین<sup>۱۵</sup> و همکاران، ۱۹۹۳؛ تینتی<sup>۱۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). این جابجایی در طول دوره رویش در یک گیاه معین نیز ناشی از وضعیت رویش برگ و همچنین وضعیت سلامت گیاه می‌باشد (موتانگا و اسکیدمور، ۲۰۰۷؛ رن<sup>۱۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ چو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹). هر چند که در همه

<sup>1</sup> Red edge region

<sup>2</sup> Bonham-Carter

<sup>3</sup> Baret

<sup>4</sup> Kumar

<sup>5</sup> Seager

<sup>6</sup> Yoder and Pettigrew-Crosby

<sup>7</sup> Jago

<sup>8</sup> Mutanga

<sup>9</sup> Dawson

<sup>10</sup> Red edge position

<sup>11</sup> Filella

<sup>12</sup> Clevers

<sup>13</sup> Ciganda

<sup>14</sup> Horler

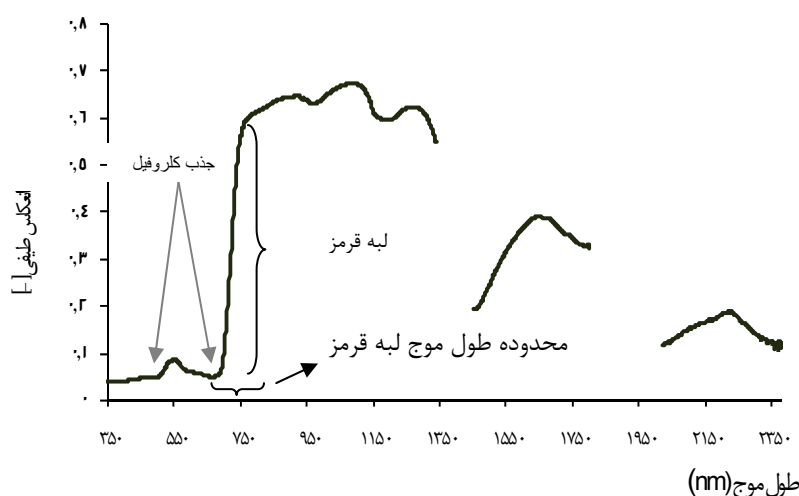
<sup>15</sup> Ustin

<sup>16</sup> Tinetti

<sup>17</sup> Ren

گونه‌ها با کاهش یا افزایش میزان کلروفیل، این لبه به ترتیب به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر و بلندتر جابجا می‌شود، اما میزان این جابجایی در گونه‌های مختلف متفاوت است (آستین و همکاران، ۱۹۹۳). در محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک با افزایش LAI<sup>۲</sup> (شاخص سطح برگ) میزان انعکاس نیز افزایش پیدا می‌کند اما در محدوده‌ی مرئی این رابطه نسبت عکس دارد. (کومار و همکاران، ۲۰۰۱). نتیجه تحقیقات انجام شده (کلورز و بوکر<sup>۳</sup>، ۱۹۹۱؛ فیلا و پنوالاس، ۱۹۹۴؛ روبرتس<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۴؛ زارکو تاجادا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۵a) نشان می‌دهند که لبه قرمز اطلاعات زیادی برای برآورد LAI فراهم می‌کند.

تاکنون مطالعات زیادی بر روی محدوده لبه قرمز به منظور بررسی وضعیت غلظت کلروفیل گیاه با استفاده از انعکاس طیفی تاج پوشش به عنوان یک روش غیر مخرب<sup>۶</sup> انجام شده است. این مطالعات به خصوص در کشاورزی توانسته الگوی پیش بینی کننده مناسبی برای تعیین میزان محصول گیاهان زراعی باشد. بررسی شرایط سلامت گیاه نیز با استفاده از انعکاس طیفی تاج پوشش گیاه در محدوده لبه قرمز جایگاه وسیعی را در تحقیقات سنجش از دوری به خود اختصاص داده است (شن<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۰؛ یانگ و چنگ<sup>۸</sup>، ۲۰۰۱؛ زو<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۴؛ ونگ<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ عباسی و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۲-۹: موقعیت محدوده لبه قرمز بر روی منحنی طیفی و نقاط جذب طیفی کلروفیل در محدوده مرئی

<sup>1</sup> Cho

<sup>2</sup> Leaf Area Index

<sup>3</sup> Buker

<sup>4</sup> Roberts

<sup>5</sup> Zarco-Tejada

<sup>6</sup> nondestructive

<sup>7</sup> Shen

<sup>8</sup> Yang and Cheng

<sup>9</sup> Xue

<sup>10</sup> Wang

## ۲-۴- شاخص‌های طیفی:

هر چند که ممکن است تفاوت طیفی نمونه‌های اندازه‌گیری شده در محدوده‌های طیفی خاصی با مقایسه چشمی مشهود باشد، اما به علت وجود خطای ناشی از دستگاه و عوامل محیطی، بررسی تفاوت طیفی نمونه‌ها با روش‌های آماری معمول و تنها بر اساس ارزش طیفی آن‌ها در هر طول موج به طور جداگانه نتایج قابل اطمینانی نخواهد داشت. از طرف دیگر بازتاب طیفی گیاه در هر طول موج می‌تواند ناشی از عوامل بسیار زیادی مانند مواد بیوشیمیایی گیاه از جمله کلروفیل، نیتروژن، کاروتنوئید، گزانتوفیل همچنین رطوبت برگ، ساختار درون و برون سلولی و به طور کلی عملکرد فتوسنتز در گیاه باشد. عمل ریاضی ساده نسبت‌گیری بازتاب‌های طیفی پدیده‌ها در طول موج‌های مختلف که در سنجش از دور به شاخص طیفی معروف است می‌تواند موجب تشدید اختلاف بازتاب پدیده‌ها و همچنین کاهش اثر عوامل منفی به ویژه عوامل محیطی باشد (جکسون و هوت، ۱۹۹۱). از جمله شاخص‌های طیفی معروف می‌توان به NDVI، VI و ... اشاره کرد. بر این اساس در شاخه طیف سنجی نیز شاخص‌هایی با اهدافی خاص تعیین و تعریف شده‌اند. استفاده از شاخص‌های طیفی علاوه بر بیان علت تفاوت طیفی نمونه‌ها بر اساس ارتباط قوی آن‌ها با متغیر مورد نظر، نقش مؤثری در برطرف کردن و یا کاهش اثر عوامل مزاحم در بازتاب طیفی دارد.

تأثیرات اتمسفری از طرف بالا و اثر انعکاس خاک از طرف پایین منجر به ناخالص شدن انعکاس طیفی پوشش گیاهی می‌شود. بعضی از شاخص‌های طیفی اثرات این عوامل را تصحیح می‌کند و یا به حداقل می‌رساند. اطلاعات انعکاس طیفی موجود در گیاهان معمولاً در قالب شاخص‌های طیفی متمرکز می‌شوند (اسکیدمور و موتانگا، ۲۰۰۷). ساختار شاخص‌های طیفی به نحوی است که کنتراستی بین یک طول موج مبنا با حداقل حساسیت نسبت به رنگدانه مورد نظر و طول موج دیگری (طول موج شاخص) که حداکثر حساسیت را نسبت به آن رنگدانه دارد، ایجاد می‌کند. شاخص‌های طیفی به گونه‌ای تعیین و تعریف می‌شوند که برحسب طول موج خاص انتخاب شده از طرفی منجر به کم‌رنگ شدن اثر بعضی از عوامل مزاحم محیطی و طیفی و از طرف دیگر باعث تمایز و تفکیک طیفی پدیده مورد نظر می‌شوند. محاسبه این شاخص‌های طیفی بسته به هدف مورد نظر می‌تواند با استفاده از منحنی‌های طیفی اولیه، فیلتر شده و یا تبدیل‌های مختلف از جمله مشتق اول و دوم منحنی طیفی و حذف پیوستار (CR) محاسبه شود (لمایره و همکاران، ۲۰۰۴).

<sup>1</sup> Jackson & Huete

<sup>2</sup> Continuum Removal

مطالعات زیادی برای تعیین و تعریف شاخص‌های طیفی مناسب در خصوص بررسی تغییرات غلظت رنگدانه‌های مختلف (گامون<sup>۱</sup> و همکاران<sup>۱۹۹۲</sup>؛ گیتلسون و مرزلیاک<sup>۲</sup>؛ گیتلسون و همکاران<sup>۲۰۰۳</sup>؛ کیمورا<sup>۳</sup>؛ بری<sup>۴</sup>؛ وایسن<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۱)، رطوبت برگ (ونگ و همکاران، ۲۰۰۸)، شاخص سطح برگ (ویسن<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۱)، نیتروژن (لی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ زو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۸) و بقیه عوامل تأثیرگذار بر انعکاس طیفی گیاهان انجام شده است. در شاخص‌های طیفی حساس به تغییرات غلظت کلروفیل بیشتر از طول موج‌های محدوده لبه قرمز و طول موج‌های جذب کلروفیل در محدوده مرئی، استفاده می‌شود. شاخص‌های طیفی مانند PVI<sup>۸</sup> توسط ریچاردسون و ویگانند<sup>۹</sup> (1977)، WVDI<sup>۱۰</sup> توسط کلورز (۱۹۹۱)، شاخص SAVI<sup>۱۱</sup> توسط هوته<sup>۱۲</sup> (۱۹۸۸) و شاخص TSAVI<sup>۱۳</sup> توسط برت و گوپوت<sup>۱۴</sup> (۱۹۹۱) و شاخص تغییر یافته تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (MNDVI<sup>۱۵</sup>) توسط لیو<sup>۱۶</sup> و هوته (۱۹۹۵) حساس به غلظت کلروفیل و مؤثر در کاهش اثر عواملی چون بازتاب زمینه یا ذرات اتمسفری و رطوبت جوی تعیین و تعریف شده‌اند که از طول موج‌های مادون قرمز و قرمز استفاده می‌شود. به تدریج با پیشرفت سنجنده‌ها و بالا رفتن قدرت تفکیک طیفی، از طول موج‌های دقیق‌تر با پهنای کمتر در این شاخص‌های طیفی استفاده شده است (موتانگا و اسکیدمور، ۲۰۰۴). تعدادی از شاخص‌های طیفی مورد استفاده در طیف سنجی مربوط به عوامل مختلف در سطح برگ و تاج گیاهان مختلف در جدول ۲-۲ آمده است.

جدول ۲-۲: تعدادی از شاخص‌های طیفی مورد استفاده در طیف سنجی حساس به عوامل مختلف در سطح برگ و تاج گیاه

| شاخص                            | مقیاس مطالعه | متغیر مربوطه | گونه‌های مطالعه شده     | منبع  |
|---------------------------------|--------------|--------------|-------------------------|---|
| R550/R800                       | برگ          | Chl          | -                       | Aoki, Yabuki, & Totsuka, 1981                       |
| NPQI: (R415_R435)/(R415 + R435) | برگ          | Chl استرس    | گلستنگ و گونه‌های درختی | Barnes, Balaguer, Manrique, Elvira, & Davison, 1992 |

<sup>1</sup> Gamon

<sup>2</sup> Gitelson & Merzlyak

<sup>3</sup> Kimura

<sup>4</sup> Barry

<sup>5</sup> Vaesen

<sup>6</sup> Lee

<sup>7</sup> Zhu

<sup>8</sup> Perpendicular Vegetation Index

<sup>9</sup> Richardson & Wiegand

<sup>10</sup> Weighted Difference Vegetation Index

<sup>11</sup> The Soil Adjusted Vegetation Index

<sup>12</sup> Huete

<sup>13</sup> Transformed Soil Adjusted Vegetation Index

<sup>14</sup> Baret & Guyot

<sup>15</sup> Modified Normalized Difference Vegetation Index

<sup>16</sup> Liu

|  |  |  |            |   |
|--|--|--|------------|---|
| Birth & McVey, 1968                                | مرغزارها   | Chl  | برگ        | SR: R <sub>nir</sub> /R <sub>red</sub> (large)  |
| Blackburn, 1998a, 1998b                            | <i>Pteridium aquilinum</i> ,<br><i>Fagus sylvatica</i> ,<br><i>Quercus robur</i> ,<br><i>Acer negundo</i> ,<br><i>Castanea sativa</i>  | Chl a                                      | برگ        | PSSRa: R <sub>800</sub> /R <sub>680</sub>   |
|  |  | Chl b                                      | برگ        | PSSRb: R <sub>800</sub> /R <sub>635</sub>   |
|  |  | Chl a                                      | برگ        | PSNda: (R <sub>800</sub> -R <sub>680</sub> )/(R <sub>800</sub> + R <sub>680</sub> )   |
|  |  | Chl b                                      | برگ        | PSNdb: (R <sub>800</sub> -R <sub>635</sub> )/(R <sub>800</sub> + R <sub>635</sub> )   |
|  |  | Chl a, Chl b                               | تاج        | B(log 1/R <sub>664</sub> )  |
| Boochs <i>et al.</i> , 1990                        | <i>Beta vulgaris</i> L.  | Chl a                                      | تاج        | FD <sub>703</sub>   |
|  |  | Chl a                                      | تاج        | FD <sub>720</sub>   |
| Broge & Leblanc, 2001                              | مدل PROSAIL  | Chl  | تاج        | TVI: $0.5 \times (120(R_{nir} - R_{green}) - 200(R_{red} - R_{green}))$   |
| Buschman & Nagel, 1993                             | <i>Phaseolus vulgaris</i>  | Chl  | برگ        | R <sub>800</sub> -R <sub>550</sub>  |
|  |  | Chl  | برگ        | R <sub>800</sub> /R <sub>550</sub>  |
| Carter, 1994                                       | <i>Diospyros virginiana</i> ,<br><i>Pinus taeda</i> L.,<br><i>Pinus Elliottii</i><br><i>Engelm.</i> ,<br><i>Arundinaria gigantea</i><br><i>Euonymus japonica</i> ,<br><i>Quercus virginiana</i><br>Mill. | استرس                                      | برگ        | R <sub>695</sub> /R <sub>420</sub>  |
|  |  | استرس                                      | برگ        | R <sub>695</sub> /R <sub>760</sub>  |
|  |  | استرس                                      | برگ        | R <sub>605</sub> /R <sub>760</sub>  |
|  |  | استرس                                      | برگ        | R <sub>710</sub> /R <sub>760</sub>  |
|  |  | استرس                                      | برگ        | R <sub>695</sub> /R <sub>670</sub>  |
|  |  | Chl  | برگ        | R <sub>550</sub>  |
| Chappelle, Kim, & McMurtrey, 1992                  | <i>Glycine max</i> Merr.   | Chl a                                      | برگ        | R <sub>675</sub> /R <sub>700</sub>  |
|  |  | Chl b                                      | برگ        | R <sub>675</sub> /(R <sub>700</sub> × R <sub>650</sub> )  |
| Collins, 1978; Horler <i>et al.</i> , 1983         | ۱۰ گونه درختی و حبوبات   | Chl, LAI,<br>Chl ×<br>LAI, LAI,<br>زی توده | برگ و تاج  | موقعیت طول موج لبه قرمز   |
| Datt, 1998   | ۲۰ گونه اکالیپتوس و گونه<br><i>Angophora costata</i>   | Chl a, Chl                                 | برگ        | R <sub>672</sub> /(R <sub>550</sub> × R <sub>708</sub> )  |
|  |  | Chl b                                      | برگ        | R <sub>672</sub> /R <sub>550</sub>  |
|  |  | Chl a, Chl                                 | برگ        | R <sub>860</sub> /(R <sub>550</sub> × R <sub>708</sub> )  |
| Datt, 1999   | ۲۱ گونه اکالیپتوس  | Chl<br>Chl                                 | برگ<br>برگ | (R <sub>850</sub> × R <sub>710</sub> )/(R <sub>850</sub> × R <sub>680</sub> )<br>D <sub>754</sub> /D <sub>704</sub>                                     |
| Elvidge & Zhikang, 1995                            | <i>Pinus edulis</i> ,<br><i>Artemisia tridentata</i>   | Chl  | تاج        | مجموع مقدار ارزش منحنی مشتق اول در طول موج ۶۲۵ و ۷۹۵  |
| Gitelson & Merzylac, 1994                          | <i>Aesculus hippocastanum</i> L.,<br><i>Acer platanoides</i> L.  | Chl  | برگ        | R <sub>750</sub> /R <sub>550</sub>  |
|  |  | Chl  | برگ        | R <sub>750</sub> /R <sub>700</sub>  |
|  |  | Chl  | برگ        | NDI: (R <sub>750</sub> × R <sub>705</sub> )/(R <sub>750</sub> + 705)  |
| Gitelson, Kaufman, & Merzlyak, 1996                | <i>Aesculus hippocastanum</i> L.,<br><i>Acer platanoides</i> L.  | Chl a                                      | تاج        | green NDVI: (R <sub>780</sub> × R <sub>550</sub> )/   |
|  |  | Chl a                                      | تاج        | (R <sub>780</sub> + R <sub>550</sub> ) hyper<br>Green NDVI: (R <sub>nir</sub> × R <sub>green</sub> )/<br>(R <sub>nir</sub> + R <sub>green</sub> ) large |
| Gitelson, Buschmann, & Lichtenthaler, 1999         | <i>Fagus sylvatica</i> L.,<br><i>Ulmus minor</i> Miller,<br><i>Parthenocissus tricuspidata</i> L.  | Chl tot                                    | برگ        | 1/R <sub>700</sub>  |
| Maccioni <i>et al.</i> , 2001,                     | ۲۱ گونه اکالیپتوس  | Chl  | برگ        | (R <sub>780</sub> × R <sub>710</sub> )/(R <sub>780</sub> × R <sub>680</sub> )   |
| Mc Murtey, Chappelle, Kim, Meisinger, & Corp, 1994 | <i>Zea mays</i> L.   | Chl  | برگ        | R <sub>700</sub> /R <sub>670</sub>  |
| Miller <i>et al.</i> , 1990                        | <i>Quercus macrocarpa</i> ,<br><i>Acer saccharum</i> ,<br><i>Abies balsamea</i><br><i>Fagus grandifolia</i>  | Chl + Chl<br>× LAI                         | تاج        | موقعیت طول موج لبه قرمز از روی منحنی تبدیل شده  |
| Penuelas, Gamon, Fredeen, Merino, & Field, 1994    | <i>Helianthus annuus</i> L.  | نسبت                                       | برگ        | SRPI: R <sub>430</sub> /R <sub>680</sub>  |
|  |  | مجموعه رنگدانه‌ها                          | برگ        | NPCI: (R <sub>680</sub> × R <sub>430</sub> )/(R <sub>680</sub> + R <sub>430</sub> )   |
|  |  | Chl به استرس و                             |            | EGFR: dRE/dG  |

| نویسنده   | نوع گیاه                     | پارامتر   | نوع برگ    | فرمول   |
|---|------------------------------|---|------------|---|
|   |                              | نسبت<br>مجموعه رنگدانه‌ها<br>به استرس و<br>Chl, N<br>Chl, N | برگ<br>برگ | EGFN: $(dRE \times dG)/(dRE + dG)$  |
| Penuelas, Baret, & Filella, 1995                        | ۹ گونه                       | Chl   | برگ        | SIPI: $(R_{800} \times R_{445})/(R_{800} \times R_{680})$   |
| Roujean & Breon, 1995                                   | مدل SAIL                     | LAI, Chl  | تاج        | RDVI: $\sqrt{NDVI \times DVI}$  |
| Rouse, Haas, Schell, & Deering, 1973                    | Great Plains vegetation      | LAI + Chl<br>LAI +<br>Chl                                   | تاج<br>تاج | NDVI (hyper): $(R_{800} \times R_{680})/(R_{800} + R_{680})$<br>NDVI (large): $(R_{nir} \times R_{red})/(R_{nir} + R_{red})$          |
| Sims & Gamon, 2002                                      | ۵۳ گونه                      | Chl<br>Chl  | برگ        | mND705: $(R_{750} \times R_{705})/(R_{750} + R_{705} \times 2R_{445})$<br>mSR705: $(R_{750} \times R_{445})/(R_{705} \times R_{445})$ |
| Smith, Adams, Stephens, & Hick, 1995                    | <i>Triticum aestivum</i> L.  | Chl, LAI<br>$\times$ Chl                                    | تاج        | Greenness index: $R_{554}/R_{677}$  |
| Vogelman et al., 1993                                   | <i>Acer saccharum</i> March. | Chl   | برگ        | $R_{740}/R_{720}$   |
|   |                              | Chl   | برگ        | $D_{715}/D_{705}$   |
|   |                              | Chl   | برگ        | $(R_{734} \times R_{747})/(R_{715} + 726)$  |
|   |                              | Chl   | برگ        | $(R_{734} \times R_{747})/(R_{715} + 720)$  |
|   |                              | Chl   | برگ        | $R_{740}/R_{720}$ (mean $[R_{734}; R_{747}]$ / mean $[R_{715}; R_{726}]$ ) large  |
|   |                              | Chl   | برگ        | $D_{715}/D_{705}$ (mean $[R_{710}; R_{720}]$ / mean $[R_{700}; R_{710}]$ ) large  |
| Yoder & Pettigrew-Crosby, 1995                          | <i>Acer macrophyllum</i>     | Chl   | تاج و برگ  | $\text{Blog}(1/R_{737})$  |
| Zarco-Tejada, Miller, Noland, Mohammed, & Sampson, 2001 | <i>Acer saccharum</i> March. | Chl   | تاج        | انتگرال مقادیر انعکاس طیفی از طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر  |

Chl: کلروفیل ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )    LAI: شاخص سطح برگ    N: نیتروژن ( $\text{g}/\text{m}^2$ )    dG, dRE: حداکثر مقدار منحنی مشتق اول در محدوده لبه قرمز یا محدوده سبز.    FD<sup>۱</sup>: مشتق اول.    Blog: لگاریتم منحنی مشتق اول.    R<sub>green</sub>: میانگین انعکاس در محدوده ۵۳۰-۵۷۰ nm.    R<sub>nir</sub>: میانگین انعکاس در محدوده ۷۶۰-۸۰۰ nm.    R<sub>red</sub>: میانگین انعکاس در محدوده ۶۵۰-۶۸۰ nm.    hyper<sup>۲</sup>: داده‌های ابرطیفی.    larg: باند با پهنای وسیع.

## ۲-۵- منحنی حذف پیوستار (CR)

همواره در بعضی از طول موج‌های یک منحنی بازتاب طیفی پدیده‌های جذب<sup>۴</sup> دیده می‌شود. به دنبال تحقیقات تحقیقات گسترده انجام شده عوامل بیشتر این جذب‌ها روشن شده است. از جمله پدیده‌های جذب مهم می‌توان به جذب آب، کلروفیل، نیتروژن و ... اشاره کرد. هر یک از این پدیده‌های جذب دارای یک دامنه طول موج می‌باشند ولی معمولاً با طول موج وسط دامنه مربوطه معرفی می‌شوند. بر اساس تحقیقات انجام شده (کوکالی<sup>۵</sup> و

<sup>1</sup> maximum amplitude of the first derivative on the red-edge region (dRE) or green region (dG).

<sup>2</sup> First Derivative

<sup>3</sup> hyperspectral

<sup>4</sup> Absorption features

<sup>5</sup> Kokaly

کلارک، ۱۹۹۹؛ کلورز و همکاران، ۲۰۰۷؛ دوریگو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۷؛ کلورز و همکاران، ۲۰۰۸) باندهای جذب مواد بیوشیمیایی در منحنی بازتاب طیفی گیاهان نیز شناخته شده‌اند و در تجزیه و تحلیل‌ها مد نظر و مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعضی محدوده‌های طیفی به طور بارزی مربوط به مشخصه جذبی متغیر خاصی می‌باشند، مانند محدوده لبه قرمز که عمدتاً به جذب طیفی کلروفیل مربوط می‌شود. در بسیاری از تحقیقات در بررسی وضعیت تغییرات کلروفیل پوشش گیاهی بر اساس منحنی حذف پیوستار از محدوده لبه قرمز استفاده می‌گردد. (بروگ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۱؛ موتانگا و همکاران، ۲۰۰۴؛ هوآنگ<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۴). البته عوامل دیگری نیز می‌توانند به طور موردی باعث جذب شوند و بر تعداد پدیده‌های جذب بیافزایند و یا آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. دامنه طول موج این پدیده‌های جذب می‌تواند همپوشانی نیز داشته باشد. بسیاری از روش‌های تجزیه و تحلیل‌های طیفی در محدوده پدیده‌های جذبی شناخته شده انجام می‌شوند. از این رو به منظور مطالعه دقیق پدیده‌های جذب و مقایسه آن‌ها ضرورت نرمال و بارزسازی منحنی در محدوده‌های مورد نظر مطرح شده است (موتانگا و همکاران، ۲۰۰۳). در این رابطه تجزیه و تحلیل حذف پیوستار توسعه یافته است. نحوه محاسبه منحنی حذف پیوستار به این شرح است که ابتدا با تعیین نقطه طول موج ابتدا و انتها مربوط به پدیده جذبی، خط پیوستار<sup>۴</sup> با اتصال این دو نقطه به یکدیگر و در بالای منحنی مربوطه تشکیل می‌شود. سپس مقادیر پیوستار در هر یک از طول موج‌های خط پیوستار بر آورد می‌گردد. در ادامه با تقسیم مقادیر منحنی طیفی در طول موج‌های محدوده مورد نظر به مقادیر متناظر در این خط، بازتاب نسبی محاسبه می‌گردد. بر این اساس مقادیر محاسبه شده برای طول موج‌های آغاز و پایان پدیده جذب مورد نظر برابر یک خواهد بود. منحنی حاصل از مقادیر جدید، منحنی بدون پیوستار<sup>۵</sup> خوانده می‌شود و دارای ارزش صفر تا یک خواهد بود (شکل ۲-۱۰). علی‌الاصول مقادیر جذب‌های ناخواسته عوامل نامشخص در این منحنی، حذف و یا به حداقل رسیده است. در این چنین منحنی‌ها واریانس مطلق<sup>۶</sup> حذف و حداکثرهای جذب بارزتر می‌شوند (کوران و همکاران، ۲۰۰۱).

بنابراین تجزیه و تحلیل حذف پیوستار نوعی نرمال سازی منحنی طیفی در دامنه طول موج مورد نظر است و امکان مقایسه‌های پدیده‌های جذبی معین را فراهم می‌سازد و تغییرات شکل مشخصه جذبی مربوط به متغیر مورد نظر (مواد بیوشیمیایی برگ مثل کلروفیل و یا متغیرهای دیگر) بررسی می‌شود. امکان مقایسه شکل منحنی برداشت

<sup>1</sup> Dorigo

<sup>2</sup> Broge

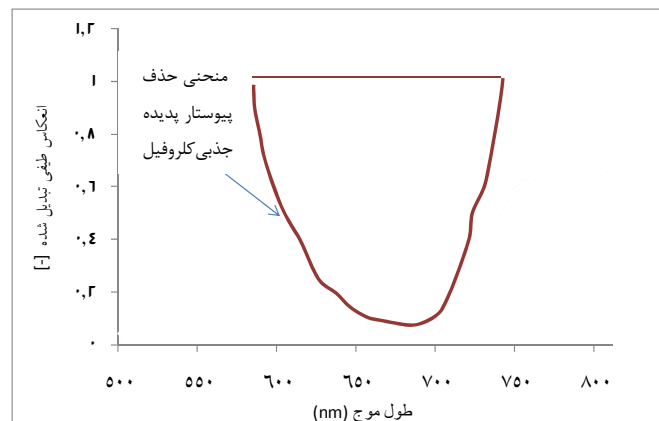
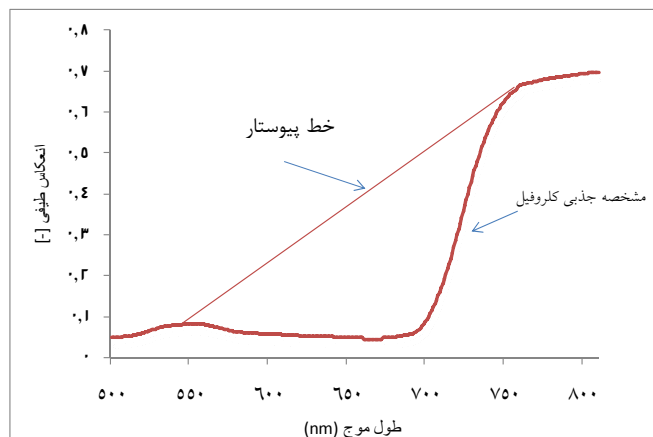
<sup>3</sup> Huang

<sup>4</sup> Continuum line

<sup>5</sup> Continuum removed spectrum

<sup>6</sup> Absolute variance

حذفی با در نظر گرفتن عمق منحنی همراه با مؤلفه‌هایی مانند مساحت زیر منحنی و یا ارزش طیفی در نقطه میانه، فراهم می‌گردد (کوران و همکاران، ۲۰۰۱). بسیاری از تجزیه و تحلیل‌ها بر پایه منحنی بدون پیوستار استوار است. در شاخص طیفی ANCB از منحنی بدون پیوستار که حاصل تجزیه و تحلیل حذف پیوستار است، استفاده می‌شود.



شکل ۲-۱۰: مراحل تبدیل منحنی طیفی به منحنی CR در محدوده لبه قرمز



**گاسمن و آلن<sup>۱</sup> (۱۹۷۳)** به بررسی تفاوت طیفی ۳۰ گونه گیاهی در طول موج‌های خاصی پرداخته‌اند. در این مطالعه خصوصیات طیفی گیاهان از جمله میزان انعکاس و ضریب‌های جذب و پخش مطالعه شده است. تفاوت خصوصیات طیفی گونه‌های مورد نظر در طول موج‌های ۵۵۰ و ۶۵۰ (باند‌های جذب کلروفیل)، ۸۵۰ (طول موج مبنا و حداقل جذب کلروفیل)، ۱۴۵۰ (باند جذب آب)، ۱۶۵۰ (باند جذب آب به همراه طول موج ۱۴۵۰)، ۱۹۵۰ (باند جذب آب) و ۲۲۰۰ (باند جذب آب به همراه طول موج ۱۹۵۰) از نظر آماری بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که انعکاس طیفی برگ با میزان ضخامت آن‌ها رابطه عکس دارد. گونه‌هایی که برگ‌های ضخیم‌تری دارند ضریب جذب آن‌ها نسبت به برگ‌های نازک‌تر بیشتر است، به طوری که رابطه ضخامت برگ با ضریب جذب مثبت و معنی‌دار ( $p=0/01, r=0/72$ ) می‌باشد. برگ‌هایی که مزوفیل دور و ساختار پیچیده‌تری دارند دارای ضریب پخش بیشتری هستند اما این ضریب با ضخامت برگ رابطه معنی‌داری را نشان نمی‌دهد. نتایج این تحقیق همچنین نشان داده که انعکاس طیفی برگ در شرایطی که آب درون سلولی و یا ترکیبات تاننی گیاه زیاد شود کاهش پیدا می‌کند.

**ویلیامز<sup>۲</sup> (۱۹۹۱)** خصوصیات انعکاس طیفی اجزاء مختلف درخت شامل تاج، شاخه و برگ را در گونه‌های نوئل، کاج و افرا با هم مقایسه کرده است. نتایج این تحقیق نشان داده که برای همه گونه‌ها در محدوده مادون قرمز نزدیک و میانی انعکاس طیفی تاج کمتر از شاخه‌ها و برگ‌ها است. انعکاس طیفی گونه افرا به نسبت گونه‌های سوزنی برگ به خصوص در محدوده مادون قرمز بیشتر می‌باشد. پیشنهاد شده که در مطالعات بعدی اثر عوامل دیگری از جمله تراکم تاج درخت، عمق‌های مختلف تاج، زاویه‌های مختلف برداشت و شرایط حاصلخیزی خاک بررسی گردد.

**گامون و همکاران (۱۹۹۲)** با مطالعه چرخه رنگدانه‌های فتوسنتزی (گزانتوفیل)، شاخص طیفی PRI<sup>۳</sup> را معرفی نموده‌اند. نتایج این تحقیق، شاخص طیفی PRI را بر اساس طول موج‌های استفاده شده ۵۲۸، ۵۳۹، ۵۷۰، ۵۳۱ نانومتر، با چرخه رنگدانه گزانتوفیل مرتبط می‌داند. این شاخص طیفی با فتوسنتز و همچنین تغییرات نیتروژن گیاه که می‌تواند ناشی از تنش گیاه باشد، مرتبط است. شاخص طیفی PRI به تغییرات رطوبت گیاه ناشی از تنش، حساس نمی‌باشد. در این شاخص طیفی طول موج‌های ۵۲۸، ۵۳۹، ۵۳۱ به عنوان طول موج مبنا جهت کاهش یا حذف اثر تغییرات زاویه تابش خورشید می‌باشند. عوامل تاثیرگذار بر روی شاخص طیفی PRI و شدت فتوسنتز که در این

<sup>1</sup> Gausman & Allen

<sup>2</sup> Williams

<sup>3</sup> Photochemical Reflectance Indices

تحقیق به آن اشاره شده عبارتند از: تغییرات زاویه تابش خورشید، تفاوت ساختار تاج، موقعیت برگ در تاج پوشش گیاه، شرایط متغیر جوی در ساعات مختلف روز. در این مطالعه به اهمیت اندازه گیری طیفی در ساعاتی از روز (۱۰ تا ۱۴) با حداکثر تابش اشاره شده است.

**بلك برن و ميلتون<sup>۱</sup> (۱۹۹۵)** در اراضی جنگلی ناحیه وینچستر انگلیس اقدام به بررسی انعکاس طیفی تاج پوشش گونه‌های پهن برگ در طی فصول مختلف توسط طیف نگار، نموده‌اند. در نتیجه‌ی تغییر درصد تاج پوشش در طی سال، تغییر انعکاس طیفی در طول موج‌های مرئی و مادون قرمز میانی بارزتر از بقیه طول موج‌ها می‌باشد. این نتیجه با بررسی شاخص طیفی NDVI حاصل از داده‌های Spot-HRV به دست آمده و نشان داده که بین این شاخص طیفی و میزان درصد تاج پوشش رابطه مثبت و قوی وجود دارد.

**گیتلسون و همکاران<sup>۲</sup> (۱۹۹۶)** به بررسی موقعیت لبه قرمز در ارتباط با غلظت کلروفیل در محدوده ۷۰۰ نانومتر پرداخته‌اند. این مطالعه بر روی برگ‌های گونه‌های افرا و شاه بلوط در فصل‌های تابستان، پاییز و بهار که دامنه وسیعی از تغییرات کلروفیل را نشان می‌دهد، انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داده که مشتق اول منحنی طیفی در دامنه طول موج ۶۸۵-۷۰۶ و ۷۱۰ و ۷۲۵ حداکثر شیب را نشان داده و ناشی از تفاوت مراحل رویشی برگ (سن برگ) و غلظت کلروفیل آن بوده است. نسبت انعکاس طیفی در طول موج‌های ۷۵۰ به ۷۰۰ نانومتر ارتباط قوی ( $r^2 > 0.95$ ) را با غلظت کلروفیل نشان داده است. این شاخص طیفی برای غلظت‌های متفاوت کلروفیل از ۰/۶ تا بیش از  $60 \text{ nmol/cm}^2$  در این دو گونه مورد بررسی قرار گرفته و خطای برآورد کلروفیل کمتر از  $3.7 \text{ nmol/cm}^2$  برآورد شده است. همچنین رابطه غلظت کلروفیل هر یک از گونه‌ها به طور مجزا با نقطه لبه قرمز بررسی شده است. با افزایش غلظت کلروفیل موقعیت لبه قرمز به سمت طول موج‌های بالاتر جابه‌جا می‌شود. با افزایش درصد انعکاس طیفی در گونه‌های مختلف، نقطه لبه قرمز به سمت طول موج‌های پایین‌تر جابه‌جا می‌شود و رابطه این تغییر خطی ( $r^2 = 0.94$ ) می‌باشد. با کاهش سبزیگی برگ (از برگ‌های سبز در تابستان تا زرد در پاییز) و با کاهش غلظت کلروفیل از  $60$  تا  $10 \text{ nmol/cm}^2$  نقطه لبه قرمز از طول موج ۷۰۴ به ۶۹۸ نانومتر جابه‌جا می‌شود.

**گراسمن<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۶)** با هدف تعیین طول موج‌های مؤثر در برآورد میزان مواد بیوشیمیایی در برگ گونه‌های مختلف به این نتیجه رسیده‌اند که با استفاده از روش رگرسیون گام به گام، طول موج‌های انتخاب شده برای یک نمونه قابل تعمیم به نمونه‌های دیگر نمی‌باشد و نتیجه‌ی برآورد غلظت نیترژن برای هر نمونه در طول موج

<sup>1</sup> Blackburn & Milton

<sup>2</sup> Gitelson

<sup>3</sup> Graossmann

مشخصی متفاوت با نمونه‌ی دیگر است. در این مطالعه از طول موج‌های ۲۱۵۰، ۲۰۵۰ که در تحقیقات قبلی ارتباط قوی را با نیتروژن نشان داده است، استفاده شده است. در حالیکه طول موج‌های ۲۰۵۶، ۲۰۷۶، ۲۱۶۸ ارتباط خیلی قوی‌تری را با نیتروژن نشان می‌دهند. نتیجه کلی این تحقیق بیانگر این است که همواره با پیشرفت طیف سنج‌ها در افزایش قدرت تفکیک طیفی و کاهش خطای دستگاه، دقت حساسیت طول موج‌های مرتبط با مواد شیمیایی برگ افزایش می‌یابد. در نتیجه اهمیت قدرت تفکیک طیفی دستگاه طیف سنج در رابطه با تعیین بهترین طول موج‌ها با مواد شیمیایی مشخص می‌گردد. بر اساس نتایج به دست آمده طول موج‌های ۲۰۵۰، ۲۱۸۰ نانومتر مربوط به مشخصه‌ی جذب طیفی پروتئین رابطه معنی‌داری را با نیتروژن نشان می‌دهند. در این مطالعه نیز نتایجی که از روش بررسی شکل منحنی‌ها از طریق مقایسه عمق باند طیفی منحنی CR به دست آمده، نشان دهنده دقت بیشتر و خطای کمتر در برآورد نیتروژن، لیگنین و سلولز می‌باشد.

**نوبولر و همکاران (۱۹۹۷)** به منظور طبقه‌بندی اراضی کشاورزی اقدام به تعیین طیف عضوهای نهایی طبقه‌بندی<sup>۱</sup> به بررسی روش‌های مختلف و مقایسه آن‌ها پرداخته‌اند. در این تحقیق داده‌های سنجنده ابر طیفی هوایی DAIS7915 با ۷۲ باند از منطقه‌ای در غرب سوئیس مورد استفاده قرار گرفته است. چهار طبقه در اراضی کشاورزی شامل زی توده خشک، سایه، خاک، و پوشش گیاهی انتخاب شده‌اند. انتخاب عضو نهایی طبقه‌بندی با سه روش: ۱- انتخاب از تصاویر سنجنده هوایی ۲- استفاده از داده‌های طیف نگار ۳- استفاده از مدل‌های SVAT، Prospect و SAIL جهت شبیه‌سازی انعکاس تاج بر اساس انعکاس طیفی برگ و متغیرهای دیگر، انجام شده است. نتایج طبقه‌بندی‌های حاصل از این سه روش با یک نقشه واقعیت زمینی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داده که روش طیف نگاری و استفاده از مدل، دقت خوبی را به همراه داشته است. برای رسیدن به نتیجه بهتر پیشنهاد شده است اثر BRDF<sup>۲</sup> در مطالعات پوشش گیاهی در نظر گرفته شود.

**گامون و همکاران (۱۹۹۷)** شاخص طیفی PRI را بر روی ۲۰ گونه مختلف از پهن برگان، سوزنی برگان و گیاهان یک ساله آزمایش کرده‌اند و ارتباط آن با شدت و میزان فتوسنتز در ساعات آفتابی روز و برای شرایط نوری مختلف از برگ‌هایی که در نور کامل تا برگ‌هایی که در سایه کامل قرار گرفته، بررسی شده است. نتایج این تحقیق بیانگر امکان استفاده از این شاخص طیفی برای نشان دادن شدت و میزان فتوسنتز در مورد گیاهانی که برگ‌های آن‌ها در نور کامل قرار می‌گیرند، است. نتایج این تحقیق نشان داده که این شاخص طیفی برای گیاهانی که تاج و موقعیت برگ‌های آن‌ها در شرایط نوری مختلف، از برگ‌های بسیار نور دیده تا برگ‌هایی که در سایه کامل قرار می‌گیرند،

<sup>1</sup> Endmember

<sup>3</sup> Bidirectional Reflectance Distribution Function

مناسب نبوده و از حساسیت کافی برخوردار نمی‌باشد. بنابراین این شاخص طیفی برای قسمت بالای تاج که در نور کامل قرار می‌گیرد یا گونه‌هایی که ساختار تاج آن‌ها به نحوی است که سهم انعکاس طیفی دورن تاج آن‌ها کمتر است، بسیار مناسب می‌باشد. اگرچه عملکرد این شاخص طیفی در مورد چرخه رنگدانه‌های گزانتوفیل در فرایند فتوسنتز است اما نتایج این تحقیق نشان داده که میزان فتوسنتز با تغییرات غلظت نیترژن تغییر می‌کند. با کاهش میزان نیترژن گیاه از میزان فتوسنتز نیز کاسته شده و ارزش PRI کمتر می‌شود که نشان دهنده ماندگاری بیشتر رنگدانه‌های حمایت کننده در مقابل نور شدید می‌باشد. شدت فتوسنتز برای درختان سوزنی برگ به نسبت پهن برگان و گیاهان علفی یکساله کمتر است. در این مطالعه رابطه PRI با شدت فتوسنتز مثبت و قوی ( $r^2 = 0.94$ ) می‌باشد. در این شاخص طیفی از طول موج ۵۳۱ نانومتر به عنوان طول موج مبنا استفاده شده است. در مطالعه دیگری که گامون و همکاران (۱۹۹۲) انجام داده‌اند (بر گونه sunflower یا *H. annuus*) با شدت نور بسیار زیاد بهترین طول موج برای تبدیل رنگدانه‌های فتوسنتزی ۵۲۶ نانومتر معرفی کرده‌اند. در این مطالعه نیز با افزایش شدت نور این طول موج رابطه بهتری را ( $r^2 = 0.73$  و  $p = 0.003$ ) با شدت فتوسنتز نشان داده است. در این مطالعه و تحقیقی که توسط پنوالاس و همکاران (۱۹۹۵) انجام شده عامل موثر در کنترل رابطه PRI و شدت فتوسنتز، موقعیت برگ در تاج (برگ در سایه و نور) و میزان شدت نوری رسیده به برگ در یک گونه و گونه‌های مختلف ذکر شده است.

### تورنر<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۷) در مطالعه‌ای به بررسی خصوصیات طیفی گونه‌های اکالیپتوس در جنگل‌های

سیدنی پرداخته‌اند. با استفاده از داده‌های طیف نگار خصوصیات طیفی برگ، تاج، تنه، زیر آشکوب و خاک مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین با استفاده از داده‌های سنجنده ابرطیفی هوایی Hymap به ارزیابی میزان تأثیر ترکیبات ساختاری و ریخت شناسی بر انعکاسات طیفی و روش‌های تمایز در جداسازی این ترکیبات پرداخته شده است. نتایج نشان داده که محدوده‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک در داده‌های طیف نگاری برای بررسی تفاوت انعکاس طیفی برگ‌ها در سنین مختلف مناسب تر است. در محدوده مادون قرمز نزدیک گونه‌ها با هم تفاوت معنی دار دارند. در بررسی انعکاس طیفی تنه درخت محدوده مادون قرمز نزدیک تفاوت‌های طیفی را بیشتر نشان می‌دهد.

### آتزبرگرک و وارنو<sup>۲</sup> (۱۹۹۸) در ترییرآلمان با طیف نگاری در شرایط آزمایشگاهی به بررسی انعکاس طیفی

گونه‌های سالم و بیمار پسته آ (در نتیجه آهکی شدن خاک جنگل) در طبقه‌های سنی مختلف برگ پرداخته‌اند. نتیجه این تحقیق نشان داده که انعکاس طیفی توده‌های بیمار به طور قابل توجهی در محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی کاهش پیدا می‌کند. در این مطالعه از روش‌های مشتق گیری منحنی طیفی و شاخص‌های طیفی جهت مشخص

<sup>1</sup> Turner

<sup>2</sup> Atzberger & Werner

کردن طول موج‌های حساس به تغییرات وضعیت سلامت درخت استفاده شده است. محدوده مادون قرمز میانی نسبت به تغییرات شرایط سلامت گیاه حساس تر می‌باشد. همچنین میزان انعکاس طیفی برگ‌ها با افزایش سن آن‌ها کاهش می‌یابد.

**اسکیدمور و همکاران (۱۹۹۸)** با بررسی میزان تفاوت انعکاس طیفی ۸ گونه مرتعی توسط طیف نگار در شرایط آزمایشگاهی و استفاده از داده‌های ابر طیفی سنجنده هوایی CASI اقدام به تفکیک آن‌ها نموده‌اند. در این تحقیق از تحلیل‌های آماری جهت انتخاب بهترین محدوده‌های طیفی و باندهای سنجنده در تفکیک گونه‌ها استفاده شده است. با استفاده از روش همبستگی ناپارامتری اسپیرمن ارتباط داده‌های طیف نگار و سنجنده هوایی بررسی شده است. نتیجه این تحقیق نشان داده که در محدوده‌های طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و لبه قرمز اختلاف بین منحنی‌های طیفی معنی دار می‌باشد.

**اشتورب<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۸)** به مطالعه توان داده‌های طیف نگاری برای تعیین مشخصه‌های شاخص سطح برگ و میزان نیتروژن و زی توده در منطقه‌ای از سوئیس پرداخته‌اند. این تحقیق با استفاده از ۲۰۰ طیف برداشت شده از گیاهان علوفه‌ای در توده‌هایی با تراکم‌های مختلف انجام شده است. با روش جداسازی طیفی خطی به تفکیک انعکاس‌های پوشش گیاهی و خاک در یک طیف مخلوط پرداخته‌اند و با استفاده از روش رگرسیون خطی رابطه‌ای بین درصد پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ حاصل در هر قطعه نمونه برقرار شده است. نتایج خوب این رابطه نشان می‌دهد که روش رگرسیون خطی جهت تخمین پارامترهایی نظیر شاخص سطح برگ مناسب است اما در مورد میزان نیتروژن با استفاده از روش رگرسیون نتایج رضایت بخشی حاصل نشده است.

**داتری و والتال<sup>۲</sup> (۱۹۹۸)** به تفکیک گیاه شاه دانه (*Cannabis sativa*) از دیگر گونه‌ها بر اساس مشخصات طیفی برگ و تاج پوشش آن‌ها پرداخته‌اند. عوامل مؤثر بر انعکاس طیفی این گونه شامل تراکم گیاه و حاصلخیزی خاک (میزان نیتروژن) مورد بررسی قرار گرفته است. خصوصیات طیفی برگ و تاج گیاه در طول فصل رویش با طیف نگار بررسی شده و نتایج نشان داده که با کاهش میزان نیتروژن خاک، میزان کلروفیل موجود در برگ نیز کاهش پیدا کرده و انعکاس در محدوده مرئی بیشتر شده است. در محدوده‌های مادون قرمز نزدیک و سبز خصوصیات طیفی این گیاه با بقیه گیاهان متفاوت است. پس از شبیه‌سازی انعکاس طیفی تاج گیاه از انعکاس برگ توسط مدل SAIL مشخص شد که تفاوت طیفی این گیاه با سایر گونه‌ها در طول موج‌های ۷۲۰، ۸۰۰ و ۵۵۰ نانومتر

<sup>1</sup> Sturb

<sup>2</sup> Daughtry & Walthall

می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان داده که تمایز این گونه از گونه‌های دیگر در توده‌های متراکم و خالص نسبت به توده‌های کم تراکم و ناخالص، بهتر انجام می‌شود.

**بلك بون (۱۹۹۸a)** با محاسبه نسبت درصد انعکاس طیفی در طول موج‌های قرمز و مادون قرمز به درصد انعکاس طیفی طول موج‌های نظیر در نمونه مبنا (میانگین ۱۵ منحنی طیفی از برگ‌های بالغ) به چگونگی رابطه شاخص‌های طیفی  $RARS_a$ ،  $RARS_b$  و  $RARS_c$  به ترتیب با غلظت کلروفیل a و b و کاروتنوئید پرداخته است. ضریب تعیین این رابطه خطی در غلظت پایین کلروفیل ( $50 \text{ mg/m}^2$ ) به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۸۸ و ۰/۲۴ بوده است. در این تحقیق از شاخص طیفی SIPI<sup>۱</sup> نیز استفاده و در مقایسه با شاخص طیفی  $RARS_c$  طول موج ۴۴۵ نانومتر جایگزین طول موج ۵۰۰ نانومتر، شده است. در این صورت در یک رابطه لگاریتمی ضریب تعیین به میزان ۰/۸۵، افزایش پیدا کرده است. در این مطالعه همچنین به بررسی نقطه لبه قرمز با میزان کلروفیل و کاروتنوئید نیز پرداخته شده و ضریب تعیین این رابطه برای کلروفیل معادل ۰/۸۶ بوده در حالیکه برای کاروتنوئید هیچ گونه ارتباط معنی‌داری دیده نشده است. علت این نکته جذب کاروتنوئید در طول موج‌های آبی ذکر شده است.

**بلك بون (۱۹۹۹)** به بررسی ارتباط بین انعکاس طیفی برگ و تاج پوشش چهار گونه درختی (راش، افرا؛ بلوط و شاه بلوط هندی) با غلظت کلروفیل پرداخته است. در این تحقیق از روش مشتق‌گیری منحنی انعکاس طیفی استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داده که ارتباط خوبی بین انعکاس طیفی در طول موج‌های مرئی به خصوص سبز و غلظت کلروفیل وجود دارد. نتایج حاصل از شاخص‌های طیفی به کار گرفته شده از جمله شاخص طیفی SIPI نیز در همین راستا بوده است. عملکرد شاخص‌های طیفی در دو دامنه متفاوت کلروفیل کمتر از  $50 \text{ mg/m}^2$  و بیشتر از این غلظت متفاوت می‌باشد. به طوری که در شاخص‌هایی با استفاده از طول موج‌های ۶۷۵ نانومتر (منطقه جذب کلروفیل a) و ۷۰۰ نانومتر (نقطه میانی محدوده لبه قرمز) هیچ گونه ارتباطی در غلظت بیش از  $50 \text{ mg/m}^2$  دیده نمی‌شود. در مقابل با کاهش غلظت کلروفیل (کمتر از  $50 \text{ mg/m}^2$ ) مقادیر شاخص طیفی  $PARS_a$  بیشتر می‌شود. این نتایج با نتایج شاخص طیفی SIPI در دو دامنه غلظت کلروفیل همسو می‌باشد. به طوری که با افزایش نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a به مقادیر SIPI نیز افزوده می‌شود. نتایج رابطه این شاخص طیفی با کلروفیل در مقیاس تاج پوشش (به منظور بررسی شاخص سطح برگ)، چندان مطلوب نبوده است. علت آن متفاوت بودن غلظت کلروفیل در مقیاس برگ و تاج پوشش، بیان شده است.

<sup>1</sup> Structure Insensitive Pigment Index

**کوکالی و کلارک<sup>۱</sup> (۱۹۹۹)** در مطالعه انجام شده با هدف برآورد میزان غلظت نیتروژن، لیگنین و سلولز گونه‌های جنگلی سوزنی برگ، پهن برگ و برنج در رویشگاه‌های مختلف از نظر دما از داده‌های طیف سنجی زمینی استفاده نموده‌اند. تفاوت طیفی گونه‌ها با استفاده از مقایسه شکل منحنی طیفی گونه‌ها در باندهای انتخاب شده با استفاده از تبدیل منحنی طیفی به روش CR بررسی شده است. بر اساس انعکاس طیفی تعدادی از نمونه‌ها رابطه بین طول موج‌های مرتبط با غلظت نیتروژن، سلولز و لیگنین بررسی شده و بهترین طول موج‌ها با استفاده از روش رگرسیون گام به گام انتخاب شده است. در مرحله دوم ضریب همبستگی در یک رابطه خطی بین انعکاس طیفی در طول موج‌های انتخاب شده با غلظت نیتروژن، سلولز و لیگنین گونه‌های رویشگاه‌های مختلف محاسبه شده است. در مرحله سوم بر اساس رابطه‌های معنی دار به دست آمده و طول موج‌های به دست آمده در مرحله‌های قبل، غلظت مواد بیوشیمیایی برگ با استفاده از نمونه‌های باقی مانده و بر اساس مدل به دست آمده، برآورد شده است. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین ضریب همبستگی برای نیتروژن در محدوده‌های طیفی ۱۷۳۰، ۲۱۰۰ و ۲۳۰۰، معادل ۰/۹۵ تا ۰/۷۵ می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داده که اثرات عوامل جانبی بر روی انعکاس طیفی برگ از جمله خطای دستگاه، اثرات جوی، اثر انعکاس زمینه (خاک و آشکوب‌های زیرین)، با استفاده از روش تبدیلی حذف پیوسته به حداقل می‌رسد. در این مطالعه کاربرد روش‌های مختلف جهت تعیین میزان تغییرات منحنی طیفی نسبت به رطوبت شرایط جوی و انعکاس خاک نیز بررسی شده است. این روش‌ها شامل حذف پیوسته، مشتق‌های اول و دوم منحنی طیفی و همچنین منحنی اولیه انعکاس طیفی بوده‌اند.

**دات (۱۹۹۹)** با هدف تصحیح اثر نور پخش ناشی از ساختار سلولی برگ در سطح و درون سلول بر منحنی انعکاس طیفی، به مطالعه و انتخاب طول موج‌های مناسب مستقل از این عامل و تعریف شاخص‌های طیفی حساس به کلروفیل گونه‌های اکالیپتوس پرداخته است. نور پخش منجر به افزایش ارزش ثبت شده (additive) و تغییرات چند جانبه (multiplicative) یا تغییر شیب منحنی انعکاس طیفی می‌شود. معمولاً روش‌های تبدیل منحنی طیفی شامل مشتق گیری (اول و دوم) و نسبت گیری‌های طیفی منجر به کاهش اثر نور پخش می‌شود. اثر این عامل در طول موج‌های متفاوت یکسان نمی‌باشد. از این رو امکان انتخاب بهترین طول موج حساس به غلظت کلروفیل، با مطالعه اثر نور پخش از طریق تصحیح این عامل بر روی منحنی‌های اولیه و مشتق اول و دوم انعکاس طیفی، همچنین نقطه لبه قرمز فراهم شده است. در این مطالعه از نسبت ساده  $D_{1(704)}/D_{1(754)}$  منحنی مشتق اول و نسبت ساده  $D_{2(712)}/D_{2(788)}$  منحنی مشتق دوم برای تعیین میزان غلظت کلروفیل برگ‌های اکالیپتوس و از موقعیت لبه قرمز برای برآورد میزان غلظت کلروفیل آن‌ها استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داده که نمودار ضرایب همبستگی بین کلروفیل و

<sup>1</sup> Kokali and Clark

انعکاس طیفی در دامنه طول موج‌های مورد مطالعه بعد از تصحیح منحنی طیفی از نظر نور پخش بهبود پیدا کرده و ضرایب همبستگی افزایش پیدا می‌کنند. انعکاس طیفی در طول موج ۷۱۰ نانومتر حداکثر حساسیت را نسبت به غلظت کلروفیل نشان داده است. در حالیکه در طول موج ۵۵۰ نانومتر تقریباً حساسیتی دیده نمی‌شود. تغییرات انعکاس طیفی در طول موج‌های ۴۹۰ و ۶۸۰ نانومتر نسبت به تغییرات غلظت کلروفیل ثابت می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده حساسیت شاخص طیفی جدید  $(r^2=0.85)$   $\frac{R_{850} - R_{710}}{R_{850} - R_{680}}$  نسبت به دیگر شاخص‌های طیفی مورد مطالعه، نقطه لبه قرمز و منحنی‌های طیفی حاصل از روش‌های تبدیلی (مشتق‌های اول و دوم) بهتر بوده به طوری که کمترین تاثیر را از نور پخش شده پذیرفته است. به عبارتی دیگر این شاخص طیفی اثر هر دو عامل منفی بر منحنی انعکاس طیفی گونه از جمله افزایشی و چندجانبی را کاهش داده یا حذف کرده است.

**ون اردت<sup>۱</sup> (۲۰۰۰)** در پایان نامه کارشناسی ارشد خود به تمایز طیفی شش گونه درختی سوزنی برگ و پهن برگ در ویرجینیا آمریکا پرداخته است. ابتدا با استفاده از فیلترهای مختلف پردازش اولیه بر منحنی‌های طیفی انجام شده و سپس با استفاده از تحلیل تشخیص گام به گام، طول موج‌های مناسب را برای تفکیک گونه‌ها در سطح پهن برگ و سوزنی برگ، انتخاب کرده است. روش تحلیل تشخیص کانونیکال ( Canonical discriminate analysis) جهت تمایز گونه‌ها در دو سطح یاد شده، انتخاب شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از تمامی دامنه طول موج الکترومغناطیسی برای تفکیک شش گونه لازم است.

**یانگ و چنگ<sup>۲</sup> (۲۰۰۱)** خصوصیات طیفی گیاه برنج را با شدت‌های مختلف بیماری (۶ سطح) توسط طیف نگار بررسی نموده‌اند. تفاوت منحنی انعکاس طیفی گیاه در سطوح مختلف بیماری در ۱۲ طول موج بیشتر بوده است. نتایج نشان داده که در محدوده طول موج ۹۲۵-۷۳۷ و مرئی این تفاوت بیشتر است. این اختلاف ناشی از تغییر غلظت رنگدانه‌ها، کلروفیل و میزان آب موجود در گیاه می‌باشد. در این تحقیق از روش تحلیل رگرسیون و محاسبه ضریب همبستگی بین شاخص‌های طیفی و سطوح مختلف بیماری گیاه استفاده شده است. تفاوت انعکاس طیفی گیاه در سطوح مختلف بر اساس مقایسه شاخص طیفی NDVI نیز صورت گرفته است.

**ریچاردسون و همکاران (۲۰۰۲)** با هدف برآورد میزان غلظت کلروفیل برگ درخت توس، منحنی انعکاس طیفی این گونه را در دامنه طول موج ۳۰۶-۱۱۳۸ نانومتر در شرایط آزمایشگاهی تهیه کرده‌اند. در این تحقیق حساسیت شاخص‌های طیفی متعددی در رابطه با غلظت کلروفیل بررسی شده است. شاخص طیفی NDchl و

<sup>1</sup> Van Aardat

<sup>2</sup> Yang & Cheng

شاخص طیفی RII بهترین حساسیت را به نسبت به کلروفیل این گونه نشان داده است. شاخص طیفی NDchl بر اساس دو شاخص استاندارد و مهم حساس به غلظت کلروفیل در سنجش از دور تحت عنوان نسبت ساده SR و تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی NDVI محاسبه شده است. به طور کلی در شاخص طیفی NDVI از طول موج‌های ۷۵۰ برای محدوده مادون قرمز و ۶۸۰ برای محدوده قرمز استفاده می‌شود. با پیشرفت و بهبود دقت دستگاه طیف سنج و افزایش توان تفکیک طیفی آن از طول موج‌های دیگری که حساسیت بیشتری به دامنه وسیعی از غلظت کلروفیل دارند، نیز استفاده می‌شود. در این مطالعه با تغییر طول موج‌های یاد شده به ۷۵۰ و ۷۰۵ شاخص طیفی NDVI به NDchl تغییر یافته و نتایج بهتری را نشان داده است. در شاخص طیفی RII از مجموعه طول موج‌های حساس به غلظت کلروفیل در محدوده لبه قرمز از ۷۰۵ تا ۷۵۰ نانومتر استفاده شده است. منطق استفاده از این محدوده طیفی بر اساس تحقیقات انجام شده حساسیت آن به تغییرات ساختار سلولی برگ و کم بودن میزان خطا می‌باشد. نتایج این تحقیق ارتباط قوی و منفی انعکاس در محدوده مرئی را با میزان کلروفیل نشان داده است. این نتیجه بیانگر این است که برگ‌های با غلظت کلروفیل بیشتر، نور بیشتری را در این محدوده طیفی جذب نموده و از این رو میزان انعکاس طیفی آن‌ها کمتر است. نتایج این تحقیق ارتباط قوی ( $R^2 = 0/95$ ) مجموعه کلروفیل برگ را با مشتق اول محدوده لبه قرمز بین ۷۲۱ و ۷۴۴ نانومتر نشان داده است. در این بین طول موج ۷۳۰ نانومتر قوی‌ترین رابطه را با کلروفیل برگ نشان می‌دهد. در این مطالعه مدل حاصل از ارتباط کلروفیل با حساس‌ترین شاخص‌های طیفی به دست آمده، با استفاده از نیمی از داده‌های مورد مطالعه اعتبار سنجی شده و RMSE برای مجموعه کلروفیل a و b به ترتیب ۰/۰۰۳۱ و ۰/۰۰۲۱ و ضریب تعیین معادل ۰/۹۶ و ۰/۹۷  $R^2 =$  به دست آمده است.

**دانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۲)** طیف نگاری را به عنوان یک روش سریع و حساس جهت مشخص نمودن اکوسیستم‌هایی که در معرض آلودگی اتیلن گلوکول (EG) قرار می‌گیرند، معرفی نموده‌اند. در این تحقیق به بررسی انعکاس طیفی خزه (*Lemna gibba*) در شرایط آزمایشگاهی و در تیمارهایی با غلظت متفاوت EG در طول ۸ روز پرداخته شده است. نتیجه این تحقیق نشان داده که با افزایش میزان EG، انعکاس طیفی برگ در محدوده ۴۵۰-۸۵۰ نانومتر کاهش می‌یابد. این تغییرات در غلظت‌های مختلف EG در طول موج‌های خاص، تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهند. هر چه بر میزان غلظت EG و روزهایی که در معرض این ماده قرار می‌گیرد افزوده می‌شود، تفاوت‌ها در دامنه طیفی گسترده‌تری معنی‌دار می‌شود.

<sup>1</sup> Dong

**کوپس<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۲)** در استرالیا به تجزیه طیفی سه گونه اکالیپتوس در شرایط آزمایشگاهی در دو قطعه نمونه با گونه‌های سالم و بیمار پرداخته‌اند. در این تحقیق به منظور بررسی وضعیت سلامت گیاه در دو مقیاس برگ و تاج درخت از شاخص طیفی Datt و نسبت ساده  $R_{850}/R_{710}$  حاصل از داده‌های طیف سنج و سنجنده هوایی ابر طیفی CASI استفاده شده است. با استفاده از شاخص‌های طیفی تعیین شده، میزان تأثیر عوامل مؤثر در انعکاس طیفی تاج از جمله زیر آشکوب، خاک و سایه نیز بررسی شده است. ارتباط خوب به دست آمده بین میزان کلروفیل برآورد شده و شاخص‌های طیفی مورد مطالعه نشان می‌دهد که شاخص طیفی  $R_{850}/R_{710}$  و Datt می‌توانند در تعیین درصد کلروفیل تاج پوشش مناسب باشند اما برای تمایز گونه‌های سالم و بیمار از یکدیگر به لحاظ وجود پیکسل‌های مخلوط (با خاک و زیر آشکوب) قابل استفاده نیستند.

**هابودان<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۲)** میزان کلروفیل پوشش گیاهی علفی را با مدل پیشنهادی توسط داده‌های طیف سنجی زمینی و ابر طیفی سنجنده هوایی CASI برآورد نموده‌اند. در این تحقیق میزان حساسیت شاخص‌های طیفی TCARI/OSAVI با کلروفیل بررسی شده و نتیجه بررسی این رابطه ضریب تعیین  $R^2=0/97$  را نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق رابطه معنی‌داری ( $R^2=0/80$ ) بین میزان کلروفیل برآورد شده و اندازه‌گیری شده را با استفاده از داده‌های طیف سنجی نشان می‌دهد.

**موتانگا و همکاران (۲۰۰۳)** با استفاده از داده‌های طیف نگاری در شرایط آزمایشگاهی به بررسی انعکاس طیفی گونه مرتعی (*Cenchrus ciliaris*) در طی چهار هفته در تیمارهایی با غلظت مختلف نیتروژن پرداخته‌اند. هدف از این تحقیق تهیه نقشه‌ی کیفیت علوفه با استفاده از داده‌های ابرطیفی سنجنده هوایی Hymap بوده است. در این تحقیق از روش تبدیل CR برای بارز کردن تفاوت‌ها در محدوده‌های مختلف مادون قرمز نزدیک و میانی استفاده شده است. برای بررسی تفاوت معنی‌دار منحنی‌های طیفی از روش آماری تحلیل واریانس استفاده شده است. نتیجه این تحقیق نشان داده است که محدوده‌های ۶۴۰-۳۵۵ و ۷۰۰-۶۸۵ نانومتر دارای بیشترین حساسیت نسبت به تغییر نیتروژن و میزان کلروفیل بوده است. منحنی طیفی گیاه خصوصاً در محدوده آبی و سبز تغییرات زیادی را در طی مراحل رویشی گیاه (در ۴ هفته) به علت تغییر در میزان رنگدانه‌ها نشان داده است. نتایج این تحقیق با توجه به پاسخ متفاوت طیفی گیاه در زمان‌های مختلف رویش و در شرایط حاصلخیزی مختلف، اهمیت در نظر گرفتن زمان طیف سنجی و شرایط رویشگاهی را در استفاده از داده‌های ابرطیفی مطرح می‌کند.

<sup>1</sup> Coops

<sup>2</sup> Haboudane

**اسمیت<sup>۱</sup> و اسکیدمور (۲۰۰۳)** تفاوت طیفی ۲۷ گونه مردابی را با استفاده از داده‌های طیف نگار در شرایط محیط طبیعی بررسی کرده‌اند. تجزیه و تحلیل‌های این تحقیق در سه مرحله انجام شده است. پس از انجام روش‌های پیش پردازش بر روی منحنی‌ها از جمله نرم کردن (فیلتر)، در مرحله اول تفاوت طیفی بین گونه‌ها از لحاظ آماری در محدوده‌های طول موج‌های مشخصی، بررسی شده است. نتایج این مرحله تفاوت معنی داری را بین گونه‌ها در محدوده‌های طیفی انتخاب شده نشان می‌دهد. در مرحله دوم از روش تبدیل CR استفاده شده و مجدداً تفاوت طیفی بین گونه‌ها بررسی شده است. نتایج نشان داده که تفاوت‌ها در محدوده مرئی بارزتر و در محدوده مادون قرمز میانی و دور نسبت به روش اول بیشتر بوده اما در مقایسه با محدوده مرئی با استفاده از روش تبدیل CR کمتر است. در مرحله سوم ۶ طول موج مناسب بر اساس آنالیز آماری (تست U) در مرحله قبلی انتخاب شده و میزان فاصله بین منحنی‌های پوشش گیاهی با استفاده از روش جفری ماتوزی و باتاچاریا تعیین شده است. نتایج این مرحله نشان داده که محدوده لبه قرمز نقش مؤثری در تفکیک پذیری گونه‌ها داشته است.

**ریچاردسون و همکاران (۲۰۰۳)** کتابخانه طیفی دو گونه سوزنی برگ را در رویشگاه‌های مختلف از نظر ارتفاع از سطح دریا تهیه کرده‌اند. در این مطالعه انعکاس طیفی گونه‌های سوزنی برگ *Picea* و *Picea mariana* در ارتفاع بین ۶۰-۹۳۰ متر و عرض جغرافیایی ۶۸-۶۱ شمالی بررسی شده است. نمونه‌های *P. mariana* از ۲۴ رویشگاه و *P. glauca* از ۳۰ رویشگاه جمع آوری شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده که در کل انعکاس طیفی این دو گونه شبیه هم بوده‌اند. تنها در محدوده‌ی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر، انعکاس برگ‌های *P. mariana* همواره بیشتر از گونه دوم بوده است. دلیل این تفاوت ساختار سطح برگ (چرمی بودن سطح برگ) ذکر شده است. انعکاس طیفی برگ در محدوده‌ی مرئی به طور کلی برای هر دو گونه با افزایش ارتفاع و عرض جغرافیایی افزایش پیدا کرده است. شاخص‌های طیفی مورد استفاده در این تحقیق شامل VI, Chl NDI و PRI نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع و عرض جغرافیایی زردی سوزن‌ها افزایش می‌یابد و میزان کلروفیل و بعضی رنگدانه‌ها کاهش می‌یابد. این روند در مورد هر دو گونه وجود دارد. اما در *P. glauca* تغییرات طیفی به طور معنی داری در مقایسه با گونه دیگر کمتر است. با استفاده از رگرسیون چند متغیره، طول جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا ۲۵ تا ۴۵٪ از واریانس کلی در شاخص‌های طیفی مطالعه شده را نشان می‌دهند. علت تفاوت بین دو گونه در شرایط رویشگاهی متفاوت، حساسیت بیشتر گونه *P. mariana* نسبت به تنش‌های ناشی از تغییر عوامل محیطی مانند زهکشی و میکروتوپوگرافی است، بیان شده است.

<sup>1</sup> Smith

**ریچاردسون و همکاران (۲۰۰۴)** با استفاده از تحلیل چند متغیره به بررسی تفاوت طیفی برگ دو گونه سوزنی برگ (پسه آ و نوئل) در مناطق رویشگاهی متفاوت از لحاظ ارتفاعی پرداخته‌اند. انعکاس طیفی دو گونه یاد شده در محدوده طیفی ۲۵۰۰-۴۰۰ نانومتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه از رگرسیون PLS<sup>۱</sup> برای پیش بینی احتمال تعلق منحنی انعکاس طیفی هر نمونه به گونه‌های مورد بررسی در شرایط رویشگاهی مورد مطالعه و همچنین برگ هر گونه در موقعیت مختلف تاج (نور و سایه) استفاده شده است. نتایج این تحقیق در مقایسه با تحقیقات قبلی نشان داده که توانایی رگرسیون PLS نسبت به آزمون‌های آماری دیگر به علت حجم زیاد داده‌های طیفی، اطلاعات زیاد و همچنین همپوشانی عوامل متفاوت تأثیر گذار بر منحنی طیفی در هر طول موج بیشتر است. در این مطالعه از روش‌های تبدیل منحنی طیفی از قبیل مشتق اول و دوم نیز استفاده شده است. انجام رگرسیون PLS بر روی منحنی مشتق اول نسبت به مشتق دوم و منحنی اولیه انعکاس طیفی، نتایج بهتری را نشان داده است. نتایج این تحقیق تفکیک خوب این دو گونه را از یکدیگر و همچنین برگ هر گونه در موقعیت نور و سایه تاج را نشان می‌دهد. نمونه‌های مربوط به رویشگاه‌های ارتفاعی پایین‌بند از بالا‌بند به خوبی تفکیک شده اما بین نمونه‌های میان‌بند با بالا‌بند و پایین‌بند تداخل طیفی دیده می‌شود. در این تحقیق استفاده از داده‌های جنبی مانند خصوصیات بیوشیمیایی برگ از قبیل رنگدانه‌های مختلف و استفاده از طول موج‌های مرتبط برای تفکیک هر چه دقیق‌تر گونه‌ها پیشنهاد شده است.

**موتانگا و اسکیدمور (۲۰۰۴)** در بررسی و برآورد میزان زی توده گیاهان علوفه‌ای ضمن استفاده از شاخص طیفی NDVI به جای طول موج‌های قرمز و مادون قرمز که در تاج متر اکم و شاخص سطح برگ زیاد به حد اشباع جذب طیفی می‌رسند، از طول موج‌های مادون قرمز در محدوده لبه قرمز از ۷۵۰ تا ۷۰۰ و طول موج‌های بالاتر در محدوده ۷۸۰ تا ۷۵۰ نانومتر استفاده کرده‌اند. در رابطه بررسی شده شاخص طیفی تفاوت نرمال شده تغییر یافته (MNDVI)<sup>۲</sup> با میزان زی توده، ضریب همبستگی ۰/۷۷ و معنی دار می‌باشد، در حالیکه برای NDVI متداول ۰/۲۶ می‌باشد. دو شاخص طیفی SR<sup>۳</sup> و TVI<sup>۴</sup> نیز که به طور معمول در ارزیابی زی توده استفاده می‌شوند، بررسی شده‌اند. ضریب همبستگی به دست آمده در رابطه این شاخص‌های طیفی با زی توده به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۷، بوده است. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که به تدریج با پیشرفت سنجنده‌ها و بالا رفتن قدرت تفکیک طیفی و استفاده از طول موج‌های دقیق‌تر و باندهایی با پهنای کمتر حساسیت شاخص‌های طیفی موجود بیشتر می‌شود.

<sup>۱</sup> Partial Least Square

<sup>۲</sup> Modified Normalized Difference Vegetation Index

<sup>۳</sup> Simple Ratio

<sup>۴</sup> Transformed Vegetation Index

**لمایره و همکاران (۲۰۰۴)** تعداد ۵۳ برگ از گونه‌های درختی پهن برگ را در شرایط رویشی مختلف در محدوده ۸۰۰-۴۰۰ نانومتر مورد اندازه‌گیری طیفی قرار داده و سپس غلظت کلروفیل آن‌ها را در آزمایشگاه اندازه‌گیری کرده‌اند. در این تحقیق ۶۰ شاخص طیفی حساس به غلظت کلروفیل که در سال‌های ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۴ ارائه شده بودند، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در این بین ۱۴ شاخص طیفی بهترین نتیجه را نشان داده است. نتایج این تحقیق نشان داده که شاخص‌هایی که در آن‌ها از طول موج‌های محدود لبه قرمز استفاده شده‌اند به خوبی می‌توانند معرف کلروفیل گیاه باشند. شاخص‌های طیفی mSR و mND که با استفاده از اندازه‌گیری طیفی و داده‌های شبیه‌سازی شده بر اساس مدل PROSPECT محاسبه شده، کمترین RMSECV<sup>۱</sup> را در برآورد میزان کلروفیل با استفاده از مدل ارائه شده نشان داده است. در این تحقیق موقعیت لبه قرمز بر اساس مشتق اول و دوم منحنی طیفی در رابطه با میزان غلظت کلروفیل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داده است که در گونه‌های با غلظت کم یا گونه‌هایی که دامنه گسترده‌ای از غلظت کلروفیل دارند با کاهش میزان کلروفیل نقطه لبه قرمز به سمت طول موج‌های پایین‌تر و در گیاهانی با غلظت بیشتر کلروفیل، نقطه لبه قرمز به سمت طول موج‌های بالاتر جابجا می‌شود.

**زارکو تجادا و همکاران (۲۰۰۵a)** به مطالعه شاخص‌های طیفی حساس به غلظت کلروفیل در سطوح برگ و تاج پوشش پرداخته‌اند. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داده که شاخص‌های طیفی مناسب در سطح برگ الزاماً همان نتیجه را در سطح تاج پوشش نشان نمی‌دهد. زیرا در بحث تاج پوشش عناصری چون انعکاس تاج پوشش زیر آشکوب، هندسه تاج و ساختار آن، انعکاس پوشش کف و خاک جنگل نیز مطرح می‌باشد. از این رو شاخص‌های طیفی متفاوتی در خصوص حذف و یا کاهش اثر زمینه تعیین و تعریف شده است. در این مطالعه رابطه بین کلروفیل a و b و ab و کاروتنوئید و نسبت‌های آن‌ها با ۳۶ شاخص طیفی موجود و مرتبط با پوشش‌های گیاهی مختلف بررسی شده است. در این بین شاخص‌های طیفی ZM<sup>1, 2, 3</sup>, Vogelmann<sup>1, 2, 3</sup>, GM<sup>1,2</sup> و BGI<sup>2</sup> به ترتیب با ضریب تعیین ۰/۸۹، ۰/۸۹، ۰/۸۷، ۰/۸۷، ۰/۸۸، ۰/۸۵ و ۰/۸۵ در رابطه خطی بهترین نتایج را نشان داده‌اند. شاخص‌های طیفی معمول مانند NDVI، SR، mSR نتایج خوبی در مقایسه با شاخص‌های طیفی ترکیبی و لبه قرمز به همراه نداشته‌اند. در این مطالعه شاخص طیفی PRI<sup>3</sup> نتایج بهتری را ( $R^2 = 0/50$  در رابطه خطی) نسبت به PRI<sup>2</sup> و PRI<sup>1</sup> به همراه داشته است. شاخص طیفی SIPI نیز در رابطه با کاروتنوئید تنها در یک رابطه غیر خطی  $R^2 = 0/49$  را نشان می‌دهد که چندان قابل توجه نمی‌باشد.

<sup>1</sup> Root Mean Square Error of Cross-Validation

**کلورز و همکاران (۲۰۰۵)** به بررسی الگوی تغییرات غلظت نیتروژن و زی توده تاج گیاهان علوفه‌ای با استفاده از طیف سنجی زمینی پرداخته‌اند. در این تحقیق ابتدا میزان زی توده تر و خشک، همچنین میزان نیتروژن برگ در پلات‌هایی اندازه‌گیری شده است. سپس اندازه‌گیری طیفی در همان پلات‌ها انجام شده است. با توجه به حجم زیاد اطلاعات و تعداد زیاد طول موج‌ها روش‌های مختلفی برای انتخاب مناسب‌ترین طول موج‌ها استفاده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مقایسه‌ی ضریب همبستگی انعکاس طیفی در هر طول موج با متغیرها (نیتروژن و زی توده) نشان می‌دهد که محدوده‌های طیفی مادون قرمز نزدیک و لبه قرمز برای تعیین میزان زی توده تر و خشک، محدوده مادون قرمز میانی و دور برای پیش بینی میزان مواد خشک و محدوده طیف مرئی سبز و لبه قرمز برای برآورد غلظت نیتروژن مناسب هستند.

**شلف<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵)** به ارزیابی قابلیت داده‌های طیف سنجی زمینی و ابر طیفی سنجنده هوایی HyMap جهت برآورد غلظت نیتروژن، کلروفیل و آب موجود در توده‌های پسته‌آ پرداخته‌اند. هدف از این تحقیق تعیین مدل‌های مناسب برای برآورد میزان مواد شیمیایی برگ و مقایسه روش‌های مختلف مشتق‌گیری منحنی‌های انعکاس طیفی بوده است. این روش‌ها جهت انتخاب بهترین محدوده طول موج‌ها در ارزیابی مواد شیمیایی برگ و تاج درخت می‌باشد. نتیجه مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی طیف سنج و سنجنده هوایی نشان داده که میزان کلروفیل و نیتروژن به خوبی می‌تواند توسط هر دو نوع داده برآورد شود. در مورد میزان آب موجود در برگ‌ها، داده‌های طیف سنجی به لحاظ عدم وجود خطاهای جوی، نتیجه بهتری داده است.

**شپمن و همکاران (۲۰۰۵b)** با استفاده از داده‌های طیف سنجی و ابر طیفی سنجنده هوایی HyMap وضعیت توالی پوشش گیاهی جنگل‌های حاشیه رودخانه‌های در واخنینگن هلند را با استفاده از مدلی پیش بینی کرده‌اند. هدف این تحقیق شبیه‌سازی میزان زی توده و وضعیت آن تا سال ۲۰۵۰ با استفاده از مدل تعیین شده بوده است. با ایجاد ارتباط بین شاخص سطح برگ و زی توده حاصل از داده‌های ابرطیفی و برآورد شاخص سطح برگ، این امکان فراهم شده است. نتایج این تحقیق نشان داده که این داده‌ها می‌تواند به طور مؤثر به عنوان ورودی در مدل‌های اکولوژیکی به کار گرفته شوند.

**گودوین<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۵)** با استفاده از داده‌های ابر طیفی سنجنده هوایی (CASI\_2) با قدرت تفکیک طیفی و مکانی زیاد (۸۰ cm) جنگلهای اکالیپتوس را در حد گونه طبقه‌بندی نموده‌اند. تفاوت‌های آماری بین منحنی

<sup>1</sup> Schlerf

<sup>2</sup> Goodwin

انعکاس طیفی درختان در هر گونه به طور مجزا و همچنین بین گونه‌ها با استفاده از آنالیز واریانس بررسی شده است. صحت کلی حاصل از طبقه‌بندی ۴ گونه اکالیپتوس با دو گونه دیگر و طبقه خاک و سایه ۸۰ و ضریب کاپا ۸۱/۷ بوده است. با در نظر گرفتن همه گونه‌های اکالیپتوس در یک طبقه و بقیه گونه‌ها در طبقه دیگر صحت طبقه‌بندی و کاپا به ترتیب به ۹۵/۴ و ۸۸/۸ افزایش پیدا کرده است. بهترین طول موج‌ها در تفکیک گونه‌های اکالیپتوس به طور مجزا ۷۰۰ و ۷۲۱ نانومتر بوده است. در این تحقیق وضعیت برگ در تاج در دو موقعیت نور و سایه نیز بررسی شده‌اند. هر چند منحنی طیفی برگ‌های نور انعکاس کمتری نسبت به منحنی طیفی برگ‌های سایه داشته است اما این تفاوت‌ها معنی‌دار نمی‌باشد. در رابطه با تفکیک گونه‌های گردو و اکالیپتوس با گونه‌های دیگر باندهای ۵۵۰، ۸۵۰ و ۷۸۰ و ۷۵۹ نانومتر بهترین تفکیک پذیری طیفی را نشان داده است. بعضی از گونه‌ها در طول موج‌های ۵۵۰ و ۷۰۰ و ۷۲۱ و ۴۴۹ و ۶۳۵ و ۶۷۹ و ۷۰۰ و ۷۲۱ و ۷۴۰ و ۷۵۹ و ۷۸۰ و ۸۵۰ تفاوت معنی‌داری را با یکدیگر نشان می‌دهند.

**استیمسون<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵)** مشخصه طیفی دو گونه کاج و ارس (*Pinus edulis* و *Juniperus monosperma*) را در رویشگاه‌های متفاوت از لحاظ میزان بارندگی تهیه نموده‌اند. در این مطالعه از ۵ شاخص طیفی حساس به رطوبت برگ استفاده شده است. در رابطه با گونه کاج شاخص‌های طیفی NDVI، NDWI، روش تبدیلی CR در طول موج ۹۷۰ نانومتر و نقطه لبه قرمز به ترتیب بهترین ارتباط معنی‌دار ( $R^2 = ۰/۴۵$  و  $۰/۵۷$ ،  $۰/۷۱$ ،  $۰/۶۸$ ) را با رطوبت برگ نشان می‌دهند. این رابطه برای گونه ارس ضعیف‌تر ولی معنی‌دار و ضریب تعیین آن برای طول موج ۹۷۰ نانومتر، ۱۲۰۰ نانومتر و NDVI به ترتیب  $۰/۳۷$ ،  $۰/۵۰$  و  $۰/۳۳$  بوده است.

**لوگینبول<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۶)** با هدف طبقه‌بندی و تعیین ۷ گونه باکتری از جنس *Lactobacillus* مجموعاً ۳۷۶ منحنی طیفی را در محدوده طول موج ۱۵۸۰-۸۰۰ و ۲۷۰۰-۳۰۰۰ نانومتر مورد پردازش قرار داده‌اند. در این تحقیق از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) و رگرسیون PLS به منظور فشرده سازی اطلاعات طیفی (۳۱۲ طول موج) در تفکیک و طبقه‌بندی گونه‌های مورد مطالعه استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تحلیل PLS به تنهایی با الگوریتم‌های متفاوت PLS1,2 به علت تداخل طیفی زیاد نمونه‌ها، توانایی تفکیک گونه‌های مورد مطالعه را ندارد در حالیکه با استفاده از روش‌های PCA و PLS2 نتایج بهتری حاصل می‌شود.

**دلوز<sup>۳</sup> (۲۰۰۷)** مطالعه‌ای در رابطه با منابع تغییرات طیفی نمونه‌ها و توانایی داده‌های طیف سنجی در تفکیک تعدادی از گونه‌های پهن برگ تروپیکال انجام داده است. اندازه‌گیری طیفی در شرایط متفاوت رویشی (در هر ماه

<sup>1</sup> Stimson

<sup>2</sup> Luginbühl

<sup>3</sup> de Luz

یکبار اندازه گیری‌های طیفی انجام شده) و در دو سطح برگ و همچنین موقعیت متفاوت برگ در تاج در شرایط نور و سایه انجام شده است. نتایج این تحقیق تفاوت معنی داری را بین مشخصه طیفی سطح زیرین و زیرین برگ در هر یک از گونه‌ها در طول موج‌های خاصی نشان می‌دهد و این نشان دهنده تفاوت ساختاری و ترکیبات بیوشیمیایی برگ‌ها و در نتیجه پاسخ طیفی متفاوت آن‌ها می‌باشد.

**ثورهاگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶)** بر اساس تغییرات منحنی طیفی در محدوده لبه قرمز ناشی از تنش وارد شده به گیاه و تغییر ترکیب و غلظت رنگدانه‌های مختلف، انعکاس طیفی گیاه *Thalassia testudinum* را در شرایط شوری متفاوت با استفاده از شاخص‌های طیفی  $NDVI$ ،  $NDIchl$ ،  $SIPI$ ،  $NDVIchl$  و  $PRI$  بررسی کرده‌اند. در این مطالعه ابتدا کتابخانه طیفی این گونه از برگ‌های نور و سایه همچنین برگ‌های بالغ و جوان تهیه شده است. سپس رفتار طیفی گیاه در تیمارهای مختلف شوری در حالت‌های مراحل مختلف رویشی برگ بررسی شده است. در برگ‌های بالغ نسبت به برگ‌های تازه و جوان میزان  $NDVI$  و  $chl\ NDVI$  در شوری کم کاهش پیدا کرده است که نشان دهنده غلظت بیشتر کلروفیل در برگ‌های جوان نسبت به برگ‌های مسن تر می‌باشد. مقدار بیشتر شاخص طیفی  $SIPI$  در میزان کم شوری بر عکس شاخص‌های طیفی  $NDVI$ ،  $NDI$  و  $chl$  در برگ‌های بالغ نسبت به برگ‌های تازه و جدید، نشان دهنده کاروتنوئید بیشتر در آن‌ها می‌باشد. مقدار شاخص طیفی  $PRI$  در هر دو حالت شوری در برگ‌های بالغ نسبت به برگ‌های جوان کاهش پیدا کرده که نشان دهنده کاهش شدت فتوسنتز برگ‌های بالغ نسبت به برگ‌های جوان است. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد شاخص طیفی  $PRI$  نه تنها نشان دهنده تغییرات غلظت کلروفیل است بلکه مربوط به تغییرات رنگدانه گزانتوفیل می‌باشد و کاهش چشمگیر آن در شرایط تنش گیاه مربوط به کاهش هر دو رنگدانه می‌باشد. به نحوی که نسبت تغییرات مجموعه رنگدانه‌های فعال فتوسنتزی به کلروفیل تنها خیلی بیشتر است. نتایج این مطالعه مقدار شاخص طیفی  $PRI$  را در برگ‌های سایه کمتر از برگ‌های نور نشان می‌دهد که ناشی از کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی و همچنین کلروفیل می‌باشد.

**چو و همکاران (۲۰۰۷)** به برآورد میزان زی توده مراتع با استفاده از داده‌های ابر طیفی سنجنده هوایی پرداخته‌اند. در این تحقیق مدل تعیین شده توسط رگرسیون  $PLS$  بر روی داده‌های طیفی تبدیل شده به روش‌های  $CR$  و مشتق اول منحنی طیفی نتایج بهتری در مقایسه با مدل رگرسیون بر اساس شاخص طیفی  $NDVI$  و موقعیت لبه قرمز، نشان داده است. معمولاً در شاخص طیفی  $NDVI$  و موقعیت لبه قرمز از طول موج‌های محدودی (۷۷۱-۷۴۰)

<sup>1</sup> Thorhaug

استفاده می‌شود در حالیکه استفاده از تمامی دامنه طول موج طیفی در مدل، هم بر اساس روش‌های تبدیلی و هم غیر تبدیلی، امکان دسترسی به اطلاعات بیشتر برای برآورد میزان زی توده فراهم می‌گردد.

**کالاسکا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۷)** مراحل توالی در اکوسیستم جنگلهای تروپیکال را با استفاده از طیف سنجی بررسی کرده‌اند. در این راستا رابطه شاخص‌های طیفی با متغیرهای مرتبط مورد نظر مانند شاخص سطح برگ، تراکم گونه‌ها، تراکم ساقه، ارتفاع و قطر درخت در فصول خشک و سبز بررسی شده است. شاخص‌های طیفی استفاده شده در این تحقیق بیشتر مربوط به عوامل متغیر در تاج پوشش از جمله کلروفیل می‌باشد که در تحقیقات زیادی استفاده شده است. شاخص‌های طیفی تعیین شده با استفاده از باندهای تصاویر ماهواره‌ای Hyperion که دارای ۲۴۲ باند طیفی می‌باشد محاسبه شده و شامل  $ND_{705}$ ،  $ND$  تاج پوشش، نسبت ساده  $SR_{705}$ ، نسبت ساده تاج پوشش  $SR$ ، نسبت ساده تغییر یافته  $mSR$  و شاخص طیفی ساختار تاج (CSI) می‌باشد. در این شاخص‌های طیفی بیشتر از طول موج‌های قرمز و لبه قرمز استفاده شده است. در این مطالعه به اهمیت بررسی طیفی عناصر چوبی و غیر فتوسنتزی درخت به عنوان جزئی از ساختار تاج نیز اشاره شده است. بیشترین ضریب همبستگی در رابطه شاخص‌های طیفی مورد بررسی با متغیرهای مورد نظر مربوط به ارتفاع درخت با شاخص‌های طیفی بوده (۰/۶۶ تا ۰/۶۲) و کمترین مرتبط به تراکم ساقه ۰/۰۵ بوده است.

**مالنوسکی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۸)** در تحقیقی که بر روی گونه سوزنی برگ (Norway Spruce) انجام داده‌اند از شاخص طیفی ANCB حاصل از داده‌های طیفی زمینی و داده‌های سنجنده ابرطیفی هوایی AISA به ترتیب در سطح برگ و تاج گیاه، برای برآورد میزان کلروفیل ab استفاده کرده‌اند. در این مطالعه با استفاده از مدل PROSPECT\_DART انعکاس طیفی برگ از طریق انعکاس طیفی تاج پوشش شبیه سازی شده و میزان کلروفیل در مقیاس برگ با استفاده از این شاخص طیفی، برآورده شده است. نتایج حاصل از این برآورد با یکدیگر مقایسه شده است. ضریب تعیین رابطه بین کلروفیل برآورده شده از شاخص طیفی حاصل از داده‌های طیفی زمینی و داده‌های هوایی بین ۰/۸۱ تا ۰/۸۳ و RMSE آن‌ها بین ۲/۷۲ تا ۳/۲۷ میکروگرم بر سانتی متر مربع به دست آمده است.

**زو و یانگ<sup>۶</sup> (۲۰۰۸)** در تحقیقی که انجام داده‌اند رابطه شاخص طیفی SIPI را با کلروفیل گونه‌های مختلف گیاهی در دامنه وسیعی از غلظت کلروفیل بررسی نموده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که در گونه‌هایی با

<sup>1</sup> Kalacska

<sup>2</sup> Normalized Difference

<sup>3</sup> modified Simple Ratio

<sup>4</sup> Canopy Structure Index

<sup>5</sup> Malenovsky

<sup>6</sup> Xue & Yang

غلظت کم کلروفیل ضریب همبستگی معنی دار می باشد در حالیکه در گونه های دیگر که غلظت بیشتری دارند این رابطه معنی دار نمی باشد. نتیجه این تحقیق بیانگر این موضوع است که طول موج ۶۸۰ نانومتر حساسیت طیفی بیشتری را در گیاهان با غلظت کم کلروفیل نشان می دهد و این طول موج نسبت به غلظت متوسط و زیاد کلروفیل حساس نمی باشد.

**یائو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸)** به منظور برآورد میزان بذر درختان بلوط (*Q. serrata*) در جنگل های ژاپن در طی سه سال و در ماه های مختلف، انعکاس طیفی تاج هر یک از پایه های این گونه را به طور مجزا با استفاده از تصاویر ابر طیفی سنجنده هوایی ASIA در ۷۲ باند طیفی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک (۷۰۴-۸۹۸ نانومتر) مورد بررسی قرار داده اند. در این مطالعه از خوارزمی<sup>۲</sup> B-matrix در فرایند تحلیل PLS برای انتخاب بهترین طول موج ها در این ارزیابی استفاده شده است. نتایج این تحقیق به اهمیت انتخاب ماه های مناسب در طول دوره رویش برای تصویر برداری و برازش بهترین مدل در برآورد میزان بذر درختان اشاره شده است.

---

<sup>1</sup> Yao

<sup>2</sup> Algorithm

# فصل چهارم

## مواد و روش ها

۴-۱-۱- منطقه مورد مطالعه

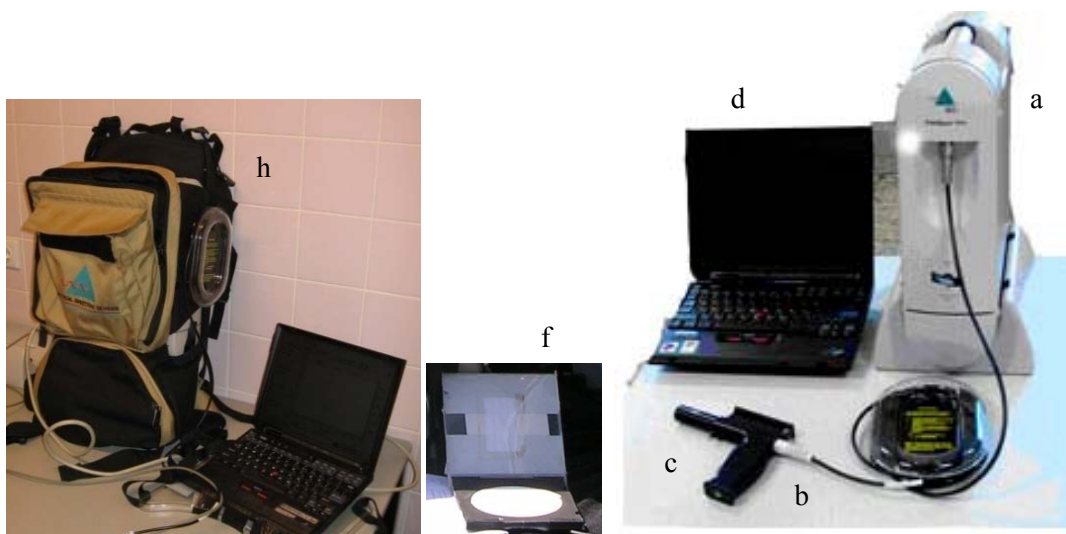
این مطالعه در جنگل آموزشی و پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، واقع در خیرودکنار نوشهر انجام شده است (شکل ۴-۵). این جنگل به وسعت ۸۰۰۰ هکتار به هفت بخش تقسیم شده و در دامنه ارتفاعی ۱۰ تا ۲۲۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است. متوسط میزان بارندگی سالانه در ایستگاه هواشناسی نوشهر ۱۳۵۴/۵ میلی متر و متوسط بیشینه و کمینه دمای ماهانه به ترتیب ۲۹ و ۷/۱ درجه سانتیگراد می باشد. بسیاری از ۸۰ گونه درختی که جوانشیر (۱۹۷۶) برای جنگل های شمال ایران نام برده است در این جنگل یافت می شود. از این بین پنج گونه غالب و مهم از نظر پراکنش مکانی و بومی بودن برای این تحقیق انتخاب شد. گونه راش شرقی به عنوان مهم ترین گونه به صورت راشستان های خالص و مخلوط، گونه غالب جنگل های شمال را تشکیل می دهد. اهمیت این گونه از لحاظ تنوع ژنتیکی، حجم سرپای زیاد و ارزش اقتصادی آن در جنگل های شمال است. با تغییر شرایط خرد اقلیمی، توپوگرافی و ارتفاع از سطح دریا گونه های دیگری به صورت همراه در کنار راش قرار می گیرند. بعد از گونه راش در بین گونه های مورد مطالعه، بیشترین پراکنش و حجم سرپا مربوط به گونه های بلوط و توسکا در اشکوب بالا و ممرز در اشکوب پایین تر می باشند. بلوط در شرایطی که اقلیم خشک تر یا در شرایطی با زهکشی خوب آب، و توسکا برعکس در شرایطی که رطوبت بیشتر است، حضور پیدا می کند. در ارتفاعات پایین گونه بومی انجیلی همراه با راش و ممرز می باشد. گونه انجیلی از نظر اندمیک و خاص منطقه خزری بودن، منطقه فلوریستیک خزری را به عنوان یک منطقه مستقل و مشخص فیتوژئوگرافیک معرفی کرده است (مروی مهاجر و همکاران، ۱۳۸۴). به منظور فراهم نمودن نمونه های طیفی جامع از هر گونه، نمونه های درختی مورد مطالعه از رویشگاه های خاص خود در ارتفاع های مختلف انتخاب شده اند.

۴-۱-۲- دستگاه طیف سنج زمینی

در این تحقیق یک دستگاه طیف سنج زمینی به نام ASD FieldSpec با دامنه طول موج طیفی کامل ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفت. مجموعه این دستگاه به وزن ۱۰ کیلوگرم شامل بخش های زیر است:

- طیف سنج به ابعاد ۳۵×۲۹×۱۳ سانتی متر که شامل سه ثابت در طول موج های ۱۰۰۰-۳۵۰، ۱۸۰۰-۱۰۰۱ و ۲۵۰۰-۱۸۰۱ نانومتر با درجه حساسیت متفاوتی نسبت به تغییرات دما و رطوبت است. اندازه تفکیک طیفی دستگاه در محدوده ۱۰۰۰-۳۵۰ نانومتر ۳ نانومتر، در محدوده ۱۸۰۰-۱۰۰۰ نانومتر ۶ نانومتر و در محدوده ۱۰۰۰-۲۵۰۰ نانومتر ۱۰ نانومتر است. سرعت برداشت هر منحنی طیفی ۰/۱ ثانیه است. برای کسب اطلاعات بیشتر می توان به سایت اینترنتی شرکت ASD ([www.asdi.com](http://www.asdi.com)) مراجعه نمود.

- حسگر فیبر نوری<sup>۱</sup> با میدان دید ۲۵ درجه که با قرار گرفتن در موقعیت عمودی (Nadir) در ارتفاع ۴۰ سانتی متر از نمونه، دایره‌های به قطر ۱۸ سانتی متر را اندازه‌گیری می‌کند. این حسگر از طریق یک کابل به طول ۱/۲ متر، بازتاب نوری را به طیف سنج منتقل می‌کند. به منظور نشانه‌گیری بهتر، حسگر فیبر نوری در بخشی شبیه تفنگ<sup>۲</sup> قرار دارد. - یک نوت بوک برای نمایش و ذخیره داده‌های طیفی با استفاده از نرم افزار مخصوص داده‌های طیف سنجی (RS<sup>۳</sup>). - صفحه سفید مینا<sup>۳</sup> از جنس تفلون به شکل یک لوح فشرده که برای کالیبره کردن دستگاه طیف سنج به کار می‌رود (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱: مجموعه دستگاه طیف سنج شامل a: طیف سنج، b: حسگر فیبر نوری، c: pistol grip، d: نوت بوک، f: صفحه سفید مینا، h: مجموعه دستگاه در کیف مخصوص

<sup>1</sup> Fiber optic sensor

<sup>2</sup> Pistol grip

<sup>3</sup> Spectralon

#### ۴-۱-۳- نمونه‌ها و اندازه‌گیری طیفی

در این مطالعه در مجموع ۱۰۷ درخت از پنج گونه مورد نظر برای اندازه‌گیری طیفی انتخاب شد. موقعیت مکانی هر پایه توسط GPS ثبت شده است. شکل ۴-۵ پراکنش مکانی درختان اندازه‌گیری شده را بر روی تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. از آنجا که عموماً تاج پوشش گونه‌های غالب در معرض دید سنجنده قرار می‌گیرد، برای تهیه کتابخانه طیفی گونه‌ها، درختانی که تاج بالغ داشته و در شرایط سلامت طبیعی قرار دارند، انتخاب می‌شوند. بنابراین این انتخاب با توجه به قرار گرفتن پایه مورد نظر در آشکوب غالب بر اساس قطر برابر سینه و ارتفاع درخت صورت گرفت. در مورد گونه‌های انجیلی و ممرز که عموماً در توده‌هایی مانند راش-ممرز و ممرز-انجیلی در آشکوب زیرین قرار می‌گیرند، پایه‌ای که قطر برابر سینه و ارتفاع بیشتری در میان پایه‌های نظیر خود داشت، انتخاب گردید. به منظور فراهم آوردن شرایط یکسان نمونه‌برداری، از هر پایه درختی سه شاخه در جهتی که تاج بیشترین میزان نور را در طول روز دریافت می‌کند، و سه شاخه در قسمتی از تاج که در بیشتر ساعات نور در سایه قرار می‌گیرد قطع و بلافاصله پس از قطع شاخه‌ها، مجموعه برگ با ساقه‌های آن مورد طیف سنجی قرار گرفت. در مرحله بعد برگ‌ها جدا شده و توده برگی در دایره‌ای به قطر تقریبی ۲۵ سانتی متر روی صفحه‌ای سیاه رنگ فراهم شده و سطح روی برگ مورد اندازه‌گیری طیفی قرار گرفت (شکل ۴-۴ الف). زمینه سیاه (پارچه) باعث جذب نور و مانع رسیدن بازتاب‌های ناشی از پدیده‌های مجاور به سنجنده می‌شود (شکل ۴-۲).

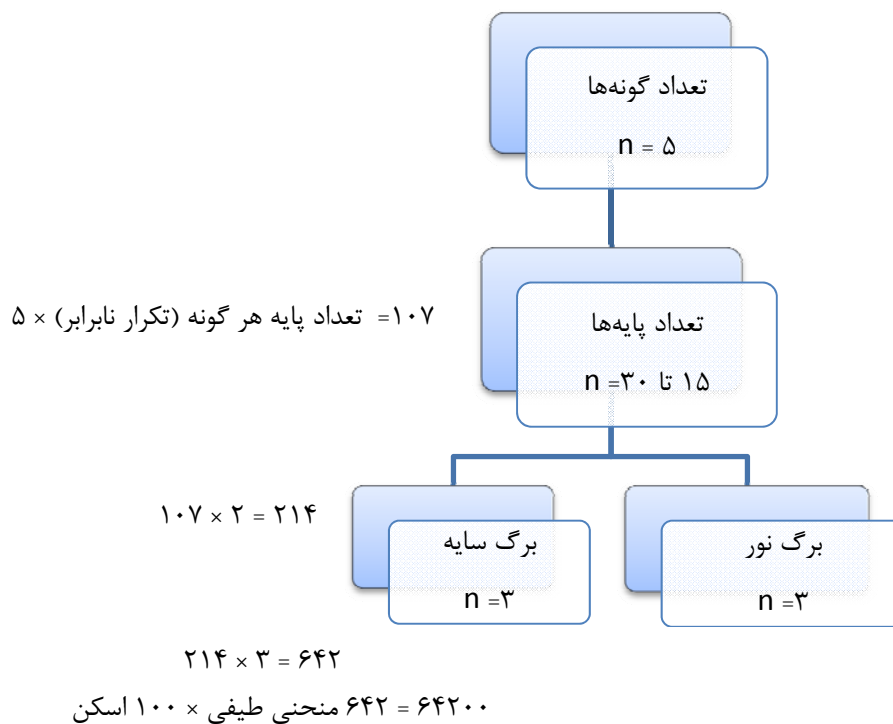
بر اساس هدف تعیین شده در بخش دوم این تحقیق مبنی بر بررسی بازتاب طیفی گونه راش در سه رویشگاه ارتفاعی (پایین بند، میان بند و بالا بند) و تعیین تفاوت طیفی آن، در هر یک از رویشگاه‌های یاد شده تعداد ۱۰ پایه درختی انتخاب شد و تمامی اندازه‌گیری‌ها همانند گونه‌های دیگر انجام گردید.



شکل ۴-۲: توده برگی تهیه شده بر روی پارچه‌ای سیاه رنگ برای اندازه‌گیری طیفی

به علت انجام اندازه‌گیری‌های طیفی در محیط طبیعی، تغییر شرایط جوی از جمله رطوبت، دما و باد می‌تواند منجر به تغییراتی در ثبت بازتاب گردد. از این رو به منظور کاهش اثر عوامل محیطی از هر نمونه ۱۰۰ اسکن (تهیه

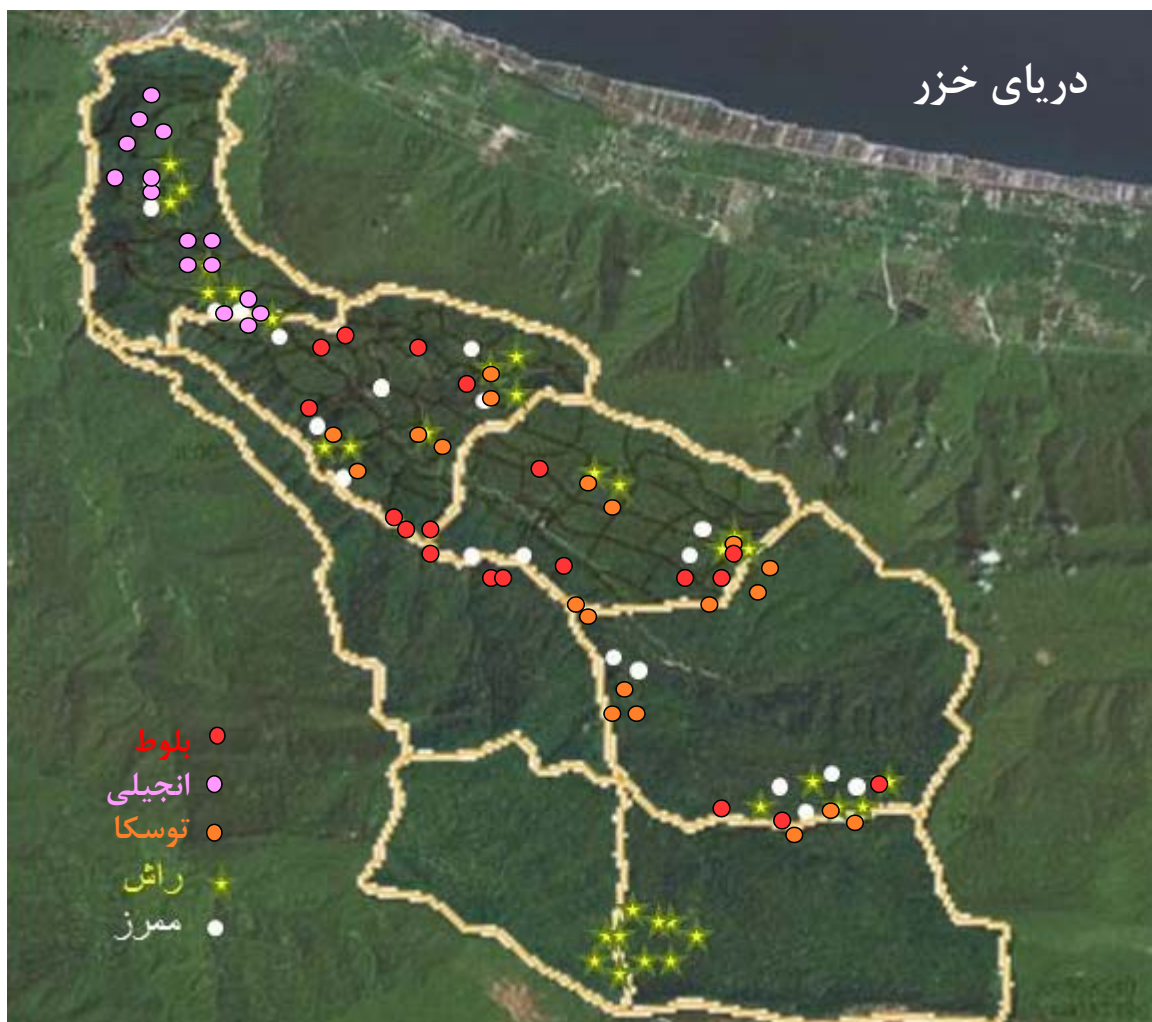
منحنی) پیاپی در کمتر از یک دقیقه انجام شد که بلافاصله به طور خودکار توسط نرم افزار RS<sup>3</sup> موجود بر روی رایانه میانگین گیری شده و به صورت یک منحنی طیفی بر روی صفحه نمایش نوت بوک نشان داده می شود. معمولاً هر اندازه گیری طیفی بدون در نظر گرفتن زمان آماده سازی نمونه و کالیبراسیون دستگاه، کمتر از یک دقیقه به طول می انجامد. جدول ۴-۱ مشخصات نمونه ها و شکل ۴-۳ تعداد نمونه ها را نشان می دهد. مجموعاً ۱۲۸۴ منحنی طیفی از کل نمونه ها (۱۰۷ درخت) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. اندازه گیری ها در طول ماه های مرداد و شهریور سال ۱۳۸۶ انجام گردید. به دلیل بهره گیری از حداکثر نور ممکن و جلوگیری از حضور سایه تاج پوشش درختان، انعکاس طیفی نمونه ها در کنار جاده جنگل و در روزهای آفتابی در ساعات ۱۰-۱۴ در نور مستقیم خورشید انجام شد (شکل ۴-۴ ب). به علت وجود تغییرات لحظه ای شرایط جوی از جمله دما و رطوبت محیط و اثر متفاوت آن بر روی ثبات های دستگاه طیف سنج که منجر به ایجاد خطاهایی در اندازه گیری می شود، این دستگاه با استفاده از صفحه سفید مبنا قبل از هر اندازه گیری کالیبره شد.



شکل ۴-۳: اندازه گیری طیفی و تعداد نمونه های حاصل



شکل ۴-۴: نمونه آماده شده برای اندازه گیری طیفی (الف)، نحوه اندازه گیری در محل (ب)



شکل ۴-۵: پراکنش مکانی درختان اندازه گیری شده بر روی تصویر ماهواره ای منطقه مورد مطالعه

جدول ۴-۱: تعداد و مشخصات کمی نمونه‌های اندازه‌گیری شده

| جمع  | بلوط     | انجیلی  | راش      | ممرز     | توسکا    |                              |
|------|----------|---------|----------|----------|----------|------------------------------|
| ۱۰۷  | ۲۰       | ۱۵      | ۳۲       | ۲۰       | ۲۰       | تعداد پایه درختی از هر گونه  |
| -    | ۷۰۰-۱۳۲۰ | ۲۵۰-۶۰۰ | ۴۰۰-۲۲۰۰ | ۷۰۰-۱۰۰۰ | ۷۵۰-۱۲۵۰ | دامنه ارتفاع از سطح دریا (m) |
| -    | ۴۲-۷۰    | ۲۸-۳۶   | ۴۰-۷۰    | ۳۵-۶۸    | ۳۸-۶۱    | دامنه قطر برابر سینه (Cm)    |
| -    | ۳۵-۴۰    | ۱۵-۲۲   | ۲۵-۳۸    | ۱۵-۲۵    | ۲۷-۳۶    | ارتفاع درخت (m)              |
| ۱۲۸۴ | ۲۴۰      | ۱۸۰     | ۳۸۴      | ۲۴۰      | ۲۴۰      | تعداد منحنی‌های طیفی         |

#### ۴-۱-۴-۱- نرم افزارهای مورد استفاده

در قسمت پردازش‌های اولیه منحنی‌های طیفی از نرم افزارهای SAMS (version 3.2) و RS<sup>3</sup>، به منظور محاسبه سطح برگ گونه‌ها از نرم افزار Image J، از نرم افزارهای SAS، Excel، Minitab و Matlab (toolbox PLS) (دازیکووسکی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۷) در تجزیه تحلیل‌های آماری و از ENVI برای تهیه پایگاه داده کتابخانه طیفی گونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق استفاده شده است.

#### ۴-۲-۲- روش‌ها

##### ۴-۲-۱- شاخص‌های طیفی

همانطور که در بخش کلیات به اهمیت استفاده از شاخص‌های طیفی اشاره شد، مهمترین مزیت آن استفاده از بازتاب طیفی گیاه در طول موج‌های متأثر از عواملی مانند مواد بیوشیمیایی گیاه از جمله کلروفیل، نیتروژن، کاروتنوئید، گزانتوفیل، همچنین رطوبت برگ، ساختار درون و برون سلولی و به طور کلی عملکرد فتوسنتز در گیاه است. از این رو استفاده از شاخص‌های طیفی می‌تواند در بیان علت تفاوت طیفی نمونه‌ها با توجه به ارتباط قوی شاخص طیفی با متغیر مورد نظر، نقش مؤثری داشته باشد. مطالعات زیادی برای تعیین و تعریف شاخص‌های طیفی مناسب در خصوص بررسی تغییرات غلظت رنگدانه‌های مختلف (گامون و همکاران، ۱۹۹۲؛ گیتلسون و همکاران، ۱۹۹۶ و ۲۰۰۳؛ کیمورا<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۴؛ بری<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۸)، رطوبت برگ (ونگ و همکاران، ۲۰۰۸)، شاخص سطح برگ (ویسن و همکاران، ۲۰۰۱)، نیتروژن (لی و همکاران، ۲۰۰۸؛ زو و همکاران، ۲۰۰۸) و بقیه

<sup>1</sup> Spectral Analysis and Management System

<sup>2</sup> Daszykowski

<sup>3</sup> Kimura

<sup>4</sup> Barry

عوامل تأثیرگذار بر منحنی انعکاس طیفی گیاهان انجام شده است. در تحقیق حاضر با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده در این خصوص، تعدادی از این شاخص‌های طیفی که رابطه آماری خوبی را با عوامل یاد شده در بالا نشان داده اند، انتخاب شدند. در شاخص‌های طیفی حساس به تغییرات غلظت کلروفیل به طور معمول از طول موج‌های محدوده لبه قرمز و طول موج‌های جذب کلروفیل در محدوده مرئی، استفاده می‌شود.

تفاوت غلظت کلروفیل می‌تواند مربوط به تفاوت ساختار درون و برون سلولی برگ در گونه‌های مختلف باشد و تغییرات آن نیز متأثر از عواملی چون تفاوت در حاصل‌خیزی رویشگاه و شرایط نوری مختلف برای یک گونه یا حتی یک درخت معین در نقاط مختلف تاج است. در این چنین تحقیق‌ها فرض بر این است که میزان تغییرات بین گونه‌های مورد مطالعه به لحاظ تفاوت ساختار درون و برون سلولی بیشتر از تفاوت درون گونه‌ای یا درون یک پایه می‌باشد (آستین و همکاران، ۱۹۹۳؛ دات ۱۹۹۹). بر این اساس چهار شاخص طیفی مناسب و مرتبط با تغییرات غلظت کلروفیل در بین گونه‌های مختلف انتخاب و محاسبه شده‌اند.

### - شاخص‌های طیفی PRI<sup>۱</sup>

طول موج‌های به کار برده شده در شاخص‌های طیفی فتوستنتر (PRI) (جدول ۴-۲) به طور کلی مربوط به جذب طیفی رنگدانه‌های مؤثر در فتوستنتر از جمله گزانتوفیل است. ارزیابی عملکرد فتوستنتر گیاه یکی از مهمترین مبانی در تشخیص و پیش‌بینی رویش گیاه، مبادله کربن بین اکوسیستم و گیاه، سلامت و ساختار بیوشیمیایی و سلولی گیاه است. از آنجا که چگونگی بازتاب طیفی گیاه به هر یک از عوامل یاد شده بستگی دارد، امروزه بررسی انعکاس طیفی گیاه به عنوان یکی از روش‌های غیر مخرب<sup>۲</sup> امکان دستیابی به اطلاعات مفیدی را در این خصوص فراهم کرده است (اینوو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). غلظت و عملکرد رنگدانه‌های مختلف، رطوبت برگ، شرایط سلامت گیاه از لحاظ استرس کم آبی، محیطی و غیره فرایند فتوستنتر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر چه حساسیت این شاخص طیفی مربوط به چرخه رنگدانه‌های گزانتوفیل در فرایند فتوستنتر می‌باشد اما تحقیقات زیادی نشان داده که ظرفیت فتوستنتر با تغییرات غلظت نیتروژن تغییر می‌کند و با کاهش میزان نیتروژن گیاه از میزان شدت فتوستنتر کاسته می‌شود. در این صورت ارزش این شاخص طیفی کمتر می‌شود. گامون و همکاران (۱۹۹۷) رابطه این شاخص طیفی با شدت فتوستنتر را بر روی ۲۰ گونه متفاوت از سه نوع پوشش گیاهی پهن برگان، سوزنی برگان و گیاهان یک ساله علفی، بررسی کرده‌اند. منطق استفاده از طول موجهای ۵۷۰، ۵۳۱، ۵۳۹ و ۵۲۸ در شاخص‌های طیفی PRI براساس حساسیت طول

<sup>۱</sup> Photochemical Reflectance Indices

<sup>۲</sup> nondestructive

<sup>۳</sup> Inoue

موج ۵۷۰ نانومتر به چرخه رنگدانه گزانتوفیل و تغییرات فرایند فتوسنتز به واسطه تغییر غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی و همچنین تغییرات نیتروژن و کلروفیل موجود در گیاه می‌باشند. این شاخص‌های طیفی در حالی که بسیار حساس به تغییرات شدت فتوسنتز گیاه در اثر استرس می‌باشد، تغییرات رطوبتی گیاه را در اثر استرس نشان نمی‌دهند. طول موج‌های ۵۳۱، ۵۳۹ و ۵۲۸ به عنوان طول موج مبنا جهت کاهش یا حذف اثر تغییرات زاویه تابش خورشید در این شاخص طیفی استفاده می‌شود.

### - شاخص طیفی SIPI<sup>۱</sup>

این شاخص طیفی دارای حساسیت زیادی به جذب طیفی نسبت رنگدانه کاروتنوئید به کلروفیل می‌باشد. همچنین در مقابل تغییرات متغیرهایی در تاج مانند شاخص سطح برگ نیز بسیار حساس می‌باشد. افزایش ناگهانی و بیش از حد ارزش این شاخص طیفی بیانگر افزایش غلظت کاروتنوئید و یا کاهش چشمگیر کلروفیل می‌باشد که می‌تواند نشان دهنده استرس در گیاه باشد. بنابراین در سنجش از دور ابر طیفی برای پایش وضعیت سلامت پوشش گیاهی، تعیین استرس فیزیولوژیکی گیاه و بررسی میزان تولید محصولات زراعی کاربرد دارد. منطق استفاده از طول موج‌های استفاده شده در شاخص طیفی SIPI (جدول ۴-۲) بر پایه حساسیت طول موج‌های ۶۸۰ نانومتر به تغییرات غلظت کلروفیل و همچنین بروز حداقل جذب در طول موج ۴۴۵ نانومتر در مقابل غلظت بسیار اندک کلروفیل و حداکثر جذب کاروتنوئید می‌باشد، ضمن این که وضعیت سطح برگ (اپیدرم) نقش چندانی در میزان جذب در طول موج اخیر ندارد (دچمی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۳؛ زارکو تجادا و همکاران، ۲۰۰۵b؛ زو و یانگ، ۲۰۰۸).

یکی از مزیت‌های محدوده طول موج قرمز مستقل بودن انعکاس طیفی در این محدوده از انعکاس اپیدرم سطح برگ می‌باشد. بنابراین اطلاعات این محدوده طیفی در گیاهانی با ساختار سطح برگ متفاوت، می‌تواند نتایج مطمئنی در خصوص عوامل تاثیر گذار بر منحنی انعکاس طیفی، ارائه دهد. (زو و یانگ، ۲۰۰۸). از طرف دیگر با وجود جابجایی و وجود چندین نقطه اوج در این محدوده، ارتباط قوی منحنی طیفی با کلروفیل نه تنها به روش محاسبه غلظت کلروفیل بلکه به گونه مورد بررسی نیز بستگی دارد. ارزش این شاخص طیفی در پوشش گیاهی سبز بین ۰/۸ تا ۱/۸ می‌باشد.

<sup>1</sup> Structure Insensitive Pigment Index

<sup>2</sup> Dechmi

## شاخص طیفی Datt

همانطور که در بخش کلیات اشاره شد بخشی از انرژی رسیده به برگ به شکل نور پخش ناشی از ساختار اپیدرم سطح برگ و ساختار درون سلولی (شامل اندازه سلول‌ها، فضای بین سلولی، دیواره سلول‌ها و ترکیبات مواد درون سلولی) سهمی را در بازتاب طیفی برگ علاوه بر انعکاس طیفی به خود اختصاص می‌دهد. این تأثیر نامطلوب، مستقل از طول موج به خصوص محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک منجر به ناخالص شدن انعکاس طیفی برگ می‌شود. دات در سال ۱۹۹۹ با مطالعه اثر نور پخش بر روی منحنی طیفی برگ اکالیپتوس با کالیبره کردن منحنی انعکاس طیفی، به معرفی و انتخاب طول موج‌های مناسب در شاخص‌های طیفی حساس به کلروفیل پرداخت. مجموعه این طول موج‌ها در شاخص طیفی جدید Datt معرفی گردید (جدول ۴-۲). در این شاخص طیفی انتخاب طول موج‌های ۶۸۰ بر اساس حداکثر جذب طیفی کلروفیل a، ۷۱۰ حداکثر جذب طیفی کلروفیل کلی (ab) و ۸۵۰ نانومتر به عنوان طول موج مبنا با حداقل جذب طیفی نسبت به هر نوع رنگدانه و رطوبت برگ می‌باشد. بازتاب طیفی در طول موج‌های انتخاب شده در این شاخص طیفی مستقل از اثر نور پخش می‌باشد بنابراین نتیجه بهتری را در رابطه با کلروفیل نشان می‌دهد.

## - شاخص طیفی ANCB<sup>۱</sup> ۶۵۰-۷۲۵

این شاخص طیفی بر اساس منحنی انعکاس طیفی در محدوده لبه قرمز، حساس‌ترین منطقه به غلظت کلروفیل گیاهان و مستقل از عوامل تأثیر گذاری چون انعکاس زمینه (خاک) و زیر آشکوب، تراکم تاج و ساختار تاج تعریف شده است (مالنوسکی و همکاران، ۲۰۰۵). شاخص طیفی ANCB بر اساس منحنی CR<sup>۲</sup> در محدوده مشخصه طیفی جذب کلروفیل بین ۶۵۰ تا ۷۵۰ نانومتر (لبه قرمز) می‌باشد. منطق استفاده از این شاخص طیفی بر خلاف شاخص‌های دیگر که به ارزش انعکاس طیفی در طول موج خاصی می‌پردازد، اساساً بر روی تغییر شکل منحنی انعکاس طیفی در محدوده جذب کلروفیل (لبه قرمز) می‌باشد. منظور از شکل منحنی در محدوده طیفی مورد نظر، عمق منحنی طیفی حاصل از روش تبدیل CR و مساحت زیر منحنی CR می‌باشد. به این ترتیب در شاخص طیفی ANCB علاوه بر عمق منحنی، مساحت زیر منحنی CR نیز برای مقایسه طیف‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مساحت زیر منحنی CR بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

<sup>۱</sup>Area under curve Normalized to maximal Chlorophyll absorption Band depth between 650-725 nm

<sup>۲</sup> Continuum Removal

$$AUC_{650-725} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n-1} (\lambda_{j+1} - \lambda_j) (P_{j+1} + P_j) \quad \text{مساحت زیر منحنی CR:}$$

$I$  و  $j$  شماره طول موج‌ها

$P_{j+1}$  و  $P_j$  ارزش انعکاس طیفی منحنی CR

$\lambda_j$  و  $\lambda_{j+1}$ : طول موج‌ها

$n$ : تعداد طول موج‌های استفاده شده

$$ANCB_{650-725} = \frac{AUC_{650-725}}{MBD_{650-725}} \quad \text{رابطه محاسبه شاخص ANCB:}$$

$MBD_{650-725}$ : حداکثر عمق منحنی

جدول ۴-۲: شاخص‌های طیفی حساس به غلظت کلروفیل مورد استفاده در این تحقیق

| منبع                            | رابطه  | شاخص طیفی |
|---------------------------------|--|-----------|
| Gamon <i>et al.</i> , 1997      | $PRI1 = (R_{0.28} - R_{0.67}) / (R_{0.28} + R_{0.67})$                                     | PRIs      |
|                                 | $PRI2 = (R_{0.31} - R_{0.70}) / (R_{0.31} + R_{0.70})$                                     |           |
|                                 | $PRI3 = (R_{0.34} - R_{0.70}) / (R_{0.34} + R_{0.70})$                                     |           |
| Malenovsky <i>et al.</i> , 2006 | $ANCB_{650-725} = \frac{AUC_{650-725}}{MBD_{650-725}}$                                     | ANCB      |
|                                 | $AUC_{650-725} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n-1} (\lambda_{j+1} - \lambda_j) (P_{j+1} + P_j)$ |           |
| Penuelas & Filella, 1995        | $(R_{\lambda_{0.0}} - R_{\lambda_{4.5}}) / (R_{\lambda_{0.0}} - R_{\lambda_{0.0}})$        | SIPI      |
| Datt 1999                       | $(R_{\lambda_{5.0}} - R_{\lambda_{1.0}}) / (R_{\lambda_{5.0}} - R_{\lambda_{1.0}})$        | Datt      |

R: انعکاس طیفی، مساحت زیر منحنی  $AUC_{650-725}$ ، حداکثر عمق منحنی  $MBD_{650-725}$

<sup>1</sup> Area Under Curve

<sup>2</sup> Maximal Band Depth

## ۴-۲-۲- اندازه‌گیری کلروفیل و نیتروژن

به منظور تشریح هر چه بهتر چگونگی انعکاس طیفی برگ درختان مورد مطالعه، میزان کلروفیل و نیتروژن آن‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در این راستا نمونه‌های برگ پس از اندازه‌گیری طیفی بلافاصله در کیسه‌های پلاستیکی درب‌دار قرار داده شده و در محیط خنک و تاریک نگهداری و به آزمایشگاه انتقال داده شد. اندازه‌گیری غلظت کلروفیل و نیتروژن در مورد برگ‌های نور و سایه در تمامی ۶ تکرار (۳ تکرار نور و ۳ تکرار سایه) هر درخت انجام شد.

برای اندازه‌گیری کلروفیل ۰/۱ گرم از برگ هر نمونه داخل یک لوله آزمایش قرار داده شد و به آن ۵ سی سی استون ۸۰ درصد اضافه گردید. پس از حل شدن تمام کلروفیل برگ در استون به مدت ۳ دقیقه با چرخش ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شد. سپس محلول حاصل در دستگاه اسپکترومتر قرار داده شد و میزان جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳ و ۴۶۵ نانومتر قرائت شد و سپس از طریق رابطه زیر میزان کلروفیل برگ‌های نور و سایه محاسبه گردید (حقیقی و همکاران، ۲۰۰۶).

$$A_{663} = (0.0127 \times A_{663}) - (0.00269 \times A_{645})$$

(میلی گرم در میلی لیتر عصاره)

$$B = (0.0229 \times A_{645}) - (0.00468 \times A_{663})$$

(میلی گرم در میلی لیتر عصاره)

$$A+B = \text{میزان کلروفیل } A+B \text{ (میلی گرم در میلی لیتر عصاره)}$$

$A_{663}$ : میزان جذب نور در طول موج ۶۶۳ نانومتر،  $A_{645}$ : میزان جذب نور در طول موج ۶۴۵ نانومتر

نیتروژن برگ نمونه‌های اندازه‌گیری شده در شرایط نور و سایه با استفاده از روش کجلدال<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شد (رادوویچک و بوسکین<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹). مقدار یک گرم از نمونه وزن شده و در داخل لوله کجلدال ریخته شد و یک عدد قرص کاتالیزور (شامل پودر سلنیوم، سولفات مس و سولفات پتاسیم) به همراه ۱۵ میلی لیتر اسید سولفوریک غلیظ به آن اضافه شده و در دستگاه هضم پروتئین مدل Digestor 2006 قرار گرفت و تا دمای ۴۰ درجه سانتی گراد اکسید شد تا رنگ آن از قهوه ای تیره متمایل به سیاه به رنگ سبز روشن تبدیل گردد. سپس لوله از دستگاه هضم جدا شده و در دمای محیط آزمایشگاه خنک گردید و به هر کدام از لوله‌ها ۳۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شد. در مرحله بعد عمل تقطیر با دستگاه مدل kjeltec ۴۱۰۰k و افزودن ۶۰ میلی لیتر سود ۴۰ درصد آغاز شد. مواد حاصل از

<sup>1</sup> Kjeldahl method

<sup>2</sup> Radojvic & Boskin

تقطیر در یک ارلن حاوی معرف‌های برمرکزول، متیل رد و اسید بوریک جمع آوری شد. سپس با اسید سولفوریک ۰/۰۱ نرمال، عمل تیتراسیون انجام گرفت که در نهایت حجم اسید مصرفی با تغییر رنگ از سبز لجنی به زرشکی کم رنگ، یادداشت شد.

$$N\% = 1.4 \times A \times B / C$$

درصد نیتروژن:

A: نرمالته اسید سولفوریک

B: حجم اسید مصرفی (بر حسب میلی لیتر)

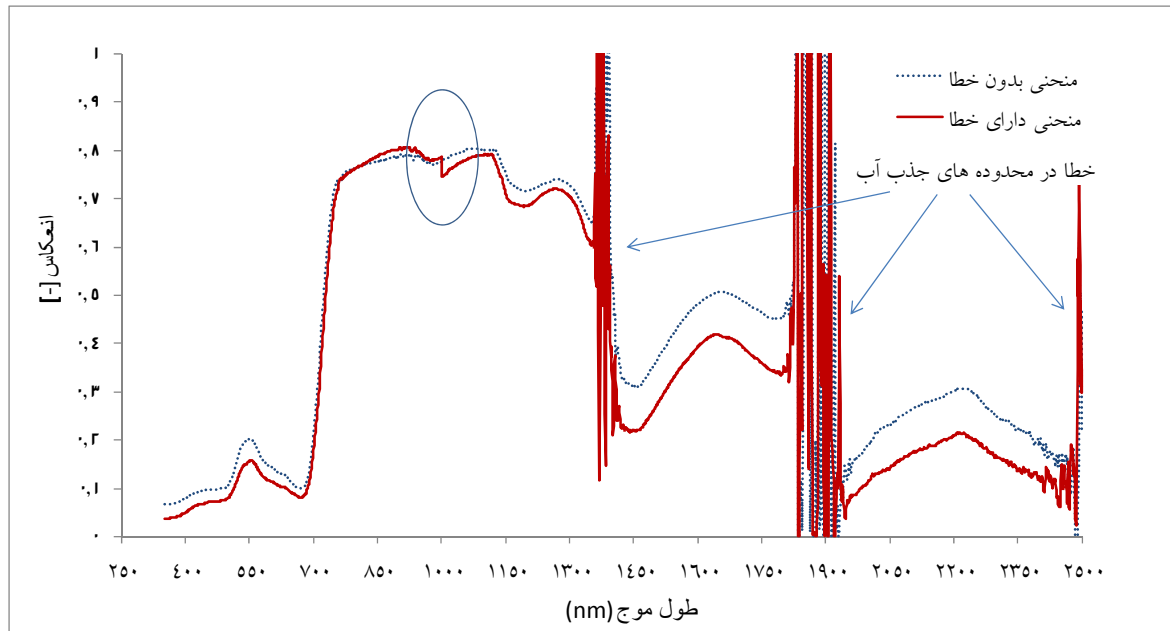
C: وزن نمونه (بر حسب گرم)

از آنجا که هدف مقایسه غلظت کلروفیل، نیتروژن برگ‌های گونه‌های مختلف است و به دلیل تفاوت وسعت سطح برگ گونه‌های مختلف، اندازه گیری غلظت مواد باید در واحد سطح برگ باشد. از این رو از برگ گونه‌های مورد نظر با استفاده از دور بین دیجیتال عکس برداری شده و با استفاده از نرم افزار Image J سطح برگ آن‌ها محاسبه و غلظت کلروفیل و نیتروژن برگ در واحد میلی گرم در سانتی متر مربع بیان شده است. این اندازه‌گیری‌ها در آزمایشگاه انجام شد.

#### ۴-۲-۳- پیش پردازش‌ها و حذف خطاها:

دستگاه طیف سنج مورد استفاده در این تحقیق از سه ثبت تشکیل شده است. این سه ثبت از مواد متفاوتی ساخته شده‌اند که منجر به حساسیت متفاوت ثبت‌ها نسبت به تغییر شرایط آب و هوایی از جمله دما و رطوبت می‌شود. از این رو در اندازه گیری طیفی در محیط طبیعی ضروری است که دستگاه هر ۵ تا ۱۰ دقیقه و قبل از اندازه گیری کالیبره شود. در صورت بروز خطای ناشی از کاربرد در کالیبره کردن دقیق دستگاه و یا تغییرات لحظه‌ای شرایط آب و هوایی همچنین کاهش ناگهانی شدت نور به علت وجود لکه‌های ابر در حین اندازه گیری طیفی، خطاهایی در محدوده‌های مختلف منحنی طیفی ایجاد می‌شود. پرش یا جابجایی زیاد منحنی طیفی در طول موج ۱۰۰۰ نانومتر (شکل ۴-۶) ناشی از عدم انجام صحیح کالیبراسیون ثبت اول و یا دوم است. همچنین قله‌های اضافه در محدوده طیفی مادون قرمز میانی در محدوده طیفی جذب آب نیز ناشی از کالیبره نبودن دقیق دستگاه است. وجود چنین خطاهایی در منحنی طیفی، ضرورت بازبینی و بررسی منحنی‌های طیفی را به طور جداگانه و با دقت زیاد پس از اندازه گیری‌ها ایجاد می‌کند. اندازه گیری طیفی در محیط طبیعی علاوه بر این خطاها، همواره به علت وجود رطوبت و ذرات بخار آب موجود در هوا در محدوده‌های جذب آب (۱۴۲۰-۱۹۵۰، ۱۳۵۰-۱۸۰۰ و ۲۴۰۰-۲۵۰۰) خطاهایی رخ می‌دهد. (شکل ۴-۶). تعیین نقاط ابتدا و انتهای این محدوده به طور یکسان در همه منحنی‌های طیفی بر اساس تعیین نقاط

پرت<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد. در این رابطه با محاسبه انحراف معیار در طول منحنی طیفی، نقاطی که ارزش طیفی آن‌ها دو برابر انحراف معیار در همان طول موج باشد به عنوان داده‌های پرت و خطا تلقی شده و حذف می‌گردد (شپمن-اشتورب<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۸).



شکل ۴-۶: خطای پرتش منحنی طیفی در طول موج ۱۰۰۰ نانومتر و در محدوده‌های جذب آب

پس از بازیابی و حذف خطا، تک تک منحنی‌های طیفی نمونه‌ها نامگذاری و از سه تکرار مربوط به هر درخت در وضعیت نور و سایه میانگین‌گیری شد. سپس از منحنی‌های طیفی نمونه‌های مربوط به هر گونه در موقعیت متفاوت تاج (نور و سایه) میانگین‌گیری شده و منحنی طیفی هر گونه در دو موقعیت نور و سایه به عنوان عضوی از کتابخانه طیفی آن به نرم افزار ENVI فرستاده شد و تحت فرمت کتابخانه طیفی ذخیره گردید.

#### ۴-۲-۴- تحلیل‌های آماری

##### ۴-۲-۴-۱- تفاوت طیفی گونه‌ها

شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در این تحقیق بر روی یکایک منحنی‌های نمونه‌های طیف سنجی هر یک از گونه‌ها محاسبه شد. سپس تفاوت آماری انعکاس طیفی برگ هر یک از گونه‌ها در موقعیت متفاوت تاج از لحاظ

<sup>1</sup> Outliers

<sup>2</sup> Schaepman-Sturb

میزان شدت نور دریافتی (برگ نور و سایه) با استفاده از آزمون  $t$  استیودنت بررسی شد. به منظور بررسی تفاوت طیفی بین گونه‌ها نیز از آنالیز واریانس و آزمون مقایسه میانگین جفتی دانکن در محیط SAS استفاده شده است.

## ۲-۴-۲-۴- رگرسیون

### - رگرسیون خطی ساده

در بررسی حساسیت شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در رابطه با کلروفیل و نیتروژن، ارتباط خطی و غیرخطی مقدار شاخص‌های طیفی محاسبه شده با میزان کلروفیل و نیتروژن مورد مطالعه قرار گرفت. در بررسی این رابطه می‌بایست معنی‌دار بودن ضریب همبستگی بدست آمده بررسی گردد. در این تحقیق برای آزمون معنی‌دار بودن ضریب همبستگی محاسبه شده، از آزمون  $t$  استیودنت استفاده شده است. از این رو با استفاده از رابطه زیر  $t$  محاسبه شده و سپس با  $t$  جدول بر اساس درجه آزادی  $n-2$  و سطح خطای  $0/01$  و  $0/05$  مقایسه می‌شود.

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

$r$ : ضریب همبستگی       $n$ : تعداد نمونه‌ها

### - رگرسیون حداقل مربعات بخشی (PLS):<sup>۱</sup>

یکی از مشکلات پردازش داده‌های طیفی علاوه بر حجم وسیع اطلاعات در طول موج‌های مختلف، روبه‌رو شدن با اثر هم پوشانی عوامل متفاوت در هر طول موج و اطلاعات تکراری در طول موج‌ها به خصوص طول موج‌های مجاور می‌باشد (یاوو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). زمانی که تعداد متغیرهای پیش‌بینی کننده بیشتر از نمونه‌های اندازه‌گیری شده باشد (بین ۲۰۰۰-۱۵۰۰ باند طیفی طیف سنج در مقابل ۱۰۷ نمونه اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر)، درجه هم پوشانی زیاد و منجر به  $overfitting$  می‌شود. در مورد چنین داده‌هایی، قبل از برازش مدل یک تحلیل چند متغیره با هدف تعیین متغیرهای مهم تأثیرگذار انجام می‌شود. در این فرایند طول موج‌های مهم و مرتبط با متغیرهای وابسته، تعیین می‌شود.

تحلیل رگرسیون حداقل مربعات بخشی تا حدی شبیه به تحلیل مؤلفه‌های اصلی می‌باشد با این تفاوت که در روش رگرسیون PLS متغیرهای مستقل  $X$  نیز هم زمان با متغیرهای وابسته  $Y$  به تعدادی مؤلفه‌های اصلی تبدیل می‌شود به نحوی که بیشترین درصد تغییرات، در مؤلفه‌های اولیه ارائه می‌شود. از مؤلفه‌های متغیر  $X$  برای پیش‌بینی

<sup>۱</sup> Partial Least Square

<sup>۲</sup> Yao

امتیاز (Scores) متغیر Y استفاده می‌شود و از امتیاز متغیر Y پیش بینی شده برای برآورد ارزش واقعی متغیر Y استفاده می‌گردد (نورگارد<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۰). مزیت این روش نسبت به تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) این است که نه تنها در محور Yها بلکه در محور Xها نیز به فشرده سازی اطلاعات می‌پردازد و از اطلاعات متغیر Y نیز در طول فرایند تحلیل مؤلفه‌ها استفاده می‌شود. بنابراین یکی از مزایای رگرسیون PLS تعیین مؤثرترین و یا حساس‌ترین طول موج‌ها نسبت به تغییرات متغیر Y بر اساس تعیین مؤلفه‌های اصلی انتخاب شده از متغیر X می‌باشد (کارد<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۸۸). در واقع هدف اصلی رگرسیون PLS ساختن یک مدل خطی بر اساس رابطه  $Y=Xb+E$  است که در آن Y: متغیر برآورد شده (در رگرسیون PLS) در شکل ماتریس (متغیر  $Y \times 1$ ) و X: متغیر مستقل پیش‌گویی کننده (طول موج  $\times$  ارزش انعکاس طیفی) می‌باشد. ضمناً b ماتریسی شامل ضرایب رگرسیون و E ماتریسی از خطاهای باقیمانده است (چو و همکاران، ۲۰۰۷؛ بوریو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۹؛ بوآ و دای<sup>۴</sup>، ۲۰۰۹).

در انتخاب تعداد بهینه مؤلفه‌های مورد استفاده در مدل رگرسیون از روش اعتبار متقابل با یک نمونه خارج شده (leave one out cross validation) استفاده شده است. به این شرح که با خارج کردن یک نمونه از نمونه‌های باقیمانده، برای n-1 مشاهده دیگر مدل رگرسیون PLS برازش می‌شود. بنابراین این فرایند به تعداد نمونه‌های موجود تکرار می‌شود و از تمام نمونه‌ها در اعتبار سنجی مدل استفاده می‌شود. از طرفی دیگر با دخالت همه نمونه‌ها در اعتبار سنجی، داده پرت نیز همزمان تعیین بهترین مدل، حذف می‌گردد. به این معنا که با خارج کردن یک نمونه و برازش مدل توسط نمونه‌های دیگر، خطای مدل برآورد می‌شود. در این صورت بهترین مدل برازش شده با داشتن کمترین خطا نشان دهنده کنار گذاشتن نمونه پرت می‌باشد. در این فرایند تعداد مناسب مؤلفه‌ها بر اساس حداقل میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده برآورد شده (PRESS<sup>۵</sup>)، تعیین می‌شود (بلانکو و همکاران، ۱۹۹۶؛ لی، ۲۰۰۸). انتخاب بهترین مدل برازش شده بر اساس آماره RMSECV<sup>۶</sup> یا ریشه میانگین مربعات خطای اعتبار متقابل، که از آماره PRESS محاسبه می‌شود، صورت می‌گیرد (هیس و بیتز<sup>۷</sup>، ۱۹۹۷؛ ریوس ای و ون کسل<sup>۸</sup>، ۲۰۰۰؛ روکبوش<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۶؛ اسنر و مارتین<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۸؛ ییتاگسو<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

<sup>1</sup> Nørgaard

<sup>2</sup> Card

<sup>3</sup> Bureau

<sup>4</sup> Boa & Dai

<sup>5</sup> Predicted Residual Error Sum of Squares

<sup>6</sup> Root Mean Square Error of Cross-Validation

<sup>7</sup> Heise & Bitter

<sup>8</sup> Reeves Iii & Van Kessel

<sup>9</sup> Ruckebusch

<sup>10</sup> Asner & Martin

<sup>11</sup> Yitagesu

رابطه محاسبه RMSECV:

$$RMSECV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}$$

$y_i$ : مشاهده نام

$\bar{y}$ : میانگین مشاهدات

$\hat{y}_i$ : مقدار برآورد شده مشاهده نام برای  $n-1$  مشاهده توسط مدل

$n$ : تعداد مشاهدات

در این مطالعه از روش تحلیل حداقل مربعات بخشی که کاربرد وسیعی در مطالعات طیف سنجی دارد، استفاده شده است. در این راستا و بر اساس اهداف مختلف این تحقیق نحوه ترتیب ماتریس‌ها و برازش مدل‌ها متفاوت خواهد بود. در یک حالت تنها داده‌های مربوط به منحنی‌های طیفی گونه‌های مختلف و بدون در نظر گرفتن هیچ گونه عامل و متغیر دیگری مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند. بنابراین برازش مدل با هدف تعیین احتمال تعلق هر یک از نمونه‌های طیفی به یک طبقه (در اینجا گونه‌های مورد مطالعه) انجام خواهد شد. در این حالت برای هر کدام از گونه‌ها، کدی تعیین شده و به عنوان متغیر پیش‌بینی شونده به مدل معرفی می‌گردد. ضمناً متغیر مستقل  $X$  تنها شامل مقادیر طیفی در محدوده طول موج‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک (از ۳۵۰ تا ۱۳۵۰ نانومتر) خواهد بود. چرا که این دامنه طول موج دارای کمترین تأثیر از منابع خطاهای مختلف اعم از خطای ناشی از دستگاه و عوامل محیطی به ویژه رطوبت می‌باشد. نتیجه حاصل از این آنالیز علاوه بر طبقه‌بندی نمونه‌های طیفی به گونه‌های مربوطه شامل تعیین طول موج‌های مؤثر در تفکیک و طبقه‌بندی طیفی گونه‌ها نیز می‌باشد.

در حالت دیگر علاوه بر منحنی‌های طیفی گونه‌ها، داده‌های مربوط به عوامل تأثیرگذار بر بازتاب نیز در مدل وارد می‌شود. عامل تأثیرگذار در تحقیق حاضر تنها نیتروژن اندازه‌گیری شده می‌باشد، چرا که اندازه‌گیری کلروفیل همه گونه‌ها به طور کامل انجام نشده است.

فصل پنجم

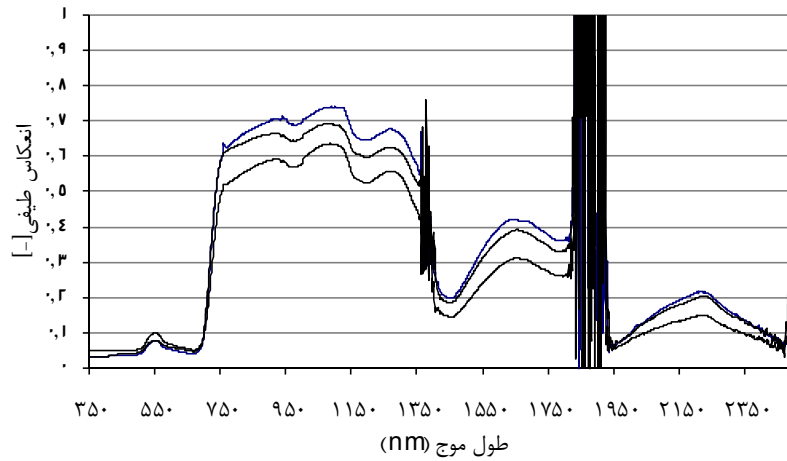
نتایج

## ۵-۱- مشخصه طیفی گونه‌ها

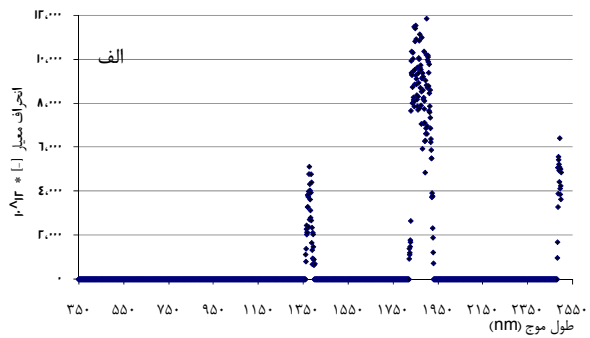
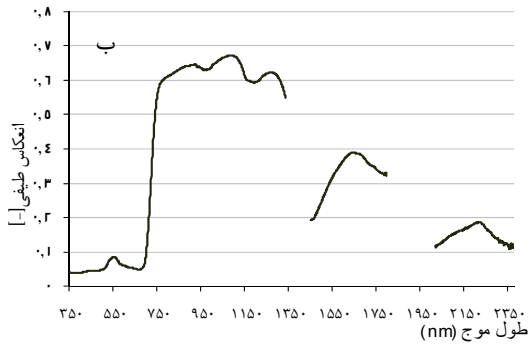
شکل ۵-۱ نمونه‌ای از منحنی‌های طیفی حاصل از میانگین ۱۰۰ اسکن مربوط به هر تکرار از عملیات طیف سنجی و خروجی دستگاه طیف سنج را نشان می‌دهد. کیفیت خوب دستگاه مورد استفاده و پایداری نسبی شرایط محیطی موجب ایجاد منحنی‌های بدون خطا و قابل قبول شده است. وضعیت غیر عادی منحنی‌ها در طول موج‌های حدود ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۵۰۰ ناشی از حساسیت شناخته شده این طول موج‌ها به بخار آب می‌باشد. شکل ۵-۲الف میزان انحراف معیار بازتاب‌های اندازه‌گیری شده در طول موج‌های مختلف مربوط به یک گونه را به صورت نمونه نشان می‌دهد. بر اساس این شکل تنها در دامنه طول موج‌های جذب آب میزان انحراف معیار بازتاب‌ها بسیار زیاد بوده که بیانگر خطای شدید است. همچنین خطای احتمالی ناشی از کالیبراسیون دستگاه که معمولاً در طول موج ۱۰۰۰ نانومتر رخ می‌دهد، دیده نمی‌شود. دامنه‌های طول موج‌هایی که داده‌های آن‌ها به دلیل خطایشان حذف شدند در تمامی گونه‌ها یکسان بوده است (۱۳۴۰ تا ۱۴۵۰، ۱۸۰۰ تا ۲۰۲۰ و ۲۳۸۰ تا ۲۵۰۰). شکل ۵-۲ب نشان دهنده منحنی بازتاب طیفی یک گونه پس از حذف بازتاب‌های دارای خطا می‌باشد. بدین ترتیب منحنی‌های نهایی بازتاب طیفی برگ گونه‌های توسکا، ممرز، راش، انجیلی و بلوط که به ترتیب از پیش پردازش و میانگین‌گیری ۱۹، ۲۰، ۲۹، ۱۵ و ۲۰ تکرار طیف سنجی مجموعه نمونه برگ آن‌ها در هر یک از موقعیت‌های نور و سایه، محاسبه شده در شکل ۵-۳ درج شده است. این چنین منحنی‌های طیفی که معرف رفتار طیفی هستند به عنوان اثر انگشت طیفی<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند و به عنوان کتابخانه طیفی گونه‌های مورد مطالعه در وضعیت‌های مختلف برگ در تاج (برگ نور و سایه) به بخش کتابخانه طیفی نرم افزار تحلیل داده‌های ابر طیفی ENVI انتقال داده شد. از داده‌های این منحنی‌های طیفی برای انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری و بررسی معنی‌دار بودن تفاوت طیفی گونه‌ها استفاده شد.

پس از تهیه منحنی بازتاب طیفی گونه‌های مورد مطالعه در موقعیت نور و سایه، میزان تفاوت منحنی‌های هر گونه در دو حالت نور و سایه در طول منحنی طیفی از ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر، محاسبه شده است. در گونه‌های انجیلی، راش و ممرز انعکاس طیفی برگ سایه نسبت به نور به ترتیب به میزان ۱۶/۴۵، ۱۰/۱۱ و ۲/۹۲ درصد بیشتر و در گونه‌های توسکا و بلوط به میزان ۶/۰۶ و ۱/۳۲ درصد کمتر می‌باشد. این تفاوت‌ها به خصوص در گونه توسکا، راش و انجیلی در محدوده مادون قرمز میانی بارزتر است. در محدوده مادون قرمز دور این تفاوت‌ها در گونه‌های راش و انجیلی بیشتر از بقیه گونه‌ها می‌باشد.

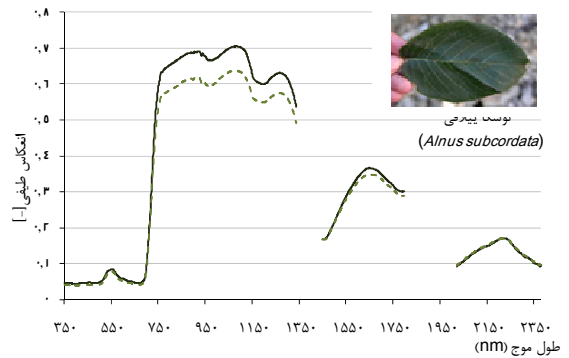
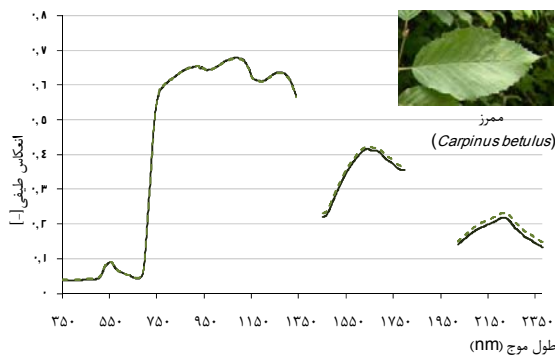
<sup>۱</sup> Spectral fingerprint

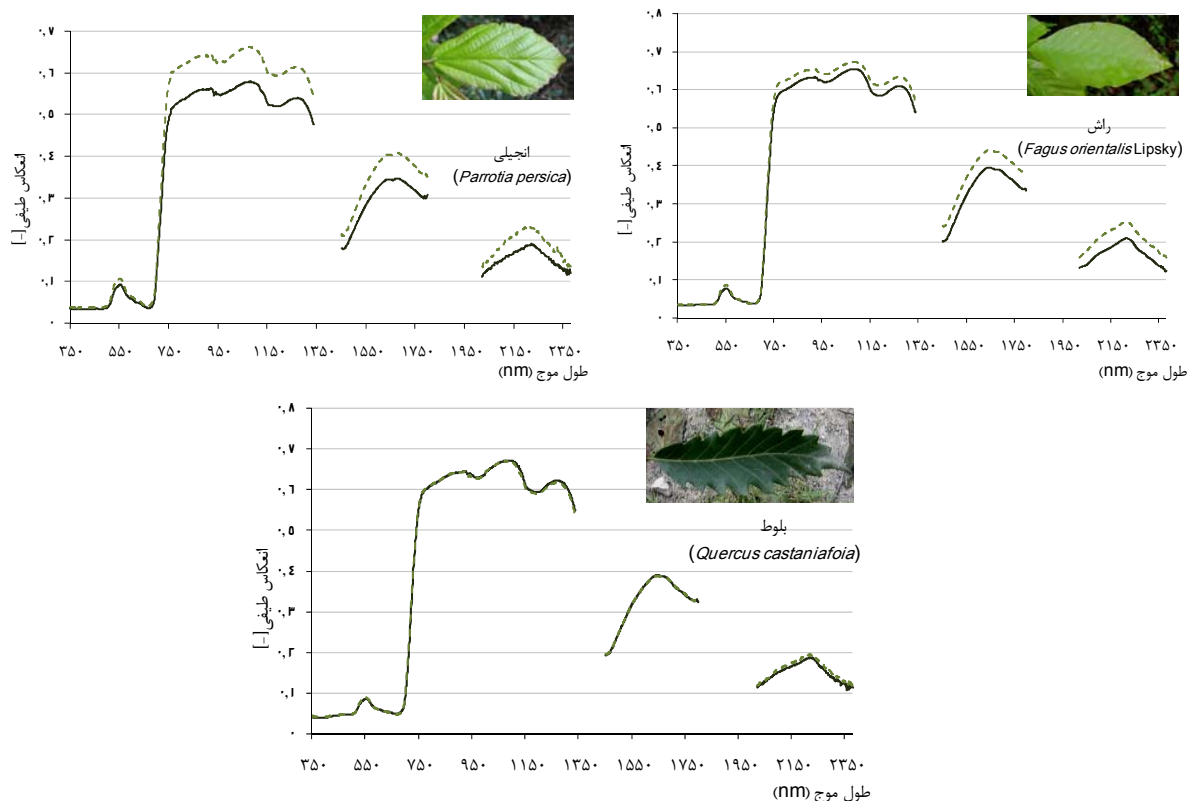


شکل ۱-۵: سه منحنی انعکاس طیفی مربوط به سه تکرار طیف سنجی از یک پایه درختی



شکل ۲-۵: انحراف معیار انعکاس های طیفی اندازه گیری شده برای تمامی طول موج ها (الف)، منحنی بازتاب طیفی یک نمونه پس از حذف بازتاب های دارای خطا (ب).





شکل ۵-۳: منحنی‌های نهایی انعکاس طیفی برگ گونه‌های توسکا، ممرز، راش، انجیلی و بلوط در دو موقعیت برگ نور (منحنی پیوسته) و سایه (منحنی منقطع) به عنوان مشخصه طیفی آن‌ها

## ۵-۲- میزان کلروفیل و نیتروژن برگ گونه‌ها

### ۵-۲-۱- تفاوت گونه‌ها از نظر میزان کلروفیل و نیتروژن

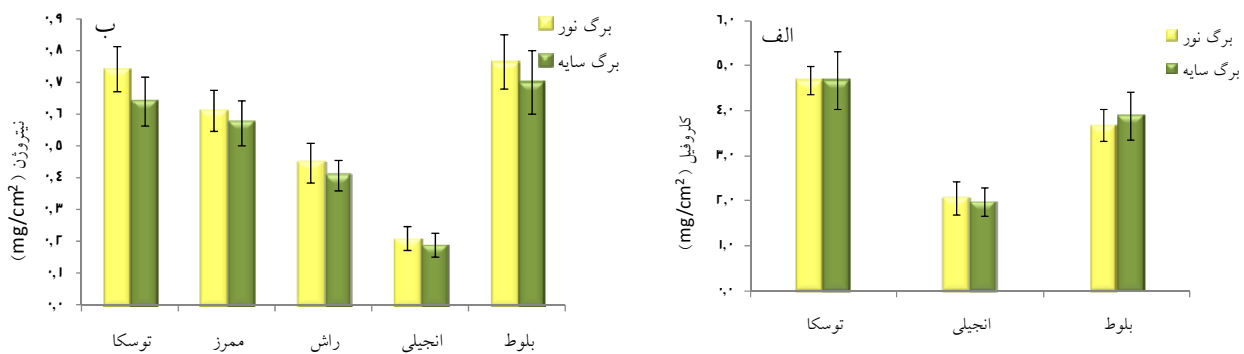
نتایج داده‌های آزمایشگاهی حاصل از اندازه‌گیری غلظت کلروفیل برگ سه گونه توسکا، انجیلی و بلوط، نشان می‌دهد که بیشترین غلظت به ترتیب مربوط به توسکا، بلوط و انجیلی می‌باشد (شکل ۵-۴ الف). دامنه تغییرات غلظت کلروفیل در سه گونه مورد مطالعه در برگ‌های نور از ۲/۰۶ تا ۴/۶۸ و در برگ‌های سایه از ۱/۹۸ تا ۴/۶۷ میلی گرم بر سانتی متر مربع است. بر اساس نتایج تحلیل آماری حاصل از آزمون  $t$  تفاوت معنی‌داری بین غلظت کلروفیل برگ‌های نور و سایه گونه‌ها وجود ندارد (جدول ۵-۱). در مقابل، نتایج جدول تحلیل واریانس یک طرفه تفاوت معنی‌داری را بین غلظت کلروفیل هر سه گونه نشان می‌دهد ( $P < 0.0001$  و  $\alpha = 0.01$ ) (جدول ۵-۲).

نتایج حاصل از استخراج نیتروژن برگ گونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار نیتروژن مربوط به گونه‌های بلوط و توسکا و کمترین مقدار مربوط به انجیلی می‌باشد. مقدار نیتروژن برگ گونه انجیلی علاوه بر

غلظت کم، واریانس کمتری را نیز نسبت به گونه‌های دیگر نشان می‌دهد (شکل ۵-۴). نتایج تحلیل واریانس، تفاوت معنی‌داری را بین همه گونه‌ها نشان می‌دهد ( $P=0/0001$  و  $\alpha=0/01$ ). تنها بین گونه بلوط و توسکا تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. دامنه تغییرات غلظت نیتروژن در گونه‌های مورد مطالعه در برگ‌های نور ۰/۲۱ تا ۰/۷۶ و در برگ‌های سایه از ۰/۱۸ تا ۰/۷۰ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. بر اساس نتایج تحلیل آماری حاصل از آزمون t تفاوت معنی‌داری بین غلظت نیتروژن برگ‌های نور و سایه همه گونه‌ها وجود دارد. در همه گونه‌ها غلظت نیتروژن برگ‌های نور از برگ‌های سایه بیشتر است (جدول ۵-۱).

جدول ۵-۱: مقایسه میانگین غلظت کلروفیل و نیتروژن ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) بین برگ‌های نور و سایه هر یک از گونه‌ها بر اساس نتایج آزمون t

| نیتروژن ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) |      |           |           | کلروفیل ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) |        |           |           | تعداد نمونه‌ها | گونه‌ها |
|-------------------------------------|------|-----------|-----------|-------------------------------------|--------|-----------|-----------|----------------|---------|
| نتیجه آزمون                         |      | برگ سایه  | برگ نور   | نتیجه آزمون                         |        | برگ سایه  | برگ نور   |                |         |
| p                                   | t    | میانگین   | میانگین   | p                                   | t      | میانگین   | میانگین   |                |         |
| ۰/۰۰۱۷                              | ۳/۴۰ | ۰/۶۴±۰/۰۷ | ۰/۷۴±۰/۰۷ | ۰/۹۵۹                               | ۰/۰۵۲  | ۴/۶۷±۰/۶۴ | ۴/۶۸±۰/۳۰ | ۲۰             | توسکا   |
| ۰/۰۰۳                               | ۲/۱۵ | ۰/۵۷±۰/۰۷ | ۰/۶۱±۰/۰۶ | -                                   | -      | -         | -         | ۲۰             | ممرز    |
| ۰/۰۰۸                               | ۲/۷۵ | ۰/۴۰±۰/۰۴ | ۰/۴۴±۰/۰۶ | -                                   | -      | -         | -         | ۳۲             | راش     |
| ۰/۰۰۳                               | ۳/۲۳ | ۰/۱۸±۰/۰۳ | ۰/۲۱±۰/۰۳ | ۰/۴۶۲                               | ۰/۷۵۶  | ۱/۹۸±۰/۳۱ | ۲/۰۶±۰/۳۶ | ۱۵             | انجیلی  |
| ۰/۰۰۴                               | ۲/۰۴ | ۰/۷۰±۰/۰۹ | ۰/۷۶±۰/۰۸ | ۰/۱۶۹                               | -۱/۴۴۱ | ۳/۸۸±۰/۵۴ | ۳/۶۸±۰/۳۴ | ۲۰             | بلوط    |



شکل ۵-۴: میانگین و انحراف معیار کلروفیل (الف) و نیتروژن (ب) اندازه‌گیری شده برگ گونه‌ها (کلروفیل راش و ممرز اندازه‌گیری نشده است).

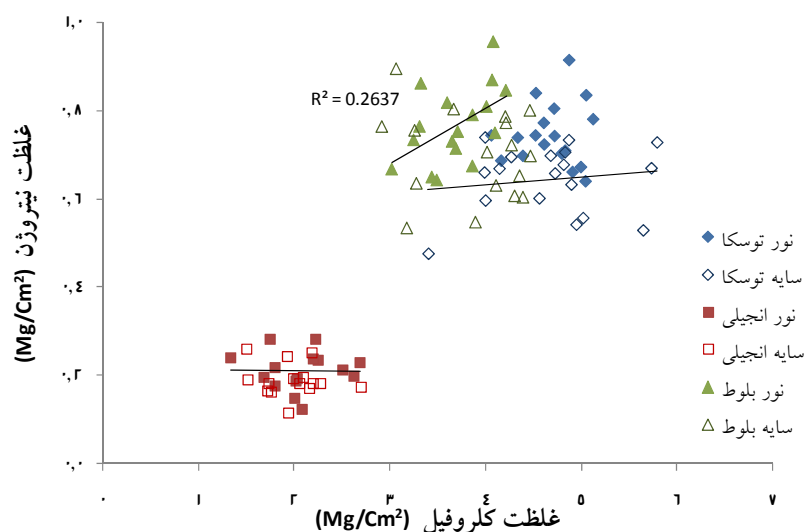
جدول ۵-۲: جدول تجزیه واریانس تفاوت غلظت کلروفیل و نیتروژن برگ گونه‌ها با یکدیگر در دو موقعیت نور و سایه

| موقعیت برگ | درجه آزادی | میانگین مربعات | میانگین مربعات خطای باقیمانده | F         | سطح معنی داری |
|------------|------------|----------------|-------------------------------|-----------|---------------|
| نور        | نیتروژن    | ۴              | ۰/۸۴۲                         | ۲۰۹/۷***  | ۰/۰۰۰         |
|            | کلروفیل    | ۲              | ۲۸/۳۰                         | ۲۴۴/۴۲*** | ۰/۰۰۰         |
| سایه       | نیتروژن    | ۴              | ۰/۷۱۶                         | ۱۶۱/۴۷*** | ۰/۰۰۰         |
|            | کلروفیل    | ۲              | ۳۰/۷۵۶                        | ۱۰۹/۸۶*** | ۰/۰۰۰         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪

### ۵-۲-۲- رابطه نیتروژن و کلروفیل اندازه گیری شده در برگ‌ها

با توجه به این که تعدادی از شاخص های طیفی مورد استفاده در این تحقیق بر مبنای حساسیت آن‌ها به کلروفیل و نیتروژن تعریف شده اند، لازم بود تا میزان این دو متغیر در برگ‌ها اندازه گیری و رابطه بین آن‌ها بررسی شود. نتایج بررسی این ارتباط (جدول ۱ پیوست) نشان می‌دهد که رابطه مثبت و معنی داری با ضریب همبستگی ۰/۸۵ و  $r = ۰/۷۹$  به ترتیب در برگ‌های نور و سایه، بین نیتروژن و کلروفیل اندازه گیری شده هر سه گونه با هم (توسکا، انجیلی و بلوط) وجود دارد. سطح معنی داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که رابطه‌های فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی دار است. در حالی که بین نیتروژن و کلروفیل نمونه‌های مربوط به هر گونه به طور مجزا هیچ گونه ارتباط معنی داری مشاهده نمی‌گردد. (شکل ۵-۵).



شکل ۵-۵: رابطه نیتروژن و کلروفیل برگ در نور و سایه هر یک از گونه‌ها به طور جداگانه

## رابطه شاخص‌های طیفی با کلروفیل و نیتروژن

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد پس از تهیه کتابخانه طیفی گونه‌ها، تعدادی از شاخص‌های طیفی انتخاب و محاسبه شده و حساسیت آن‌ها در ارتباط با متغیرهای اندازه‌گیری شده‌ی کلروفیل و نیتروژن بررسی شدند. این بررسی در دو مرحله و سطح مختلف انجام شده است. در مرحله نخست به منظور بررسی میزان حساسیت شاخص مورد نظر نسبت به تغییرات غلظت کلروفیل و نیتروژن در همه گونه‌ها، رابطه کل داده‌های مربوط به همه نمونه‌ها به طور یک‌جا با شاخص مورد نظر بررسی شده است. در مرحله دوم میزان حساسیت شاخص طیفی مورد نظر به تغییرات غلظت کلروفیل یا نیتروژن در هر گونه به طور مجزا بررسی شده است. در بخش‌های زیر نتایج این بررسی‌ها به تفکیک شاخص‌های طیفی ارائه شده است.

### ۵-۲-۳-۱- رابطه رگرسیون شاخص‌های طیفی PRI با کلروفیل و نیتروژن

#### - شاخص طیفی PRI1

بر اساس نتایج به دست آمده از بررسی رابطه شاخص PRI1 با میزان کلروفیل و نیتروژن اندازه‌گیری همه گونه‌ها، هیچ نوع ارتباط معنی‌داری مشاهده نمی‌گردد (جدول ۲ پیوست). این در حالی است که نتایج بررسی رابطه شاخص PRI1 با میزان کلروفیل و نیتروژن اندازه‌گیری شده برگ هر یک از گونه‌ها به طور جداگانه، نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. بهترین برازش‌های مدل با استفاده از رگرسیون خطی حاصل شده است. ضریب همبستگی به دست آمده در رابطه کلروفیل برگ نور توسکا با شاخص طیفی PRI1 نشان می‌دهد که بین غلظت کلروفیل و این شاخص طیفی همبستگی مثبت ( $r=0/64$ ) وجود دارد. سطح معنی‌داری حاصله از آزمون  $t$  نشان می‌دهد که مدل فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است. بررسی رابطه این شاخص طیفی در برگ سایه توسکا با غلظت کلروفیل آن، ضریب همبستگی منفی  $0/46$  را نشان می‌دهد و این رابطه در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. بین شاخص طیفی برگ نور و سایه گونه انجیلی با غلظت کلروفیل آن هیچ گونه رابطه معنی‌داری مشاهده نشد. در رابطه با گونه بلوط در دو حالت برگ نور و سایه، ضرایب همبستگی به دست آمده (به ترتیب  $0/55$  و  $0/56$ ) نشان می‌دهد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین غلظت کلروفیل و شاخص طیفی PRI1 وجود دارد. سطح معنی‌داری حاصله از آزمون  $t$  نشان می‌دهد که مدل‌های فوق در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۳-۵).

جدول ۳-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRII حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با کلروفیل

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون          | درجه آزادی | ضریب همبستگی | ضریب تعیین (%) | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F        | سطح معنی داری |
|--------|------------|------------------------|------------|--------------|----------------|----------------------------|---------|----------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = 16/09 x + 4/119$  | ۱۶         | ۰/۶۴         | ۴۱             | ۰/۰۰                       | ۳/۲۰۲   | ۱۰/۲۵*** | ۰/۰۰۵۶        |
|        | سایه       | $y = -30/82 x + 5/729$ | ۱۶         | -۰/۴۶        | ۲۱             | ۰/۳۵۲                      | -۲/۰۴   | ۴/۱۶**   | ۰/۰۵۸         |
| انجیلی | نور        | $y = 5/746 x + 1/78$   | ۱۳         | ۰/۳۱         | ۱۰             | ۰/۱۳۲                      | ۱/۱۹    | ۱/۴۱۵    | ۰/۲۵          |
|        | سایه       | $y = 5/481 x + 1/837$  | ۱۳         | ۰/۱۱         | ۱              | ۰/۱۱۲                      | ۰/۳۸    | ۰/۱۵۲    | ۰/۷۰          |
| بلوط   | نور        | $y = 13/37 x + 3/122$  | ۱۶         | ۰/۵۵         | ۳۰             | ۰/۰۸۹                      | ۲/۵۴    | ۶/۴۶**   | ۰/۰۲۳         |
|        | سایه       | $y = 31/49 x + 2/818$  | ۱۶         | ۰/۵۶         | ۳۱             | ۰/۲۲۴                      | ۲/۵۰    | ۶/۲۵**   | ۰/۰۲۶         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪، \*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۵٪.

نتایج به دست آمده در بررسی رابطه نیتروژن برگ گونه‌های مورد مطالعه در شرایط نور و سایه با شاخص طیفی PRII هیچ گونه ارتباط معنی داری را نشان نمی‌دهد. تنها مدل‌های حاصل از رابطه شاخص طیفی PRII از برگ سایه گونه انجیلی و برگ نور گونه توسکا با ضریب همبستگی ۰/۶۲ و ۰/۴۲، تغییرات غلظت نیتروژن را به وسیله این شاخص طیفی، قابل توجیه می‌داند. سطح معنی داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که مدل‌های فوق به ترتیب در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۰ درصد معنی دار است (جدول ۳-۵).

جدول ۴-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRII حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با نیتروژن

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون          | درجه آزادی | ضریب همبستگی | ضریب تعیین (%) | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F       | سطح معنی داری |
|--------|------------|------------------------|------------|--------------|----------------|----------------------------|---------|---------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = -2/446 x + 0/802$ | ۱۶         | -۰/۴۲        | ۱۸             | ۰/۰۰۳                      | -۱/۸۲   | ۳/۳۱*   | ۰/۰۸۹         |
|        | سایه       | $y = -0/458 x + 0/659$ | ۱۶         | -۰/۰۶        | ۰              | ۰/۰۰۶                      | -۰/۲۳   | ۰/۰۵    | ۰/۸۲          |
| ممرز   | نور        | $y = -0/32 x + 0/651$  | ۱۶         | -۰/۱۳        | ۱              | ۰/۰۰۴                      | -۰/۵۱   | ۰/۲۵    | ۰/۶۱          |
|        | سایه       | $y = -0/350 x + 0/588$ | ۱۶         | -۰/۱۳        | ۱              | ۰/۰۰۳                      | -۰/۵۳   | ۰/۱۵۲   | ۰/۶۰          |
| راش    | نور        | $y = 0/262 x + 0/442$  | ۲۴         | ۰/۰۸         | ۰/۷            | ۰/۰۰۵                      | ۰/۴۳    | ۰/۱۸۴   | ۰/۶۷          |
|        | سایه       | $y = 0/625 x + 0/383$  | ۲۴         | ۰/۳۱         | ۱۰             | ۰/۰۰۳                      | ۱/۵۷۳   | ۲/۴۷    | ۰/۱۲          |
| انجیلی | نور        | $y = 0/208 x + 0/2$    | ۱۳         | ۰/۱۶         | ۲              | ۰/۰۰۱                      | ۰/۵۷    | ۰/۳۲    | ۰/۵۸          |
|        | سایه       | $y = -3/955 x + 0/288$ | ۱۳         | -۰/۶۲        | ۳۸             | ۰/۰۰۱                      | -۲/۶۸   | ۷/۲۱*** | ۰/۰۲          |
| بلوط   | نور        | $y = 0/816 x + 0/714$  | ۱۵         | ۰/۱۶         | ۲              | ۰/۰۰۵                      | ۰/۶۳۲   | ۰/۴     | ۰/۵۴          |
|        | سایه       | $y = -0/876 x + 0/713$ | ۱۵         | -۰/۰۸        | ۰/۷            | ۰/۰۱۱                      | ۰/۳۱۹   | ۰/۱۰    | ۰/۷۵          |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۵٪، \* معنی دار در سطح اطمینان ۹۰٪.

## - شاخص طیفی PRI2

بر اساس نتایج به دست آمده از بررسی رابطه شاخص طیفی PRI2 با میزان کلروفیل و نیتروژن اندازه گیری شده همه گونه‌ها، هیچ گونه ارتباط معنی داری مشاهده نشده است (جدول ۳ پیوست).

ضریب همبستگی به دست آمده ( $r=0/48$ ) در رابطه غلظت کلروفیل برگ نور و سایه توسکا با شاخص طیفی PRI2 نشان می‌دهد که رابطه معنی داری وجود دارد. سطح معنی داری حاصله از آزمون  $t$  نشان می‌دهد که مدل فوق در سطح اطمینان ۹۰ درصد معنی دار است. همانند نتایج شاخص طیفی PRI1 این رابطه برای برگ نور و سایه توسکا به ترتیب خطی مثبت و منفی می‌باشد. همچنین برگ نور و سایه گونه انجیلی هیچ گونه رابطه معنی داری را در ارتباط غلظت کلروفیل با این شاخص طیفی نشان نمی‌دهند. ضریب همبستگی به دست آمده در رابطه شاخص طیفی PRI2 برگ نور گونه بلوط با غلظت کلروفیل، نشان می‌دهد که همبستگی مثبت و معنی داری ( $r=0/48$ ) وجود دارد. سطح معنی داری حاصله از آزمون  $t$  نشان می‌دهد که مدل فوق در سطح اطمینان ۹۰ درصد معنی دار است (جدول ۴ پیوست).

نتایج به دست آمده در بررسی رابطه نیتروژن برگ هر یک از گونه‌های توسکا، ممرز و بلوط در شرایط نور و سایه با شاخص طیفی PRI2، هیچ گونه ارتباط معنی داری را نشان نمی‌دهند. در رابطه نیتروژن برگ سایه راش و انجیلی با شاخص طیفی PRI2، ضریب همبستگی به دست آمده (به ترتیب ۰/۳۳ و  $r=0/48$ ) نشان می‌دهد که همبستگی مثبت و معنی داری بین غلظت نیتروژن و شاخص طیفی PRI2 وجود دارد. سطح معنی داری حاصله از آزمون  $t$  نشان می‌دهد که مدل‌های فوق در سطح اطمینان ۹۰ درصد معنی دار است (جدول ۵ پیوست). بقیه نتایج به دست آمده در بررسی رابطه ممرز و بلوط با نیتروژن توسط این شاخص طیفی ارتباط معنی داری را نشان نمی‌دهد.

## - شاخص طیفی PRI3

بر اساس نتایج به دست آمده از بررسی رابطه شاخص طیفی PRI3 با میزان کلروفیل و نیتروژن اندازه گیری همه گونه‌ها، ارتباط معنی داری مشاهده می‌گردد (جدول ۶ پیوست).

ضریب همبستگی به دست آمده ( $r=0/47$ ) در رابطه کلروفیل برگ سایه توسکا با شاخص طیفی PRI3 نشان می‌دهد که همبستگی مثبت و معنی داری بین غلظت کلروفیل و شاخص طیفی PRI3 وجود دارد. سطح معنی داری حاصله از آزمون  $t$  نشان می‌دهد که مدل فوق در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار است. همانند نتایج شاخص‌های طیفی PRI1,2 این رابطه برای برگ نور و سایه به ترتیب مثبت و منفی می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده در

بقیه موارد هیچ گونه رابطه معنی داری در ارتباط غلظت کلروفیل و نیتروژن با این شاخص طیفی مشاهده نمی شود (جدول ۷ و ۸ پیوست).

### ۵-۲-۳-۲- رابطه رگرسیون شاخص طیفی SIPI با کلروفیل و نیتروژن

همانطور که در بخش قبل مواد و روش ها بیان شد شاخص طیفی SIPI حساس به تغییرات غلظت نسبت کارتنوئید به کلروفیل می باشد. از آن جا که این شاخص طیفی معرف خصوصیات ساختاری سلولی برگ نیز می باشد در بررسی تفاوت طیفی گونه های مختلف می تواند مؤثر باشد. در این راستا حساسیت آن از طریق بررسی چگونگی رابطه غلظت کلروفیل و نیتروژن موجود در برگ همه گونه ها با این شاخص طیفی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی بهترین مدل برازش شده را به صورت خطی و منفی با ضرایب همبستگی ۰/۳۶ و ۰/۶۷ به ترتیب برای کلروفیل برگ نور و سایه همه گونه ها نشان می دهد که بیانگر این است که با افزایش میزان کلروفیل در همه گونه ها از میزان شاخص طیفی SIPI کاسته می شود. سطح معنی داری حاصله از آزمون t نشان می دهد که مدل های فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی دار است (جدول ۵-۵). نتایج حاصل از رابطه نیتروژن برگ نور و سایه همه گونه ها نیز بهترین مدل برازش شده را به صورت خطی و منفی با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۳۶ نشان می دهد.

جدول ۵-۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی SIPI حاصل از برگ نور و سایه همه گونه های مورد مطالعه با کلروفیل و نیتروژن

| متغیر   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون         | درجه آزادی | ضریب همبستگی | ضریب تعیین (%) | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F        | سطح معنی داری |
|---------|------------|-----------------------|------------|--------------|----------------|----------------------------|---------|----------|---------------|
| کلروفیل | نور        | $y = -2/446x + 0/802$ | ۴۹         | -۰/۳۶        | ۱۳             | ۰/۰۰۰                      | -۲/۶۷   | ۷/۱۲۷*** | ۰/۰۱          |
|         | سایه       | $y = -0/458x + 0/659$ | ۴۹         | -۰/۶۷        | ۴۴             | ۰/۰۰۰                      | -۶/۱۹   | ۳۸/۳۷*** | ۰/۰۰۰         |
| نیتروژن | نور        | $y = -2/446x + 0/802$ | ۹۳         | -۰/۱۸        | ۳              | ۰/۰۰۰                      | -۱/۷۶   | ۳/۱۱*    | ۰/۰۸۱         |
|         | سایه       | $y = -0/458x + 0/659$ | ۹۳         | -۰/۳۶        | ۱۳             | ۰/۰۰۰                      | -۳/۶۸   | ۱۳/۵۳*** | ۰/۰۰۰         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪، \* معنی دار در سطح اطمینان ۹۰٪.

نتایج حاصل از بررسی حساسیت شاخص طیفی SIPI در سطح یک گونه در شرایط مختلف نور (برگ نور و سایه) در ارتباط با غلظت کلروفیل و یا نیتروژن آن، ضریب همبستگی متفاوتی را در هر گونه نشان می دهد. بدین شرح که

در رابطه‌ی کلروفیل برگ نور و سایه توسکا با شاخص طیفی SIPI ضرایب همبستگی به دست آمده، (به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۴۷) نشان می‌دهد که رابطه معنی‌داری وجود دارد. سطح معنی‌داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که مدل‌های فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد برای برگ نور و ۹۵ درصد برای برگ سایه معنی‌دار است. نتایج شاخص طیفی SIPI این رابطه را برای برگ نور و سایه به ترتیب مثبت و منفی نشان می‌دهد. همچنین برگ نور و سایه گونه انجیلی رابطه معنی‌داری را در ارتباط غلظت کلروفیل با این شاخص طیفی با ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۶۲ و ۰/۵۵ (در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد) نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده در رابطه شاخص طیفی SIPI گونه بلوط در هر دو حالت نور و سایه هیچ گونه ارتباط معنی‌داری را نشان نمی‌دهند (جدول ۹ پیوست).

نتایج به دست آمده در بررسی رابطه نیتروژن برگ گونه‌های توسکا، ممرز و راش در شرایط نور و سایه با شاخص طیفی SIPI، هیچ گونه ارتباط معنی‌داری را نشان نمی‌دهند. در مقابل ضرایب همبستگی به دست آمده ۰/۴۲ و ۰/۳۲ به ترتیب در رابطه نیتروژن برگ نور و سایه انجیلی با شاخص طیفی SIPI نشان می‌دهند که رابطه آن‌ها معنی‌دار است. سطح معنی‌داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که مدل فوق در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۱۰ پیوست). رابطه شاخص طیفی حاصل از برگ گونه بلوط در شرایط نور و سایه نیز با تغییرات نیتروژن با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۵۲ (در سطح اطمینان ۹۰ و ۹۵ درصد) معنی‌دار می‌باشد.

### ۵-۲-۳- رابطه رگرسیون شاخص طیفی Datt با کلروفیل و نیتروژن

این شاخص طیفی که بر طول موج‌های محدوده لبه قرمز پایه گذاری شده است به غلظت کلروفیل حساس می‌باشد. حساسیت این شاخص طیفی نیز در برگ‌های نور و سایه همه و هر یک از گونه‌ها در رابطه با غلظت کلروفیل و نیتروژن بررسی شده است. نتایج حاصل از این بررسی بهترین مدل برازش شده را به صورت خطی و مثبت با ضریب همبستگی ۰/۷۶ و ۰/۷۵ به ترتیب برای کلروفیل برگ نور و سایه گونه‌ها نشان می‌دهد که بیانگر این است که با افزایش میزان کلروفیل در همه گونه‌ها به میزان شاخص طیفی Datt افزوده می‌شود. سطح معنی‌داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که مدل‌های فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است (جدول ۶). نتایج حاصل از رابطه نیتروژن برگ نور و سایه گونه‌ها نیز بهترین مدل برازش شده را به صورت خطی و منفی با ضریب همبستگی ۰/۵۲ و ۰/۵۰ به ترتیب برای نیتروژن برگ نور و سایه گونه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۵-۶: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی Datt حاصل از برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه با کلروفیل و نیتروژن

| متغیر   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون        | درجه آزادی | ضریب همبستگی | ضریب تعیین (%) | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F        | سطح معنی داری |
|---------|------------|----------------------|------------|--------------|----------------|----------------------------|---------|----------|---------------|
| کلروفیل | نور        | $y = 2/446x + 0/802$ | ۴۹         | ۰/۷۶         | ۵۶             | ۰/۰۰۱                      | ۷/۹۸    | ۶۳/۷۶*** | ۰/۰۰۰         |
|         | سایه       | $y = 0/458x + 0/659$ | ۴۹         | ۰/۷۵         | ۵۶             | ۰/۰۰۰                      | ۷/۶۴    | ۵۸/۳۱*** | ۰/۰۰۰         |
| نیتروژن | نور        | $y = 2/446x + 0/802$ | ۹۳         | ۰/۵۲         | ۲۷             | ۰/۰۰۲                      | ۵/۸۴    | ۳۴/۱۲*** | ۰/۰۰۰         |
|         | سایه       | $y = 0/458x + 0/659$ | ۹۳         | ۰/۵۰         | ۲۵             | ۰/۰۰۲                      | ۵/۵۰    | ۲۹/۲۰*** | ۰/۰۰۰         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪

در رابطه‌ی کلروفیل برگ نور توسکا با شاخص طیفی Datt، ضریب همبستگی به دست آمده (۰/۴۴) نشان می‌دهد که همبستگی مثبت و معنی داری بین غلظت کلروفیل و شاخص طیفی Datt وجود دارد. سطح معنی داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که مدل فوق در سطح اطمینان ۹۰ درصد معنی دار است. نتایج به دست آمده در رابطه شاخص طیفی Datt گونه بلوط و انجیلی در هر دو حالت نور و سایه هیچ گونه ارتباط معنی داری را نشان نمی‌دهند (جدول ۱۱ پیوست).

ضریب همبستگی به دست آمده در رابطه‌ی نیتروژن برگ نور و سایه توسکا با شاخص طیفی Datt، به ترتیب به میزان  $r = 0/58$  و  $r = 0/75$  نشان می‌دهند که رابطه معنی داری در ارتباط غلظت نیتروژن با این شاخص طیفی وجود دارد. سطح معنی داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که مدل فوق در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد معنی دار است. نتایج به دست آمده در بررسی رابطه‌ی نیتروژن برگ گونه‌های ممرز، راش و بلوط در شرایط نور و سایه با شاخص طیفی Datt، هیچ گونه ارتباط معنی داری را نشان نمی‌دهند. ضریب همبستگی رابطه این شاخص طیفی حاصل از برگ سایه گونه انجیلی با نیتروژن، مثبت و معنی دار (۰/۶۱) و در سطح اطمینان ۹۵ درصد) می‌باشد (جدول ۱۲ پیوست).

#### ۵-۲-۳-۴- رابطه رگرسیون شاخص طیفی ANCB با کلروفیل و نیتروژن

همانطور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد این شاخص طیفی تغییرات غلظت کلروفیل و نیتروژن را در محدوده دیواره لبه قرمز بر اساس منحنی تبدیل شده CR نشان می‌دهد. طول موج‌های این محدوده حساس به دامنه وسیعی از

غلظت کلروفیل و نیتروژن می‌باشند. نتایج به دست آمده در رابطه‌ی کلروفیل برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه با شاخص طیفی ANCB، ارتباط معنی‌داری را نشان می‌دهند (جدول ۵-۷).

نتایج حاصل از این بررسی بهترین مدل برازش شده را به صورت خطی و مثبت با ضریب همبستگی یکسان ۰/۸۰ برای کلروفیل برگ نور و سایه گونه‌ها نشان داده و بیانگر این است که با افزایش میزان کلروفیل در همه گونه‌ها به میزان شاخص طیفی ANCB افزوده می‌شود. سطح معنی‌داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که مدل‌های فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است (جدول ۷). نتایج حاصل از رابطه نیتروژن برگ نور و سایه گونه‌ها نیز بهترین مدل برازش شده را به صورت خطی و مثبت با ضریب همبستگی ۰/۵۵ و ۰/۶۶ به ترتیب برای نیتروژن برگ نور و سایه گونه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۵-۷: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی ANCB حاصل از برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه با کلروفیل و نیتروژن

| متغیر   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون        | درجه آزادی | ضریب همبستگی | ضریب تعیین (%) | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F        | سطح معنی‌داری |
|---------|------------|----------------------|------------|--------------|----------------|----------------------------|---------|----------|---------------|
| کلروفیل | نور        | $y = 2/446x + 0/802$ | ۴۹         | ۰/۸۰         | ۶۴             | ۲/۶۴                       | ۹/۱۴    | ۸۳/۷۰*** | ۰/۰۰۰         |
|         | سایه       | $y = 0/458x + 0/659$ | ۴۹         | ۰/۸۰         | ۶۴             | ۲/۲۰                       | ۹/۱۱    | ۸۳/۰۵*** | ۰/۰۰۰         |
| نیتروژن | نور        | $y = 2/446x + 0/802$ | ۹۳         | ۰/۵۵         | ۳۰             | ۴/۴۹                       | ۶/۳۲    | ۴۰/۰۱*** | ۰/۰۰۰         |
|         | سایه       | $y = 0/458x + 0/659$ | ۹۳         | ۰/۶۶         | ۴۴             | ۳/۳۰                       | ۸/۵۱    | ۷۲/۵۱*** | ۰/۰۰۰         |

\*\*\* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹٪

نتایج به دست آمده در رابطه‌ی کلروفیل برگ نور و سایه هر یک از گونه‌های مورد مطالعه با شاخص طیفی ANCB، ارتباط معنی‌داری را نشان نمی‌دهند (جدول ۵-۸). به عبارت دیگر این شاخص طیفی به تغییرات غلظت کلروفیل در سطح هر گونه حساس نمی‌باشد.

جدول ۵-۸: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی ANCB از برگ نور و سایه گونه‌های توسکا، انجیلی و بلوط با کلروفیل

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون        | درجه آزادی | ضریب همبستگی | ضریب تعیین (%) | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F     | سطح معنی داری |
|--------|------------|----------------------|------------|--------------|----------------|----------------------------|---------|-------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = 0.015X + 3.761$ | ۱۵         | ۰/۰۵۳        | ۰/۳            | ۰/۰۰۵                      | ۰/۲۶    | ۰/۰۶۷ | ۰/۷۹۹         |
|        | سایه       | $y = 0.051X + 1.671$ | ۱۶         | ۰/۱۰         | ۱              | ۰/۴۳۸                      | ۰/۴۱۸   | ۰/۱۷۴ | ۰/۶۸۲         |
| انجیلی | نور        | $y = -0.02X + 2.184$ | ۱۴         | -۰/۰۱        | ۰              | ۰/۱۴۶                      | -۰/۳۰   | ۰/۰۰۱ | ۰/۹۷۶         |
|        | سایه       | $y = 0.060X - 1.276$ | ۱۴         | ۰/۱۶         | ۲              | ۰/۱۱۱                      | ۰/۵۶۸   | ۰/۳۲۲ | ۰/۵۸۰         |
| بلوط   | نور        | $y = 0.045X + 1.013$ | ۱۵         | ۰/۱۳         | ۲              | ۰/۱۲۶                      | ۰/۴۹۲   | ۰/۲۴۲ | ۰/۶۳۰         |
|        | سایه       | $y = -0.087X + 9.02$ | ۱۴         | -۰/۱۸        | ۳              | ۰/۳۱۴                      | -۰/۶۸۵  | ۰/۴۷۱ | ۰/۵۰۴         |

ضرایب همبستگی به دست آمده در رابطه‌ی نیتروژن برگ نور و سایه توسکا با شاخص طیفی ANCB، به ترتیب به میزان ۰/۷۷ و ۰/۷۸ نشان می‌دهند که رابطه معنی‌داری بین غلظت نیتروژن با این شاخص طیفی وجود دارد. سطح معنی‌داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که رابطه‌های فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است. نتایج به دست آمده در بررسی رابطه‌ی نیتروژن برگ گونه‌های ممرز، انجیلی و بلوط در شرایط نور و سایه با شاخص طیفی ANCB، ارتباط معنی‌داری (سطح اطمینان ۹۹ درصد) را نشان می‌دهند. ضرایب همبستگی به دست آمده در رابطه‌ی نیتروژن برگ نور و سایه ممرز با شاخص طیفی ANCB، به ترتیب به معادل ۰/۸۱ و ۰/۶۲، برای برگ نور و سایه انجیلی به ترتیب به معادل ۰/۶۸ و ۰/۶۶، و برای برگ نور و سایه بلوط به ترتیب به معادل ۰/۶۳ و ۰/۶۰ می‌باشد. همبستگی این شاخص طیفی حاصل از برگ سایه گونه راش با نیتروژن ( $r = 0.61$ ) معنی‌دار (سطح اطمینان ۹۰ درصد) بوده در حالی که برای برگ نور رابطه‌ی معنی‌داری مشاهده نمی‌شود (جدول ۵-۹).

جدول ۵-۹: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی ANCB حاصل از برگ نور و سایه گونه‌های مورد مطالعه با نیتروژن

| گونه  | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون        | درجه آزادی | ضریب همبستگی | ضریب تعیین (%) | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F        | سطح معنی داری |
|-------|------------|----------------------|------------|--------------|----------------|----------------------------|---------|----------|---------------|
| توسکا | نور        | $y = 0.050X - 2.271$ | ۱۵         | ۰/۷۷         | ۵۹             | ۰/۰۰۲                      | ۴/۶۲    | ۲۱/۳۸*** | ۰/۰۰۰         |
|       | سایه       | $y = 0.045X - 2.026$ | ۱۶         | ۰/۷۸         | ۶۱             | ۰/۰۰۲                      | ۴/۹۷    | ۲۴/۷۵*** | ۰/۰۰۰         |
| ممرز  | نور        | $y = 0.325X - 1.153$ | ۱۶         | ۰/۸۱         | ۶۶             | ۰/۰۰۱                      | ۵/۵۶    | ۳۰/۸۶*** | ۰/۰۰۰۰        |

|       |           |      |       |    |      |    |                       |      |        |
|-------|-----------|------|-------|----|------|----|-----------------------|------|--------|
| ۰/۰۰۶ | ۹/۹۹***   | ۳/۱۶ | ۰/۰۰۳ | ۳۸ | ۰/۶۲ | ۱۶ | $y = ۰/۰۴۷ X - ۱/۹۴۷$ | سایه | راش    |
| ۰/۹۰  | ۰/۰۱۶     | ۰/۱۳ | ۰/۰۱۹ | ۰  | ۰/۰۲ | ۲۴ | $y = ۰/۰۰۱ X + ۰/۳۶۷$ | نور  |        |
| ۰/۰۷۷ | ۳/۴۱۸*    | ۱/۸۵ | ۰/۰۰۲ | ۱۲ | ۰/۳۵ | ۲۴ | $y = ۰/۰۱۵ X - ۰/۴۳۱$ | سایه | انجیلی |
| ۰/۰۰۵ | ۱۱/۵۰۱*** | ۳/۳۹ | ۰/۰۰۱ | ۴۷ | ۰/۶۸ | ۱۳ | $y = ۰/۲۰۸ X - ۰/۹۲۱$ | نور  |        |
| ۰/۰۱۰ | ۹/۵۳۶***  | ۳/۰۹ | ۰/۰۰۱ | ۴۴ | ۰/۶۶ | ۱۲ | $y = ۰/۰۲۷ X - ۱/۲۸۸$ | سایه | بلوط   |
| ۰/۰۰۷ | ۹/۸۹۷***  | ۳/۱۴ | ۰/۰۰۵ | ۴۰ | ۰/۶۳ | ۱۵ | $y = ۰/۰۳۷ X - ۱/۴۸۹$ | نور  |        |
| ۰/۰۱۳ | ۸/۱۶۲***  | ۲/۸۶ | ۰/۰۰۷ | ۳۷ | ۰/۶۰ | ۱۴ | $y = ۰/۰۵۵ X - ۲/۵۴۹$ | سایه |        |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪، \* معنی دار در سطح اطمینان ۹۰٪.

### ۳-۵- تفاوت بازتاب طیفی گونه‌ها

به منظور بررسی تفاوت طیفی گونه‌ها بر اساس شاخص‌های طیفی مورد مطالعه، لازم است که آزمون نرمال بودن بر روی مقدار آن‌ها انجام شود. با انجام آزمون نرمال بودن به روش Kolmogorov-Smirnov موجود در بسته نرم افزاری SPSS، مشخص شد که پراکنش داده‌ها نرمال می‌باشد. بنابراین از آمار پارامتری و آماره میانگین برای تحلیل‌های آماری استفاده شد (جدول ۱۳ پیوست).

### ۳-۵-۱- تفاوت بازتاب گونه‌ها بر اساس شاخص‌های طیفی

#### - شاخص طیفی PRI1

از آنجا که کلروفیل تنها یکی از رنگدانه‌های مؤثر در فرایند فتوسنتز می‌باشد و داده‌های کلروفیل مربوط به دو گونه‌ی راش و ممرز نیز اندازه‌گیری نشده بودند، نمی‌توان تنها به نتایج به دست آمده از رابطه‌ی کلروفیل با شاخص‌های طیفی فتوسنتز به منظور تفکیک طیفی گونه‌ها استناد نمود.

بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده (پنوالاس و همکاران، ۱۹۹۵؛ گامون و همکاران، ۱۹۹۷) مبنی بر حساسیت خوب شاخص‌های طیفی PRI به مجموعه رنگدانه‌های فتوسنتز، از این شاخص طیفی در بررسی تفاوت طیفی هر یک از گونه‌ها در دو موقعیت تاج (برگ نور و سایه) و تفاوت گونه‌ها با یکدیگر استفاده شده است. بر اساس نتایج

به دست آمده، بیشترین ضریب همبستگی در رابطه‌ی نیتروژن و کلروفیل با شاخص‌های طیفی PRI، مربوط به PRI1 می‌باشد. از این رو تنها از شاخص طیفی PRI1 در بررسی تفاوت طیفی گونه‌ها استفاده شده است. ارزش این شاخص طیفی در پنج گونه مورد مطالعه از ۰ تا ۱/۰ تغییر می‌کند. مقدار این شاخص طیفی در برگ‌های نور همواره بیشتر از برگ‌های سایه می‌باشد. به طوری که بر اساس نتایج حاصل از آزمون t تفاوت معنی‌داری بین برگ‌های نور و سایه ممرز، راش و انجیلی وجود دارد. این تفاوت بین برگ‌های نور و سایه توسکا و بلوط معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۵-۱۰).

جدول ۵-۱۰: نتایج حاصل از آزمون t برای مقایسه برگ‌های نور و سایه هر گونه توسط شاخص‌های طیفی PRI

| شاخص طیفی PRI1 |        | درجه آزادی | گونه‌ها |
|----------------|--------|------------|---------|
| نتیجه آزمون    |        |            |         |
| p              | t      |            |         |
| ۰/۴۶۲          | ۰/۷۵۳  | ۱۶         | توسکا   |
| ۰/۰۳۹          | ۲/۲۲** | ۱۸         | ممرز    |
| ۰/۰۰۸          | ۲/۹**  | ۲۵         | راش     |
| ۰/۰۰۲          | ۴/۰**  | ۱۳         | انجیلی  |
| ۰/۲۰۶          | ۱/۳۲   | ۱۵         | بلوط    |

\*\* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪

بر اساس نتایج به دست آمده از جدول تحلیل واریانس، تفاوت معنی‌داری در مقایسه میانگین شاخص برگ‌های نور و همچنین سایه گونه‌ها وجود دارد (جدول ۵-۱۱). با انجام آزمون توکی مشخص گردید که برگ نور گونه ممرز با برگ بلوط و توسکا و همچنین برگ سایه گونه ممرز علاوه بر برگ سایه بلوط و توسکا با راش و انجیلی نیز تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهند (جدول ۵-۱۲).

جدول ۵-۱۱: جدول تجزیه واریانس مقایسه میانگین شاخص طیفی PRI1 تمامی گونه‌های مورد مطالعه در دو شرایط برگ نور و سایه

| موقعیت برگ | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F       | سطح معنی‌داری |
|------------|------------|--------------|----------------|---------|---------------|
| نور        | ۴          | ۰/۰۰۹        | ۰/۰۰۲          | ۵/۴۷*** | ۰/۰۰۱         |
| سایه       | ۴          | ۰/۰۰۶        | ۰/۰۰۲          | ۴/۲۵*** | ۰/۰۰۳         |

\*\*\* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹٪

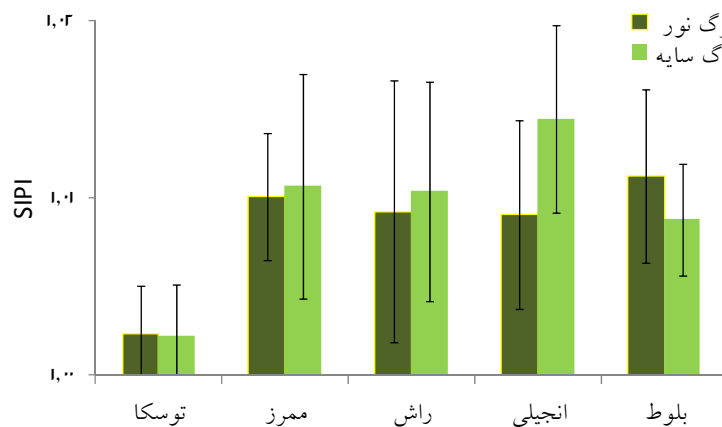
جدول ۵-۱۲: سطح معنی داری حاصل از مقایسه میانگین شاخص طیفی PRII بین گونه‌های مختلف در دو شرایط برگ نور و سایه بر اساس آزمون توکی ( $\alpha=0/05$ )

| انجیلی | راش   | ممرز    | توسکا   |      |        |
|--------|-------|---------|---------|------|--------|
|        |       |         | ۰/۰۰۱** | نور  | ممرز   |
|        |       |         | ۰/۰۳۱** | سایه |        |
|        |       | ۰/۰۶۲   | ۰/۳۲۳   | نور  | راش    |
|        |       | ۰/۰۲۹** | ۰/۹۹۹   | سایه |        |
|        | ۰/۹۹۰ | ۰/۳۱۶   | ۰/۲۲۷   | نور  | انجیلی |
|        | ۰/۷۵۷ | ۰/۰۰۲** | ۰/۹۰۳   | سایه |        |
| ۰/۴۹۷  | ۰/۶۶۸ | ۰/۰۰۳** | ۰/۹۸۶   | نور  | بلوط   |
| ۰/۹۴۴  | ۰/۹۹۶ | ۰/۰۲۹** | ۱/۰۰    | سایه |        |

\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۵٪

#### - شاخص طیفی SIPI

ارزش این شاخص طیفی در پنج گونه مورد مطالعه از ۱ تا ۱/۰۲ تغییر می‌کند (شکل ۵-۶). مقدار این شاخص طیفی در برگ‌های سایه در همه گونه‌ها بیشتر از برگ‌های نور آنها می‌باشد. نتایج حاصل از آزمون t نشان می‌دهد که با استفاده از شاخص طیفی SIPI، تنها بین برگ‌های نور و سایه انجیلی تفاوت معنی داری ( $P=0/019$  و  $\alpha=0/05$ ) وجود دارد و بین برگ نور و سایه هیچ یک از گونه‌های دیگر تفاوت معنی داری وجود ندارد (جدول ۱۴ پیوست).



شکل ۵-۶: میانگین و انحراف معیار مقدار شاخص طیفی SIPI در برگ نور و سایه هر یک از گونه‌ها

نتایج به دست آمده از محاسبه شاخص طیفی SIPI نشان می‌دهد که مقدار این شاخص طیفی در گونه توسکا در دو موقعیت نور و سایه از بقیه گونه‌ها کمتر بوده است. بر اساس نتایج به دست آمده از جدول تحلیل واریانس، تفاوت معنی داری در مقایسه میانگین شاخص برگ‌های نور و همچنین سایه همه گونه‌ها وجود دارد (جدول ۵-۱۳). با انجام آزمون توکی مشخص گردید که بین برگ نور توسکا با برگ نور بقیه گونه‌ها تفاوت معنی داری وجود دارد. این تفاوت‌ها در برگ سایه گونه توسکا نیز با بقیه گونه‌ها معنی دار است. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بین بقیه گونه‌های مورد مطالعه برای هر دو موقعیت برگ در تاج (نور و سایه) تفاوت معنی داری وجود ندارد (جدول ۱۴).

جدول ۵-۱۳: جدول تجزیه واریانس مقایسه میانگین شاخص طیفی SIPI بین گونه‌های مختلف در دو شرایط برگ نور و سایه

| موقعیت برگ | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F        | سطح معنی داری |
|------------|------------|--------------|----------------|----------|---------------|
| نور        | ۴          | ۰/۰۰۱        | ۰/۰۰۰          | ۶/۲۴***  | ۰/۰۰۰         |
| سایه       | ۴          | ۰/۰۰۱        | ۰/۰۰۰          | ۱۰/۲۰*** | ۰/۰۰۰         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪

جدول ۵-۱۴: سطح معنی داری حاصل از مقایسه میانگین شاخص طیفی SIPI تمامی گونه‌های مورد مطالعه در دو شرایط برگ نور و سایه بر اساس آزمون توکی ( $\alpha=0/05$ )

| انجیلی | راش   | ممرز  | توسکا   | نور  | سایه   |
|--------|-------|-------|---------|------|--------|
|        |       |       | ۰/۰۰۲** | نور  | ممرز   |
|        |       |       | ۰/۰۰۰** | سایه | ممرز   |
|        |       | ۰/۹۹۹ | ۰/۰۰۲** | نور  | راش    |
|        |       | ۱/۰۰  | ۰/۰۰۰** | سایه | راش    |
|        | ۱/۰۰  | ۱/۰۰  | ۰/۰۰۹** | نور  | انجیلی |
|        | ۰/۱۵۰ | ۰/۲۹۶ | ۰/۰۰۰** | سایه | انجیلی |
| ۰/۸۹۸  | ۰/۸۵۲ | ۰/۹۵  | ۰/۰۰۰** | نور  | بلوط   |
| ۰/۰۸۱  | ۰/۹۸۱ | ۰/۹۶۳ | ۰/۰۰۵** | سایه | بلوط   |

\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۵٪

## - شاخص طیفی Datt

ارزش این شاخص طیفی در پنج گونه مورد مطالعه از ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ تغییر می کند. مقدار این شاخص طیفی در برگ های نور بیشتر از برگ سایه بوده به طوری که بر اساس نتایج حاصل از آزمون t تفاوت معنی داری بین برگ های نور و سایه گونه های توسکا، راش و انجیلی وجود دارد (به ترتیب ۰/۰۰۲، ۰/۰۱، ۰/۰۰۰، P=۰/۰۰۰ و  $\alpha=۰/۰۵$ ). این تفاوت بین برگ های نور و سایه بلوط و ممرز معنی دار نمی باشد (جدول ۱۵ پیوست).

بر اساس نتایج به دست آمده از جدول تحلیل واریانس، تفاوت معنی داری در مقایسه میانگین شاخص برگ های نور و همچنین سایه همه گونه ها وجود دارد (جدول ۵-۱۵). با انجام آزمون توکی مشخص گردید، برگ نور گونه توسکا با راش، ممرز و انجیلی، گونه ممرز با بلوط و راش، گونه انجیلی با راش و بلوط تفاوت معنی داری را نشان می دهند. در حالی که تنها برگ سایه گونه توسکا با انجیلی تفاوت معنی داری را با یکدیگر نشان می دهند و برگ سایه بقیه گونه های مورد مطالعه با استفاده از این شاخص طیفی تفاوت معنی داری را با یکدیگر نشان نمی دهند (جدول ۵-۱۶).

جدول ۵-۱۵: جدول تجزیه واریانس مقایسه میانگین شاخص طیفی Datt تمامی گونه های مورد مطالعه در دو شرایط برگ نور و سایه

| موقعیت برگ | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F        | سطح معنی داری |
|------------|------------|--------------|----------------|----------|---------------|
| نور        | ۴          | ۰/۱۱۱        | ۰/۰۲۸          | ۲۲/۳۱*** | ۰/۰۰۰         |
| سایه       | ۴          | ۰/۰۶۵        | ۰/۰۱۶          | ۲/۵۵***  | ۰/۰۴۴         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪

جدول ۵-۱۶: سطح معنی داری حاصل از مقایسه میانگین شاخص طیفی Datt بین گونه های مختلف در دو شرایط برگ نور و سایه بر اساس آزمون توکی ( $\alpha=۰/۰۵$ )

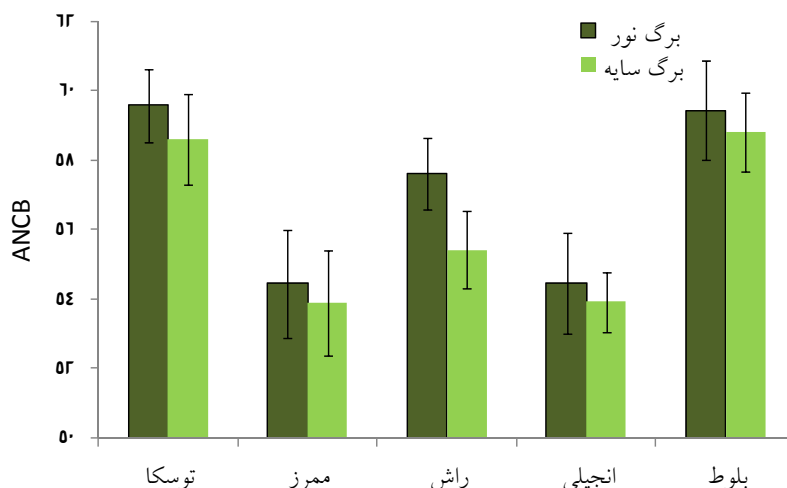
| انجیلی | راش      | ممرز     | توسکا    | نور  | سایه   |
|--------|----------|----------|----------|------|--------|
|        |          |          | ۰/۰۰۰*** | نور  | ممرز   |
|        |          |          | ۰/۱۶۷    | سایه | ممرز   |
|        |          | ۰/۰۰۴*** | ۰/۰۱۳*** | نور  | راش    |
|        |          | ۰/۹۰۷    | ۰/۵۰۸    | سایه | راش    |
|        | ۰/۰۰۰*** | ۰/۲۹۰    | ۰/۰۰۰*** | نور  | انجیلی |

|         |       |       |         |      |      |
|---------|-------|-------|---------|------|------|
|         | ۰/۳۸۲ | ۰/۸۸۸ | ۰/۰۲۵** | سایه |      |
| ۰/۰۰۰** | ۰/۳۱۸ | ۰/۰۰۰ | ۰/۷۶۰   | نور  | بلوط |
| ۰/۶۲۶   | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۸۳ | ۰/۴۵۸   | سایه |      |

\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۵٪

### - شاخص طیفی ANCB

ارزش این شاخص طیفی در پنج گونه مورد مطالعه از ۵۰ تا ۶۳ تغییر می کند (شکل ۵-۷). مقدار این شاخص طیفی در برگ های نور گونه های مورد مطالعه بیشتر از برگ سایه آنها می باشد. بر اساس نتایج حاصل از آزمون t، تفاوت معنی داری بین برگ های نور و سایه گونه های توسکا و راش وجود دارد (به ترتیب  $P=۰/۰۰۰۰$  و  $\alpha=۰/۰۵$ ). این تفاوت بین برگ های نور و سایه ممرز، انجیلی و بلوط معنی دار نمی باشد (جدول ۱۶ پیوست).



شکل ۵-۷: میانگین و انحراف معیار مقدار شاخص طیفی ANCB در برگ نور و سایه هر یک از گونه ها

بر اساس نتایج به دست آمده از جدول تحلیل واریانس، تفاوت معنی داری در مقایسه میانگین شاخص برگ های نور و همچنین سایه همه گونه ها وجود دارد (جدول ۵-۱۷). با انجام آزمون توکی مشخص گردید، بین برگ نور گونه توسکا و برگ نور بلوط و همچنین برگ نور گونه ممرز و برگ نور انجیلی تفاوت معنی داری وجود ندارد. این تفاوت ها در برگ سایه گونه های یاد شده نیز معنی دار نمی باشد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که بین بقیه گونه های مورد مطالعه برای هر دو موقعیت برگ در تاج (نور و سایه) تفاوت معنی داری وجود دارد (جدول ۵-۱۸).

جدول ۵-۱۷: جدول تجزیه واریانس مقایسه میانگین شاخص طیفی ANCB تمامی گونه‌های مورد مطالعه در دو شرایط برگ نور و سایه

| موقعیت برگ | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F        | سطح معنی داری |
|------------|------------|--------------|----------------|----------|---------------|
| نور        | ۴          | ۴۴۵/۶۵       | ۱۱۱/۴۱         | ۶۶/۴۱*** | ۰/۰۰۰         |
| سایه       | ۴          | ۴۱۷/۱۷       | ۱۰۴/۳۰         | ۷۰/۴۶*** | ۰/۰۰۰         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪

جدول ۵-۱۸: سطح معنی داری حاصل از مقایسه میانگین شاخص طیفی ANCB بین گونه‌های مختلف در دو شرایط برگ نور و سایه بر اساس آزمون توکی ( $\alpha=0/05$ )

| انجیلی   | راش      | ممرز     | توسکا    | نور  | سایه   |
|----------|----------|----------|----------|------|--------|
|          |          |          | ۰/۰۰۰*** | نور  | ممرز   |
|          |          |          | ۰/۰۰۰*** | سایه | ممرز   |
|          |          | ۰/۰۰۰*** | ۰/۰۰۰*** | نور  | راش    |
|          |          | ۰/۰۰۱*** | ۰/۰۰۰*** | سایه | راش    |
|          | ۰/۰۰۰*** | ۱/۰۰۰*** | ۰/۰۰۰*** | نور  | انجیلی |
|          | ۰/۰۰۴*** | ۰/۹۹۹    | ۰/۰۰۰*** | سایه | انجیلی |
| ۰/۰۰۰*** | ۰/۰۰۰*** | ۰/۰۰۰*** | ۱/۰۰     | نور  | بلوط   |
| ۰/۰۰۰*** | ۰/۰۰۰*** | ۰/۰۰۰*** | ۰/۹۶۶    | سایه | بلوط   |

\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۵٪

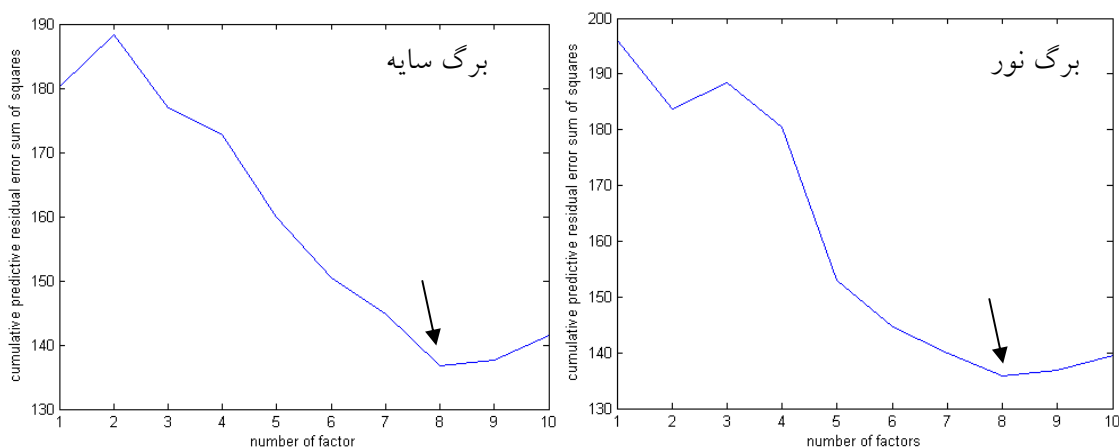
### ۵-۳-۲- تفاوت بازتاب طیفی گونه‌ها بر اساس رگرسیون حداقل مربعات بخشی (PLS)

#### ۵-۳-۲-۱- تفکیک طیفی گونه‌ها بدون در نظر گرفتن متغیر نیتروژن

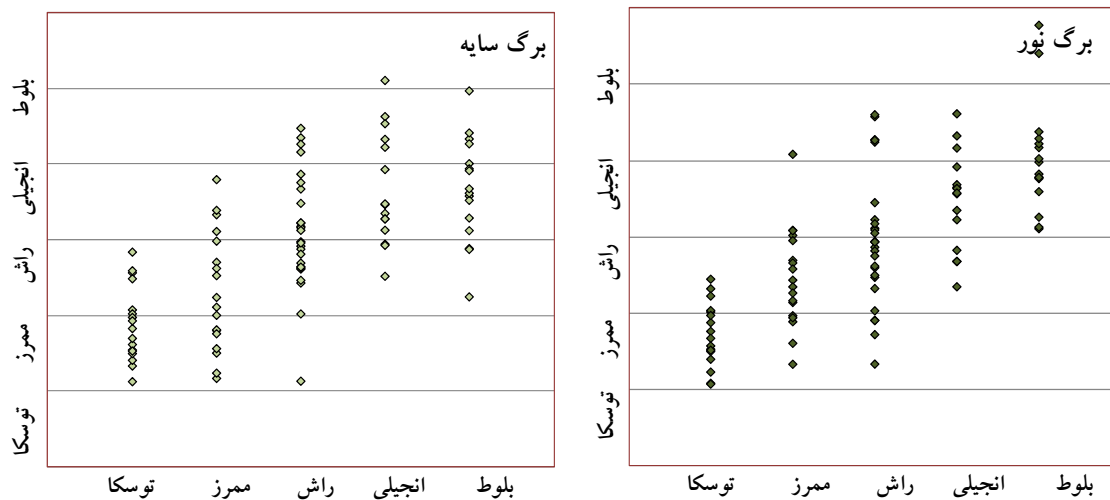
با توجه به هدف اصلی این تحقیق که بررسی تفکیک طیفی گونه‌ها در محدوده‌های طیفی متفاوت می‌باشد، از مدل رگرسیون PLS برای بررسی طبقه‌بندی نمونه‌ها استفاده شد. بدین منظور از تمامی طول موج‌ها استفاده شده و گونه‌های مورد مطالعه‌ی توسکا، ممرز، راش، انجیلی و بلوط به ترتیب با طبقه‌های ۱ تا ۵ مشخص شدند.

همانطور که در تشریح روش حداقل مربعات بخشی گفته شد، فاکتور مناسب در برازش مدل بر اساس حداقل میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده پیش بینی شده تجمعی (PRESS) تعیین می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده در برازش بهترین مدل برای برآورد طبقه مربوط به هر گونه بر اساس انعکاس طیفی برگ‌های نور و سایه آن‌ها، کمترین میزان PRESS مربوط به فاکتور هشتم بوده است (شکل ۵-۸). RMSECV حاصل از اعتبار سنجی مدل به دست آمده، معادل  $1/2153$  و  $1/2123$  به ترتیب در برگ نور و سایه گونه‌ها است. ضریب همبستگی به دست آمده بین طبقه‌های وارد شده و برآورد شده توسط مدل رگرسیون PLS برای برگ نور و سایه به ترتیب معادل  $0/68$  و  $0/65$  می‌باشد (جدول ۵-۱۹).

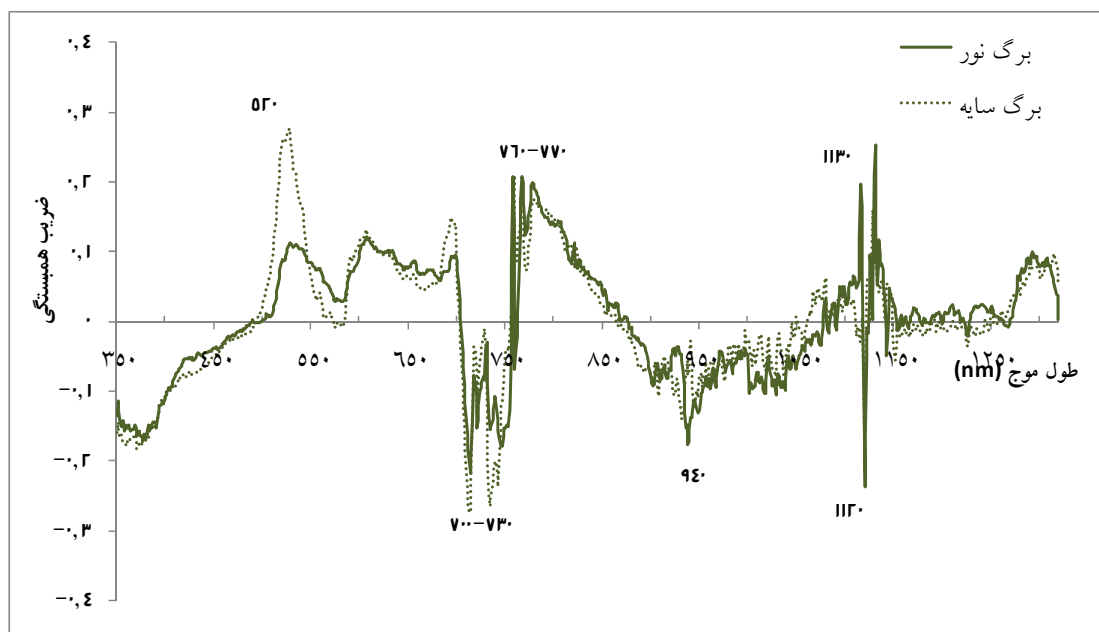
بر اساس نتایج به دست آمده در برآورد طبقه مربوط به هر نمونه با استفاده از مدل، گونه‌های توسکا و بلوط بیشترین و راش و ممرز کمترین تفاوت طیفی را در محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک نشان می‌دهند. بیشترین تداخل طیفی بین راش و ممرز دیده می‌شود. همانطور که در شکل ۵-۹ مشاهده می‌گردد و بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل PLS، این تفاوت در برگ‌های نور بیشتر و نمونه‌ها به طور مشخص تری در طبقات مربوط به هر گونه تخصیص یافته‌اند. نتایج تجزیه هم‌زمان انجام شده بر متغیر مستقل طول موج نشان می‌دهد که طول موج‌های جذب کلروفیل a در طول موج ۵۲۰ نانومتر، محدوده لبه قرمز در طول موج‌های ۷۳۰-۷۰۰ و ۷۷۰-۷۶۰ و طول موج جذب آب مربوط به رطوبت برگ ۱۱۳۰-۱۱۲۰ نانومتر، بیشترین سهم را در تفکیک طیفی گونه‌ها دارد. به علاوه در برگ‌های سایه طول موج ۵۲۰ نانومتر سهم ویژه‌ای را در تفکیک گونه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۵-۱۰).



شکل ۵-۸: میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده پیش بینی شده تجمعی (CumPRESS) در هر فاکتور و انتخاب بهترین فاکتور بر اساس حداقل PRESS بر اساس لحاظ کردن تنها نمونه‌های طیفی (با فلش مشخص شده است).



شکل ۵-۹: نتایج مدل PLS در برآورد طبقه مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ‌های نور (راست) و سایه (چپ) آن‌ها به طور جداگانه و طبقه بندی گونه‌ها بر اساس در نظر گرفتن تنها نمونه‌های طیفی بدون دخالت نیتروژن (محورهای X و Y به ترتیب طبقه‌های تعیین شده و برآورد شده توسط مدل برای هر گونه که به نام همان گونه نشان داده شده است).



شکل ۵-۱۰: نمودار ضرایب همبستگی حاصل از مدل PLS در طول موج‌های مختلف در رابطه با تفکیک گونه‌ها بر اساس در نظر گرفتن تنها نمونه‌های طیفی بدون دخالت نیتروژن (محدوده طیفی ۳۵۰ تا ۱۳۵۰ نانومتر به علت وجود کمترین خطا در نظر گرفته شده است).

جدول ۵-۱۹: نتایج مدل PLS برای برآورد طبقه مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ‌های نور و سایه آن‌ها به طور جداگانه و تعیین بهترین طول موج‌ها در تفکیک گونه‌ها در محدوده ۱۳۲۰-۳۵۰ نانومتر، I: ضریب همبستگی مدل اعتبار سنجی شده بین کدهای برآورد شده و تعیین شده

(r: the cross validated regression coefficient between measured and predicted variables ، RMSECV: root mean squareerror of cross-validation)

| تفکیک گونه‌ها بدون متغیر نیتروژن | تعداد نمونه‌ها | موقعیت برگ | تفکیک گونه‌ها بدون متغیر نیتروژن |        |      |
|----------------------------------|----------------|------------|----------------------------------|--------|------|
|                                  |                |            | شماره فاکتور                     | RMSECV | r    |
| بهترین طول موج‌ها                |                |            |                                  |        |      |
| ۱۱۲۰-۱۱۳۰، ۷۶۰-۷۷۰، ۷۲۰-۷۳۰، ۵۲۰ | ۹۴             | نور        | ۸                                | ۱/۲۱   | ۰/۶۸ |
| ۱۱۲۰-۱۱۳۰، ۷۶۰-۷۷۰، ۷۲۰-۷۳۰      | ۹۴             | سایه       | ۸                                | ۱/۲۱   | ۰/۶۵ |

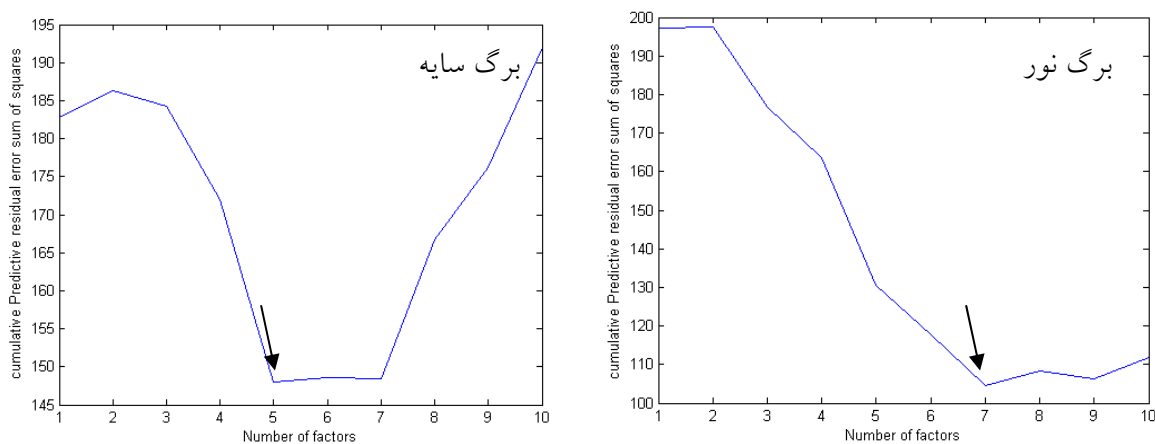
### ۵-۳-۲-۲- تفکیک طیفی گونه‌ها با در نظر گرفتن متغیر نیتروژن

همانطور که گفته شد نیتروژن در ساختار مولکولی مواد متفاوتی چون کلروفیل، انواع پروتئین، سلولز، لیگنین و نشاسته وجود دارد، از این رو بازتاب طیفی گیاه را در محدوده‌های طول موج وسیعی از محدوده مرئی تا مادون قرمز دور تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین با دخالت متغیر نیتروژن، طبقه بندی گونه‌ها بر اساس پیش‌بینی میزان غلظت نیتروژن آن‌ها بر پایه تفاوت بازتاب در کل محدوده طیفی اندازه گیری شده از ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر با استفاده از برآزش بهترین مدل PLS انجام شده است.

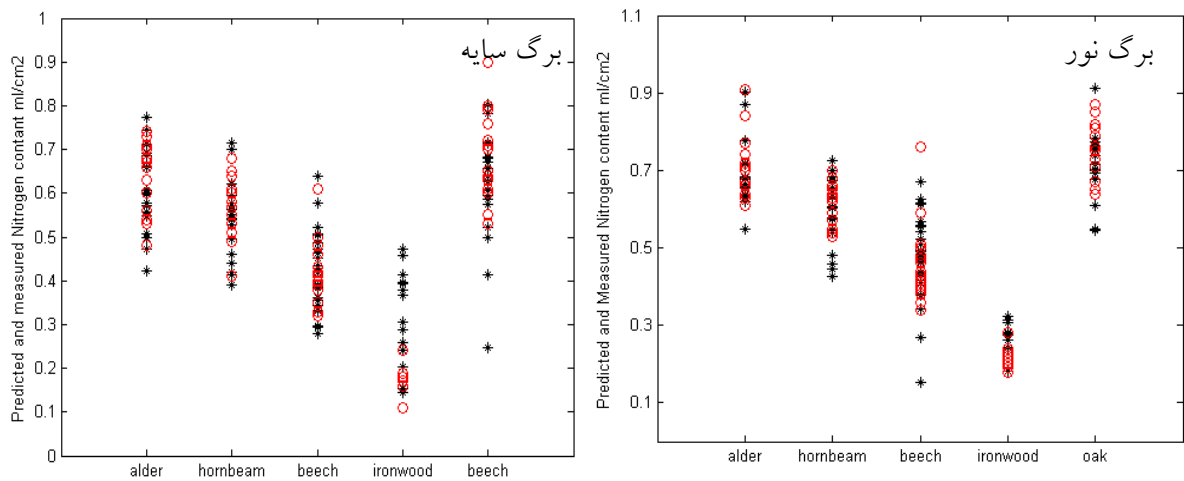
بر اساس نتایج به دست آمده برای برآزش بهترین مدل در برآورد نیتروژن گونه‌های مورد مطالعه کمترین میزان PRESS، مربوط به فاکتور هفتم در برگ نور و فاکتور پنجم در برگ سایه بوده است (شکل ۵-۱۱). RMSECV حاصل از اعتبار سنجی مدل به دست آمده، معادل ۰/۱۶ میلی گرم بر سانتی متر مربع در برآورد نیتروژن برگ‌های نور و سایه گونه‌ها می‌باشد. ضرایب همبستگی به دست آمده بین نیتروژن اندازه گیری شده و برآورد شده توسط مدل رگرسیون PLS برای برگ‌های نور و سایه به ترتیب معادل ۰/۸۵ و ۰/۷۱ می‌باشد (جدول ۵-۲۰). میزان F و سطح معنی‌داری حاصله در جدول تجزیه واریانس، نشان می‌دهد که مدل‌های فوق برای برگ‌های نور و سایه در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است. مقایسه ضرایب همبستگی با حالت قبل (بدون لحاظ کردن متغیر نیتروژن) به دست

آمده نشان می‌دهد که نتایج تفکیک طیفی گونه‌های مورد مطالعه با وارد کردن متغیر نیتروژن به میزان  $10/3$  و  $9/2$  درصد بهبود پیدا کرده است.

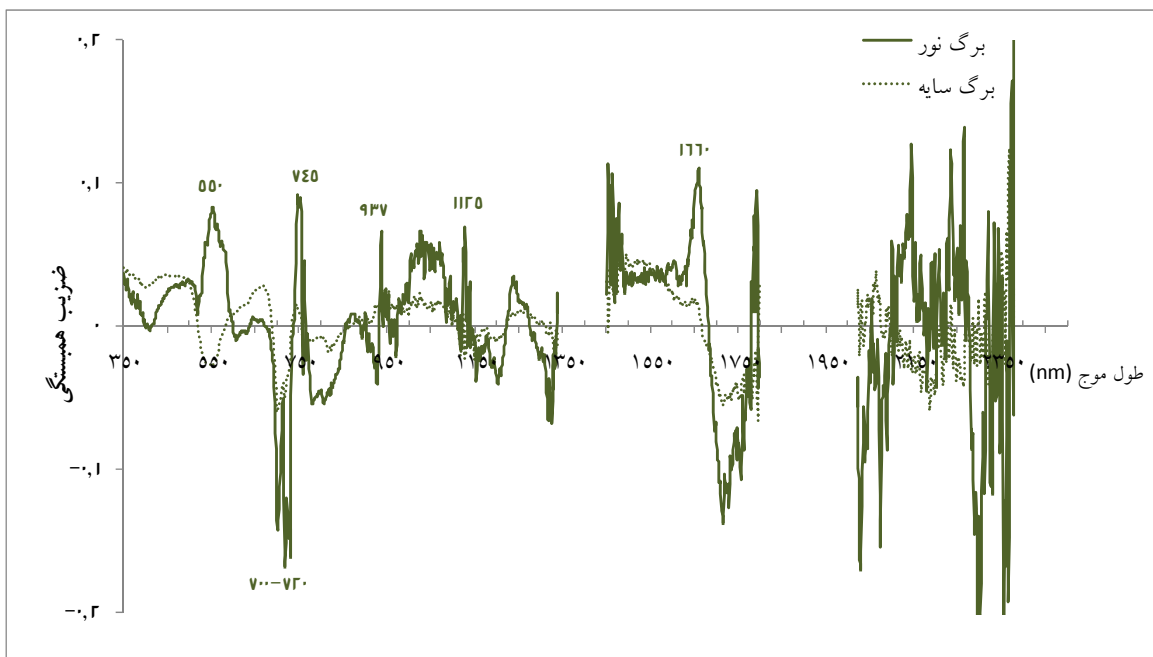
همانطور که در شکل ۵-۱۲ مشاهده می‌شود، بر اساس نتایج به دست آمده در برآورد نیتروژن با استفاده از مدل PLS، برگ‌های نور نسبت به برگ‌های سایه تفکیک طیفی بیشتری را نشان می‌دهند. گونه انجیلی به طور مشخص از گونه‌های دیگر تفکیک شده و گونه‌های راش و ممرز نیز با بلوط تفکیک طیفی بهتری را نسبت به گونه‌های دیگر نشان می‌دهند. گونه‌های توسکا و بلوط و همچنین راش و ممرز بیشترین تداخل طیفی را از لحاظ تفاوت غلظت نیتروژن نشان می‌دهند. بر اساس نتایج به دست آمده، تفاوت‌های طیفی همانند نتایج به دست آمده از مدل قبلی، در محدوده‌های طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک به خصوص محدوده لبه قرمز بارزتر می‌باشد. نتایج تجزیه هم‌زمان انجام شده بر متغیر مستقل طول موج نیز نشان می‌دهد ضریب همبستگی طول موج‌های مؤثر در جذب نیتروژن، در برگ نور گونه‌های مورد مطالعه بیشتر از برگ سایه می‌باشد. بدین معنا که در طول موج‌های ۵۵۰، ۷۲۰-۷۰۰، ۷۴۵، ۱۶۶۰ تغییرات غلظت نیتروژن در برگ‌های نور نسبت به برگ‌های سایه بیشتر قابل توجه می‌باشد. (شکل ۵-۱۳).



شکل ۵-۱۱: میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده پیش بینی شده تجمعی (CumPRESS) در هر فاکتور و انتخاب بهترین فاکتور بر اساس حداقل PRESS با لحاظ کردن متغیر نیتروژن (با فلش مشخص شده است).



شکل ۵-۱۲: نتایج مدل PLS در برآورد نیتروژن مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ‌های نور (راست) و سایه (چپ) آن‌ها به طور جداگانه و طبقه بندی گونه‌ها بر اساس تفاوت غلظت نیتروژن آن‌ها (دایره: نیتروژن اندازه گیری شده، ستاره: نیتروژن برآورد شده، محور X گونه‌ها و محور Y میزان نیتروژن برآورد شده برای هر گونه توسط مدل را نشان می‌دهد).



شکل ۵-۱۳: نمودار ضرایب همبستگی حاصل از مدل PLS در طول موج‌های مختلف در رابطه با تفکیک گونه‌ها بر اساس تفاوت طیفی آن‌ها بر اساس تفاوت غلظت نیتروژن

جدول ۵-۲۰: نتایج مدل PLS برای برآورد نیتروژن مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ‌های نور و سایه آن‌ها به طور جداگانه و طبقه بندی گونه‌ها بر اساس تفاوت غلظت نیتروژن آن‌ها و تعیین بهترین طول موج‌ها در تفکیک گونه‌ها در محدوده ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر،  $r$ : ضریب همبستگی مدل اعتبار سنجی شده بین نیتروژن برآورد شده و اندازه‌گیری شده

( $r$ : the cross validated regression coefficient between measured and predicted variables ، RMSECV: root mean squareerror of cross-validation)

| تفکیک گونه‌ها با دخالت متغیر نیتروژن    | تعداد نمونه‌ها | موقعیت برگ | تفکیک گونه‌ها با دخالت متغیر نیتروژن |        |      |
|---|----------------|------------|--------------------------------------|--------|------|
|   |                |            | شماره فاکتور                         | RMSECV | $r$  |
| بهترین طول موج‌ها                       |                |            |                                      |        |      |
| ۱۶۶۰ ، ۱۱۲۵ ، ۹۳۷ ، ۷۴۵ ، ۷۰۰-۷۲۰ ، ۵۵۰ | ۹۴             | نور        | ۷                                    | ۰/۱۶   | ۰/۸۵ |
| ۱۱۲۵ ، ۹۳۷ ، ۷۲۰-۷۳۰                    | ۹۴             | سایه       | ۵                                    | ۰/۱۶   | ۰/۷۱ |

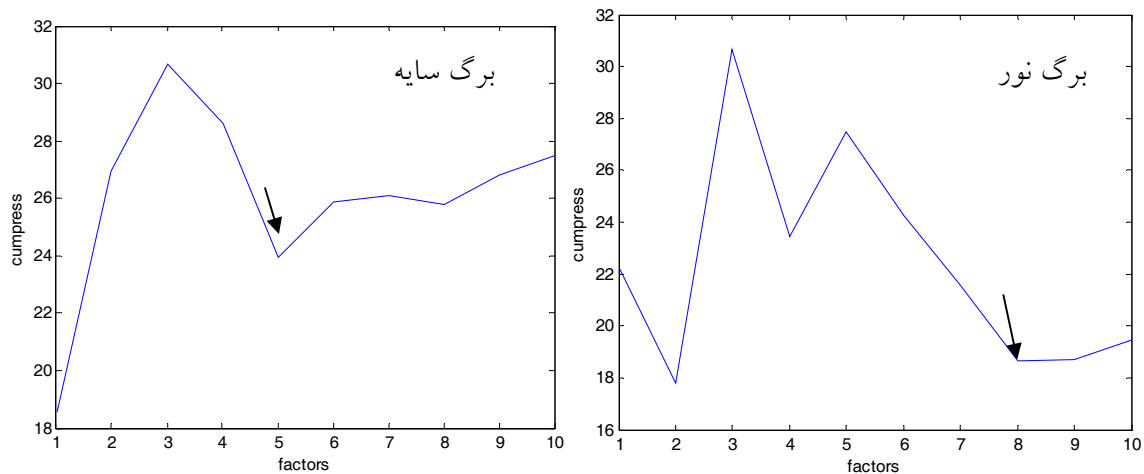
#### ۴-۵ - بخش دوم نتایج

#### - بررسی تفکیک طیفی راش در سه رویشگاه ارتفاعی

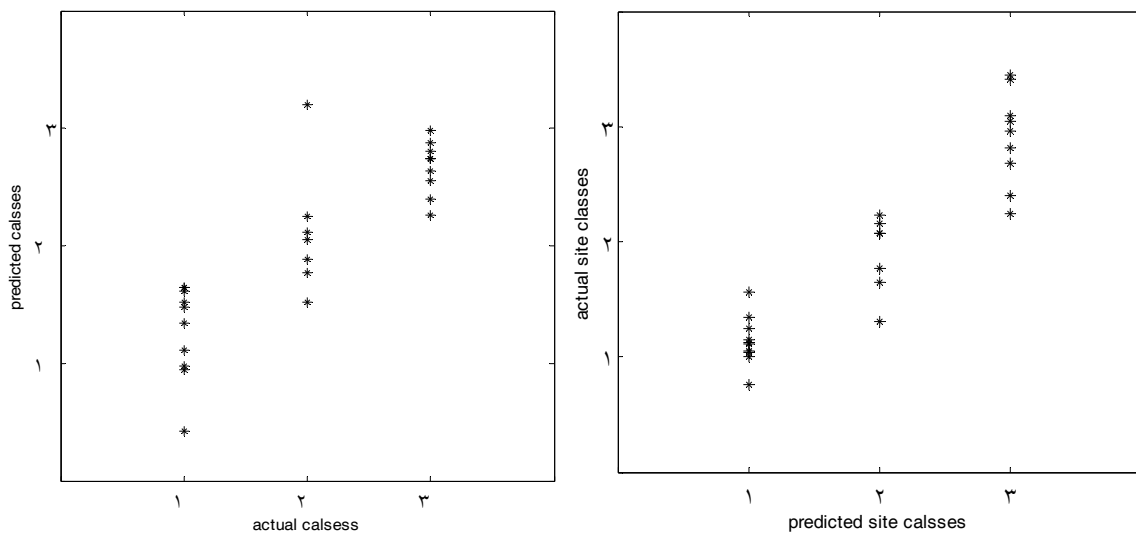
به منظور بررسی تفاوت رفتار طیفی گونه راش در سه رویشگاه ارتفاعی پایین‌بند، میان‌بند و بالابند (به ترتیب ۱۰۰۰-، ۱۵۰۰-۱۰۰۰ و ۲۰۰۰-۱۵۰۰ متر) در محدوده‌های طول موج مختلف از مرئی تا مادون قرمز دور، از مدل رگرسیون PLS استفاده گردید. بدین منظور بازتاب طیفی اندازه‌گیری شده درختان راش در سه رویشگاه ارتفاعی پایین‌بند، میان‌بند و بالابند به ترتیب با طبقه‌های ۱، ۲ و ۳ مشخص و مورد تجزیه و تحلیل و طبقه‌بندی قرار گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده برای برازش بهترین مدل، کمترین میزان PRESS، مربوط به فاکتور هشتم در برگ نور و فاکتور پنجم در برگ سایه بوده است (شکل ۵-۱۴). RMSECV حاصل از اعتبار سنجی مدل به دست آمده معادل ۰/۸۶ و ۱/۰۲، به ترتیب برای برگ نور و سایه می‌باشد. ضریب همبستگی به دست آمده بین طبقه‌های وارد شده و برآورد شده توسط مدل رگرسیون PLS برای برگ نور و سایه به ترتیب معادل ۰/۹۲ و ۰/۸۵ می‌باشد (جدول ۵-۲۱).

بر اساس نتایج به دست آمده از مدل PLS در طبقه‌بندی منحنی‌های بازتاب درختان راش در سه رویشگاه ارتفاعی، تفکیک طیفی برگ‌های نور نسبت به برگ‌های سایه بهتر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بازتاب طیفی درختان راش در رویشگاه پایین‌بند به طور مشخص‌تری با درختان راش در رویشگاه بالابند و همچنین بالابند با میان‌بند،

متفاوت می‌باشد. به بیان دیگر تداخل طیفی بیشتری بین درختان راش در رویشگاه پایین‌بند و میان‌بند دیده می‌شود. (شکل ۵-۱۵). نتایج تجزیه هم‌زمان انجام شده بر متغیر مستقل طول موج نشان می‌دهد که ضریب همبستگی طول موج‌های مؤثر در تفاوت طیفی برگ نور نمونه‌های اندازه‌گیری شده بیشتر از برگ سایه می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده در هر دو حالت، تفاوت‌های طیفی در طول موج‌های ۵۵۰، ۶۸۰، ۷۳۰-۷۲۰، ۷۸۰-۷۶۰، ۹۲۰، ۱۱۲۵ و ۱۱۶۰ بارزتر می‌باشد (شکل ۵-۱۶).

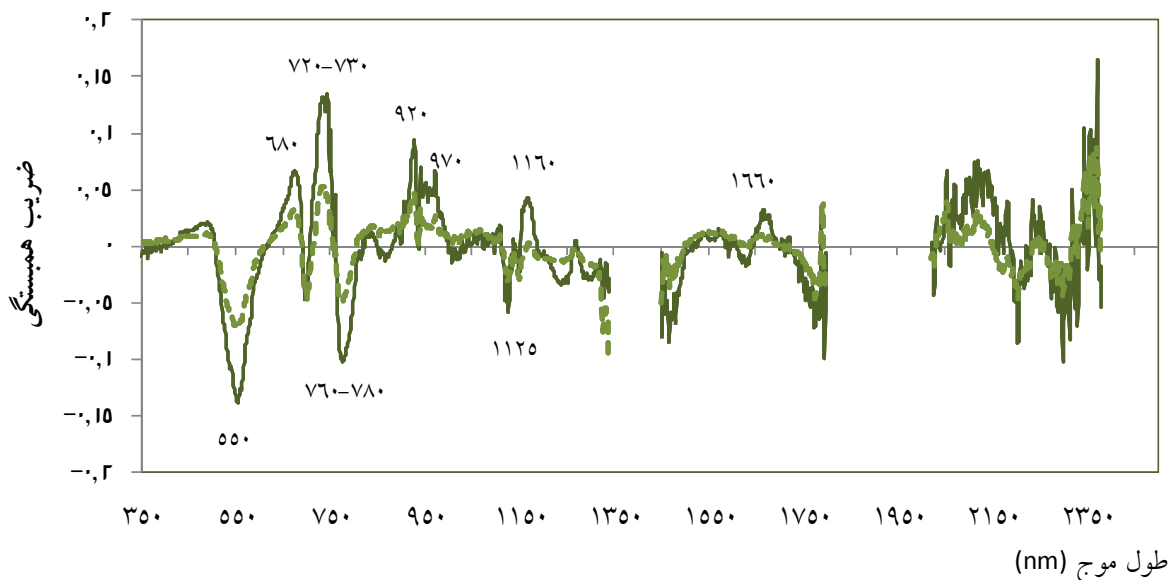


شکل ۵-۱۴: میزان مجموع مربعات خطای باقیمانده پیش‌بینی شده تجمعی (CumPRESS) در هر فاکتور و انتخاب بهترین فاکتور بر اساس حداقل PRESS



شکل ۵-۱۵: نتایج مدل PLS در برآورد طبقه مربوط به هر گونه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ‌های نور (راست) و سایه (چپ) آن‌ها به طور جداگانه و طبقه بندی گونه‌ها بر اساس تفاوت طیفی آن‌ها بدون دخالت نیتروژن (محور X):

طبقه‌های وارد شده، محور Y: طبقه‌های برآورد شده توسط مدل رگرسیون PLS، طبقه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب رویشگاه‌های پایین‌بند، میان‌بند و بالابند).

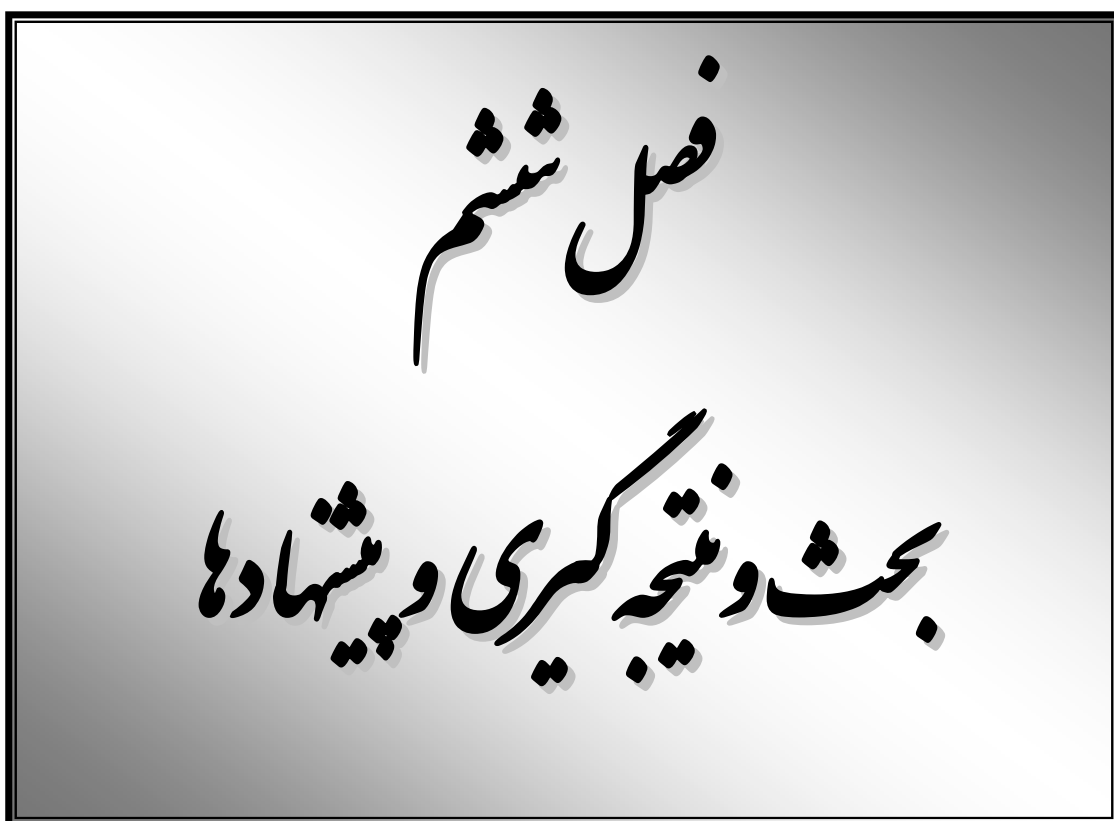


شکل ۵-۱۶: نمودار ضرایب همبستگی حاصل از مدل PLS در طول موج‌های مختلف در رابطه با تفکیک درختان راش در سه رویشگاهی بالابند، میان‌بند و پایین‌بند (به ترتیب طبقه‌های ۱، ۲ و ۳) بر اساس تفاوت طیفی آنها

جدول ۵-۲۱: نتایج مدل PLS برای برآورد طبقه هر رویشگاه بر اساس تفاوت انعکاس طیفی برگ‌های نور و سایه آنها به طور جداگانه و تعیین بهترین طول موج‌ها در تفکیک گونه‌ها در محدوده ۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر، I: ضریب همبستگی مدل اعتبار سنجی شده بین طبقه وارد شده و برآورد شده توسط مدل

(r: the cross validated regression coefficient between measured and predicted variables , RMSECV: root mean squareerror of cross-validation)

| تفکیک گونه‌ها با دخالت متغیر نیتروژن              | موقعیت برگ     |              |
|---|----------------|--------------|
|   | تعداد نمونه‌ها | شماره فاکتور |
| بهترین طول موج‌ها                                 | r              | RMSECV       |
| ۱۶۶۰، ۱۱۶۰، ۱۱۲۵، ۹۲۰، ۷۶۰-۷۸۰، ۷۲۰-۷۳۰، ۶۸۰، ۵۵۰ | ۰/۹۲           | ۰/۸۶         |
| نور   | ۲۹             | ۸            |
| ۱۱۲۵، ۹۲۰، ۷۶۰-۷۸۰، ۷۲۰-۷۳۰، ۶۸۰، ۵۵۰             | ۰/۸۵           | ۱/۰۲         |
| سایه  | ۲۹             | ۵            |



## ۶-۱- مشخصه طیفی گونه‌ها

تغییرات هر چند اندک در وزش باد، دما و رطوبت محیط در یک فاصله زمانی بسیار کوتاه کمتر از یک دقیقه‌ای در حین طیف سنجی هر نمونه، می‌تواند موجب خطاهایی در کار طیف سنج و طیف سنجی شود. از این رو افزایش تعداد اسکن‌ها (حدود ۱۰۰ اسکن) در هر تکرار و میانگین‌گیری از آن‌ها ضروری است. کوهران و همکاران (۲۰۰۰) نیز برای رسیدن به حداقل خطا و حداکثر دقت در تهیه کتابخانه‌های طیفی، به ضرورت افزایش تعداد اسکن‌ها و کالیبره کردن مکرر دستگاه حین اندازه‌گیری طیفی، هم‌چنین اندازه‌گیری طیفی بیش از یک شاخه از هر درخت و میانگین‌گیری از آن‌ها یادآور شده است.

اگر چه عوامل زیادی می‌تواند بر انعکاس طیفی گیاهان در سطح جنس، گونه و حتی یک پایه درختی در شرایط متفاوت رویشگاهی مؤثر باشد اما منحنی انعکاس طیفی گیاه به لحاظ داشتن اطلاعات بسیار گسترده مرتبط با مورفولوژی و فیزیولوژی می‌تواند در سطوح مختلف اطلاعات کلی تا بسیار جزئی را ارائه دهد (کارد<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۸۸؛ دمارز و همکاران، ۱۹۹۹؛ استیر و کولن<sup>۲</sup>، ۲۰۰۳). علاوه بر این استفاده از روش‌های مناسب بارزسازی اطلاعات در سطح مورد نظر، توانسته دقت طبقه‌بندی و تفکیک طیفی گیاهان را افزایش دهد. از بهترین و مناسب‌ترین روش‌ها می‌توان به شاخص‌های طیفی، تبدیل منحنی طیفی به روش مشتق‌گیری، CR و روش‌های آماری پیشرفته از جمله مدل رگرسیون PLS اشاره نمود. تحقیقات و مطالعات زیادی کارایی این روش‌ها را تأیید کرده است (اورسیوال<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۹؛ کوکالی، ۲۰۰۱؛ ایمانیشی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۴؛ نیوادوسکا<sup>۵</sup>، ۲۰۰۷؛ گومز<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۸).

نتایج تحقیقات زیادی نشان می‌دهند که منحنی انعکاس طیفی در محدوده‌های مرئی تحت تاثیر رنگدانه‌ها (هوکو<sup>۷</sup> و همکاران، ۱۹۹۲؛ بلک برن، ۱۹۹۸؛ اسنر و مارتین<sup>۸</sup>، ۲۰۰۸) و در محدوده مادون قرمز نزدیک و میانی تحت تاثیر ساختار سلولی برگ (گاسمن و آلن، ۱۹۷۳؛ براک<sup>۹</sup> و همکاران، ۱۹۹۳؛ کلارک و همکاران، ۲۰۰۵؛ لی<sup>۱۰</sup> و همکاران،

<sup>1</sup> Card

<sup>2</sup> Staehr & Cullen

<sup>3</sup> Ourcival

<sup>4</sup> Imanishi

<sup>5</sup> Niewiadomska

<sup>6</sup> Gomez

<sup>7</sup> Hoque

<sup>8</sup> Asner & Martin

<sup>9</sup> Brakke

<sup>10</sup> Li

(۲۰۰۷) و در محدوده مادون قرمز دور تحت تاثیر مواد بیوشیمیایی برگ نظیر پروتئین، لیگنین، نشاسته و سلولز (فورتی<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۶؛ کارد و همکاران، ۱۹۹۸؛ اسمیت و همکاران، ۲۰۰۲) می‌باشد. تفاوت‌های طیفی مشاهده شده بین برگ‌های نور و سایه در محدوده مادون قرمز دور که در گونه‌های راش و انجیلی بیشتر از بقیه گونه‌ها می‌باشد، می‌تواند بیان‌گر تفاوت‌های ناشی از غلظت مواد بیوشیمیایی در برگ‌های نور و سایه این دو گونه باشد. نتایج به دست آمده مبنی بر وجود تفاوت معنی‌دار بین غلظت‌های نیتروژن اندازه‌گیری شده، به عنوان عنصری در ساختار سلولی مواد بیوشیمیایی، برگ‌های نور و سایه این دو گونه می‌تواند توجیه‌کننده این تفاوت‌ها باشد.

با توجه به پراکنش گونه‌ها در شرایط رویشگاهی متفاوت از نظر ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت‌های جغرافیایی که می‌تواند از جمله عوامل تأثیرگذار بر بازتاب طیفی گونه‌ها باشد، ضرورت تهیه طرح نمونه‌برداری جامع طیفی با هدف ایجاد کتابخانه طیفی حاوی مشخصه طیفی گونه مورد نظر در شرایط مختلف، مطرح می‌گردد (بوجینسکی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). تحقق این امر در راستای طرح‌های جامع جهانی تهیه کتابخانه‌های طیفی می‌تواند تأمین‌کننده داده‌های پایه با کاربرد در مقیاس‌های وسیع باشد (هونی و همکاران، ۲۰۰۷).

### ۲-۶- تفکیک طیفی گونه‌ها بر اساس شاخص‌های طیفی

#### - شاخص‌های طیفی PRI

بر اساس نتایج به دست آمده در بررسی رابطه کلروفیل با شاخص‌های طیفی حساس به رنگدانه‌های فعال فتوسنتزی (PRIs)، قوی‌ترین ارتباط برای گونه‌هایی که غلظت کلروفیل بیشتر و دامنه تغییرات کمتری دارند مانند توسکا و بلوط، دیده می‌شود. نتیجه تحقیقات گامون و همکاران (۱۹۹۷) نیز نشان داده که رابطه کلروفیل با شاخص‌های طیفی PRI، در گیاهانی که غلظت کلروفیل بیشتری دارند، قوی‌تر می‌باشد.

نتایج بررسی رابطه‌ی شاخص طیفی فتوسنتز با غلظت کلروفیل نشان داده که با تغییر طول موج حساس از ۵۲۷ به ۵۳۱ نانومتر در شاخص طیفی PRI2، حساسیت این شاخص نیز مانند PRI1 در گونه‌های توسکا و بلوط، هم‌چنان در یک رابطه‌ی معنی‌دار باقی می‌ماند اما ضریب همبستگی کاهش پیدا می‌کند. می‌توان بیان داشت که این شاخص طیفی حساسیت کافی نسبت به تغییرات اندک تنها کلروفیل و یا نیتروژن از بین مجموعه رنگدانه‌های فعال فتوسنتزی برای

<sup>1</sup> Fourty

<sup>2</sup> Bojinski

تفکیک گونه‌ها را ندارد. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نیز در حالی که تفاوت گونه‌ها از نظر غلظت نیتروژن و کلروفیل تأیید می‌شود (جدول ۲ بخش نتایج)، اما تفاوت‌ها با استفاده از این شاخص طیفی در مورد همه‌ی گونه‌ها معنی‌دار نمی‌باشد. گونه‌ی توسکا و بلوط که غلظت کلروفیل و نیتروژن بیشتری نسبت به بقیه دارند با گونه‌های دیگر تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهند.

با تغییر طول موج حساس به رنگدانه‌های فتوسنتزی از ۵۲۷ و ۵۳۱ به ۵۳۹ نانومتر در شاخص طیفی PRI3 حساسیت این شاخص طیفی نیز مانند PRI1,2 در گونه‌های توسکا و بلوط در یک رابطه‌ی معنی‌دار باقی می‌ماند، اما از میزان حساسیت شاخص طیفی نسبت به غلظت کلروفیل و نیتروژن کاسته می‌شود. بیشتر تحقیقات انجام شده (گامون و همکاران، ۱۹۹۲ و ۱۹۹۷؛ ایشیهارا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۵؛ درولت<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ هیلکر<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ هال<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). در رابطه با حساسیت طیفی گیاهان نسبت به فرایند فتوسنتز و بر اساس استفاده از شاخص طیفی PRI2 می‌باشد در حالی که در این مطالعه شاخص طیفی PRI1 نتایج قابل قبول‌تری را ارائه و طول موج ۵۲۷ در شاخص طیفی PRI1 حساسیت بیشتری را نسبت به رنگدانه‌ی کلروفیل و نیتروژن نشان داده است. امروزه با افزایش قدرت تفکیک طیفی دستگاه طیف‌سنج امکان استفاده از طول موج‌های دیگر به خصوص طول موج‌های مجاور فراهم شده است. موتانگا و اسکیدمور (۲۰۰۴) نیز در نتیجه‌ی تحقیق خود بر اساس تغییر طول موج‌ها در شاخص طیفی NDVI و استفاده از طول موج‌های مجاور به این نتیجه رسیده‌اند که با پیشرفت سنجنده‌ها و بالا رفتن قدرت تفکیک طیفی و استفاده از طول موج‌های دقیق‌تر و باندهایی با پهنای کمتر حساسیت شاخص‌های طیفی موجود بیشتر می‌شود.

گامون و همکاران (۱۹۹۲) در معرفی شاخص طیفی PRI به اهمیت اندازه‌گیری طیفی در زمان حداکثر تابش بین ساعت‌های ۱۰ تا ۱۴ اشاره داشته‌اند. هر چند که در این تحقیق نیز اندازه‌گیری طیفی برای همه‌ی گونه‌ها در این بازه‌ی زمانی انجام شده است و شرایط جوی نیز پایدار بوده است، ولی تفاوت زیادی در دامنه‌ی انحراف معیار شاخص‌های طیفی PRI مشاهده شده است. این تفاوت‌ها را می‌توان ناشی از حساسیت متفاوت طول موج‌های استفاده شده در هر سه شاخص طیفی نسبت به تغییرات زاویه‌ی تابش خورشید و شدت نور دانست. چنانچه انتظار می‌رفت گونه‌ی راش که در دامنه‌ی ارتفاعی گسترده‌ای حضور دارد، دارای دامنه‌ی انحراف معیار وسیع‌تری برای شاخص طیفی PRI می‌باشد. از

<sup>1</sup> Ishihara

<sup>2</sup> Drolet

<sup>3</sup> Hilker

<sup>4</sup> Hall

این رو شاید به علت حساسیت متفاوت طول موج‌های استفاده شده در شاخص‌های طیفی PRI، نتایج متفاوتی برای گونه‌های مختلف به دست آمده است.

نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داده که تفاوت طیفی معنی‌داری بین برگ نور و سایه‌ی گونه‌های بلوط و توسکا بر اساس شاخص‌های طیفی فتوسنتز PRI وجود ندارد، ضمن آن‌که نتایج داده‌های آزمایشگاهی نیز تفاوت معنی‌داری را بین نیتروژن و هم‌چنین کلروفیل برگ نور و سایه این دو گونه نشان نمی‌دهد. حضور سطح اغلب برگ‌های تاج این دو گونه در معرض نور خورشید منجر به ایجاد شرایط یکسان همه‌ی برگ‌ها در شرایط فتوسنتز می‌شود. در حالی که برای گونه‌های راش، ممرز و انجیلی به علت تفاوت بارز ساختار تاج نسبت به دو گونه‌ی بلوط و توسکا و هم‌چنین دریافت نور عبوری بیشتری در فضای تاج، شرایط یکسانی برای همه‌ی برگ‌ها فراهم نمی‌شود. بنابراین توجه به حضور درخت در آشکوب و هم‌چنین ساختار تاج آن در استفاده از شاخص‌های طیفی فتوسنتز PRI اهمیت زیادی دارد. گامون و همکاران (۱۹۹۷) نیز در استفاده از این شاخص طیفی به این نکته اشاره داشته‌اند. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان داشت که مطالعات سنجش از دوری برای تفکیک گونه‌های درختی به خصوص در جنگل‌های چندآشکوبه مثل جنگل‌های شمال ایران، این شاخص طیفی برای درختانی که در آشکوب غالب یا در نور کامل قرار می‌گیرند و یا گونه‌هایی که ساختار تاج آن‌ها به نحوی است که میزان نور عبوری درون تاج آن‌ها ناچیز است، بسیار مناسب می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان چنین نتیجه گرفت که در تفکیک طیفی این دو گونه از گونه‌های دیگر بر اساس شاخص‌های طیفی PRI در تصاویر ابر طیفی، عوامل تأثیر گذار در فتوسنتز مستقل از موقعیت برگ در تاج درخت می‌باشد. در مقابل در بررسی تفکیک دیگر گونه‌های درختی مورد مطالعه در این تحقیق، باید به موقعیت برگ در تاج (برگ نور و سایه) توجه داشت و این عامل را در نظر گرفت.

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان داشت که مقدار بیشتر شاخص طیفی PRII در برگ‌های نور نسبت به برگ‌های سایه‌ی گونه‌های ممرز، راش و انجیلی ناشی از حضور بیشتر رنگدانه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل در برگ‌های نور می‌باشد. چنانچه نتایج به دست آمده از تحقیقات گامون (۱۹۹۷) و پنوالاس و همکاران (۱۹۹۵) نیز نشان داده که با افزایش غلظت کلروفیل و یا نیتروژن در برگ‌های نور به میزان فتوسنتز گیاه افزوده شده و مقدار PRI نیز افزایش پیدا می‌کند. در مطالعه‌ی انجام شده توسط بالتزر و توماس<sup>۱</sup> (۲۰۰۵) و ریچاردسون و همکاران (۲۰۰۳) نیز میزان بازتاب طیفی برگ‌های نور در محدوده‌ی مرئی کمتر از برگ‌های سایه بوده که ناشی از مقدار بیشتر رنگدانه‌هایی چون

<sup>1</sup> Baltzer & Thomas

کاروتنوئید، کلروفیل و گزانثوفیل در برگ نور نسبت به سایه بوده است. نتایج تحقیق انجام شده توسط ثورهاگ و همکاران (۲۰۰۶) نیز با نتایج تحقیق یاد شده هم‌خوانی دارد. هم‌چنین نتایج به دست آمده از دیگر شاخص‌های طیفی مورد مطالعه و داده‌های آزمایشگاهی در تحقیق حاضر نیز غلظت بیشتر کلروفیل و نیتروژن برگ‌های نور را نسبت به برگ‌های سایه تأیید می‌کند، که این غلظت زیاد عامل مهمی در کاهش بازتاب در محدوده مرئی می‌باشد.

### - شاخص طیفی SIPI

نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی بلکبرن (۱۹۹۹) و زو و یانگ<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) ارتباط قوی شاخص طیفی SIPI را با گونه‌هایی که دامنه‌ی تغییرات غلظت کلروفیل آن‌ها کمتر از  $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  است، نشان می‌دهد. از آن‌جا که در مطالعه حاضر نیز گونه‌ی انجیلی نسبت به گونه‌های دیگر از غلظت کلروفیل و نیتروژن کمتری برخوردار است و شاخص طیفی SIPI آن رابطه‌ی قوی‌تری را با این دو متغیر نشان می‌دهد، می‌توان گفت که با نتایج تحقیقات انجام شده هم‌خوانی دارد. از آن‌جا که نتایج به دست آمده از تحلیل آماری  $t$ ، این شاخص طیفی تفاوت معنی‌داری را بین برگ نور و سایه‌ی گونه‌ی انجیلی نشان می‌دهد و از حساسیت کافی در مقابل تغییرات نسبت غلظت رنگدانه‌ی کاروتنوئید به کلروفیل در این گونه برخوردار است، لازم است در تحقیقات دورسنجی و تفکیک طیفی گونه‌ها با استفاده از شاخص طیفی SIPI، موقعیت برگ در تاج گیاه (شرایط نور و سایه) در نظر گرفته شود. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی بر اساس نتایج به دست آمده از رابطه‌ی این شاخص طیفی با غلظت کلروفیل و نیتروژن، شاخص طیفی SIPI دارای حساسیت کافی برای تفکیک گونه‌ها از یکدیگر می‌باشد. به علاوه از آن‌جایی که تغییرات رنگدانه کاروتنوئید در اواخر فصل رویش در همه گونه‌ها یکسان نمی‌باشد و تغییرات غلظت آن به خصوص در گونه‌ای مانند انجیلی بسیار بارز است، از این رو استفاده از شاخص طیفی SIPI می‌تواند نتایج قابل قبولی را در تفکیک گونه‌های مختلف ارائه دهد.

<sup>1</sup> Xue and Yang

## - شاخص طیفی Datt

در شاخص طیفی Datt از طول موج ۷۱۰ نانومتر در محدوده‌ی لبه‌ی قرمز به عنوان حساس‌ترین طول موج نسبت به تغییرات غلظت کلروفیل استفاده شده است. علاوه بر این دات (۱۹۹۹) به منظور تفکیک گونه‌های اکالیپتوس از یکدیگر، این شاخص طیفی را به علت حذف اثر نور پخش درون سلولی برگ مناسب‌تر از دیگر شاخص‌های طیفی معرفی کرده است. کوپس و همکاران (۲۰۰۲) نیز این شاخص طیفی را برای تجزیه‌ی طیفی سه گونه‌ی اکالیپتوس در مقیاس تاج پوشش مناسب‌تر از مقیاس برگ معرفی کرده، اما برای تمایز گونه‌های سالم و بیمار به نتایج قابل توجهی دست نیافته‌اند. نتایج تحقیق کوپس و همکاران (۲۰۰۳) نیز نشان داده که این شاخص طیفی در تفکیک و طبقه‌بندی دو گونه اکالیپتوس توسط داده‌های طیف سنجی زمینی و ابر طیفی هوایی کارا بوده اما نسبت به تغییرات غلظت کلروفیل در قسمت‌های مختلف تاج (برگ نور و سایه)، از حساسیت کافی برخوردار نیست. سیمز و گامون (۲۰۰۲) نیز این شاخص طیفی را برای تفکیک گونه‌هایی با غلظت کم کلروفیل مناسب نمی‌دانند. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نیز حساسیت این شاخص طیفی را نسبت به تغییرات غلظت کلروفیل و نیتروژن همه گونه‌ها با هم تأیید کرده، اما در سطح هر گونه به طور مجزا نتوانسته تغییرات غلظت کلروفیل و نیتروژن را در برگ‌های نور و سایه توجیه کند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که حساسیت شاخص طیفی Datt در گونه‌های مختلف متفاوت است. مالنوسکی و همکاران (۲۰۰۶) هم در مورد ارتباط کلروفیل با شاخص‌های طیفی مختلف بیان کرده‌اند که حساسیت شاخص‌ها به دامنه‌های مختلف از تغییرات غلظت کلروفیل یکسان نمی‌باشد. بنابراین یک شاخص طیفی می‌تواند نسبت به انواع پوشش گیاهی رفتار متفاوتی داشته باشد. در تحقیقات زیادی غلظت کلروفیل و نیتروژن (اندازه‌گیری شده) در برگ‌های نور بیشتر از برگ‌های سایه بوده است (هانسن و همکاران، ۲۰۰۲؛ بالتزر و توماس، ۲۰۰۵؛ لنک و بوشمن<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶). در این تحقیق نیز مقدار این شاخص طیفی در برگ‌های نور بیشتر از برگ‌های سایه بوده و تفاوت‌های معنی‌داری در گونه‌های راش، توسکا و انجیلی دیده شده است، ضمن آن که نتایج آزمون t داده‌های آزمایشگاهی نیز، تفاوت معنی‌داری را بین نیتروژن برگ نور و سایه همه گونه‌ها نشان می‌دهد. بنابراین به منظور تفکیک طیفی گونه‌ها بر اساس داده‌های ابرطیفی، با استفاده از این شاخص طیفی همانند شاخص طیفی SIPI، در نظر گرفتن موقعیت برگ در تاج درخت اهمیت دارد.

<sup>1</sup> Lenk & Buschmann

### شاخص طیفی ANCB

در نتایج به دست آمده از بررسی رابطه‌ی کلروفیل برگ نور و سایه‌ی هر گونه به طور مجزا با شاخص طیفی ANCB، هیچ گونه ارتباط معنی‌داری دیده نشده است. به عبارتی دیگر شاخص طیفی ANCB به غلظت کلروفیل در سطح تاج درخت هر گونه برای برگ‌های نور و سایه به طور مجزا حساس نمی‌باشد. این در حالی است که این ارتباط برای نیتروژن به عنوان عنصری در ساختار مولکولی کلروفیل در رابطه‌ی خطی و مثبت، معنی‌دار می‌باشد. این شاخص طیفی در بین شاخص‌های طیفی مطالعه شده بیشترین همبستگی را با نیتروژن به خصوص در گونه‌های توسکا، ممرز، انجیلی و بلوط نشان می‌دهد.

با توجه به نتیجه‌ی قابل قبول تحقیقات انجام شده مبنی بر استفاده از تبدیل منحنی طیفی به روش CR (اسمیت و اسکیدمور، ۲۰۰۳؛ چو و همکاران، ۲۰۰۷؛ آلبرچتووا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸) و استفاده از حساس‌ترین محدوده‌ی طول موج طیفی (لبه‌ی قرمز) نسبت به کلروفیل و هم‌چنین نتایج به دست آمده از تحقیقات انجام شده مالتووسکی و همکاران (۲۰۰۶) مبنی بر حساسیت خوب این شاخص طیفی، در این تحقیق نیز ارتباط قوی و معنی‌داری بین شاخص طیفی ANCB با کلروفیل گونه‌های مورد مطالعه قابل انتظار بوده است. اگرچه حساسیت این شاخص طیفی دامنه‌ی وسیع تغییرات غلظت کلروفیل و نیتروژن ۵ گونه‌ی مورد مطالعه را پوشش می‌دهد، اما معنی‌دار نبودن رابطه‌ی این شاخص طیفی با غلظت کلروفیل هر یک از گونه‌ها، نشان دهنده عدم حساسیت این شاخص طیفی نسبت به تغییرات اندک کلروفیل هر درخت می‌باشد. در مقابل، نتایج این تحقیق ارتباط قوی و معنی‌داری را بین نیتروژن هر گونه با شاخص طیفی ANCB نشان می‌دهد. در صورتی که با وجود رابطه‌ی مثبت و شناخته شده بین نیتروژن و کلروفیل انتظار می‌رفت که نتایج ارتباط نیتروژن و کلروفیل با شاخص طیفی ANCB هم‌سو باشد. از آنجایی که این وضعیت در مورد نتایج شاخص طیفی Datt نیز مشاهده شده، ضرورت تحقیق بیشتر در این مورد و یافتن دلایل امر پیشنهاد می‌گردد.

### ۳-۶- رگرسیون حداقل مربعات بخشی (PLS)

اگر چه محدوده لبه قرمز ارائه دهنده اطلاعات طیفی بسیار زیاد و مهمی از مشخصات گیاهان می‌باشد اما پاسخ طیفی گیاه را نسبت به همه متغیرهای تأثیر گذار بر منحنی طیفی پوشش نمی‌دهد. در حالی که بررسی نیتروژن در محدوده لبه

<sup>1</sup> Albrechtova

قرمز تنها به نیتروژن موجود در ساختار سلولی کلروفیل مربوط می‌شود، پاسخ طیفی گیاه نسبت به نیتروژن در دیگر مواد بیوشیمیایی، در محدوده طیفی مادون قرمز دور نیز قابل بررسی است. بنابراین استفاده از روش‌هایی که بتواند همه طول موج‌ها را در تفکیک طیفی گیاه دخالت دهد، می‌تواند نتایج قابل قبول‌تری را ارائه دهد. نتایج تحقیقات زیادی (هانسن و شوارینگ، ۲۰۰۳؛ راکبوش<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۶؛ آرمنتا<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۷؛ یه<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۸) نشان داده که استفاده از روش رگرسیون PLS نسبت به روش‌های آماری دیگر و هم‌چنین شاخص‌های طیفی برای تحلیل داده‌های طیف سنجی کاربرد مؤثرتر داشته است، زیرا در محدوده طیفی گسترده‌ای و با استفاده از متغیرهای مختلفی به تجزیه و تحلیل و یا تفکیک طیفی پدیده‌ها می‌پردازد. علاوه بر این، یکی از مشکلات تجزیه و تحلیل داده‌های ابر طیفی، روبه‌رو شدن با حجم وسیعی از اطلاعات در تعداد باندهای زیاد می‌باشد. بنابراین تعیین بهترین و مناسب‌ترین طول موج‌ها در تفکیک طیفی گونه‌ها ضرورت پیدا می‌کند. ریچادسون و همکاران (۲۰۰۳) نیز به دلیل ماهیت داده‌های طیفی مبنی بر حجم زیاد اطلاعات و اثر هم‌پوشانی عوامل متفاوت تأثیر گذار در هر طول موج، قابلیت رگرسیون PLS را در این راستا تایید می‌کنند. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق هانس و شوارینگ (۲۰۰۳) این روش نتیجه بهتری در مقایسه با شاخص‌های طیفی در برآورد نیتروژن و زی‌توده دو وارپته گندم نشان داده است. بهترین طول موج‌های انتخاب شده بر اساس مدل PLS، در محدوده لبه قرمز (۶۸۰-۷۵۰) تعیین شده است. نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر نیز مبنی بر همبستگی بیشتر طول موج‌های انتخاب شده در محدوده لبه قرمز (۷۲۰-۷۰۰ و ۷۴۵) با غلظت نیتروژن است که با تحقیق هانس و شوارینگ (۲۰۰۳) هم‌خوانی دارد. از طرفی تعیین این طول موج‌ها (محدوده ۷۳۰-۷۰۰) در تفکیک گونه‌ها بدون دخالت متغیر نیتروژن نیز، نشان دهنده اهمیت این محدوده در تفکیک طیفی گونه‌ها بوده است. از آن‌جا که عوامل تأثیر گذار زیادی در محدوده طول موج وسیع از ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر وجود دارد، از این رو تعیین مؤثرترین آن‌ها در تفکیک طیفی گونه‌ها اهمیت به‌سزایی دارد. نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر نیز با وارد کردن متغیر نیتروژن در مدل PLS، نتایج بهتری را در تفکیک گونه‌ها نشان داده است. بنابراین بر اساس این نتایج می‌توان نیتروژن را به عنوان متغیری مناسب در تفکیک طیفی گونه‌ها معرفی نمود. در تحقیق نیوادوسکا (۲۰۰۶) نیز برآورد نیتروژن پوشش علفی از بین متغیرهای دیگر نتایج بهتری به همراه داشته است. هم‌چنین در تحقیق انجام شده توسط اسمیت و همکاران (۲۰۰۲)

<sup>1</sup> Ruckebusch

<sup>2</sup> Armenta

<sup>3</sup> Ye

نیترژن از بین متغیرهای اندازه‌گیری شده در رابطه با تاج پوشش درختان پهن برگ، قوی‌ترین ارتباط را با انعکاس طیفی تاج نشان داده و از آن به عنوان پایدارترین متغیر در طول فصل رویش و همین‌طور در نقاط مختلف تاج نام برده است. هم‌چنین در این تحقیق با استفاده از مشتق اول منحنی طیفی در مدل PLS که منجر به حذف یا کاهش اثر عوامل منفی مختلف بر منحنی طیفی می‌شود، به نتایج بهتری دست یافته است. استار و کولن (۲۰۰۳)، برگر و گلاادی<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) و هم‌چنین چو و همکاران (۲۰۰۷) نیز با انجام مشتق‌گیری و CR در تحلیل داده‌های طیفی به نتیجه بهتری دست یافته‌اند.

نتایج حاصل از مدل PLS در تحقیق حاضر نشان داده که نمونه‌های راش در رویشگاه ارتفاعی بالابند از پایین‌بند و میان‌بند بهتر تفکیک شده است. این در حالی است که نتایج تحقیق ریچاردسون و همکاران (۲۰۰۳) نیز تفکیک بهتر نمونه‌های مربوط به دو گونه پیسه‌آ و نوئل را در رویشگاه‌های ارتفاعی بالابند از پایین‌بند و میان‌بند نشان می‌دهد. با توجه به احتمال تغییر غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی و هم‌چنین تغییر اسیدیته خاک و هم‌چنین تفاوت غلظت نیترژن نمونه‌ها در شرایط رویشگاهی مختلف، این تفاوت‌ها با استفاده از شاخص‌های طیفی نیز قابل بررسی است. نتایج به دست آمده تنها با فرض تفاوت طیفی نمونه‌ها بدون در نظر گرفتن متغیر خاصی می‌باشد، چه بسا با وارد کردن متغیرهای مؤثر (مانند کلروفیل و نیترژن) تفاوت طیفی نمونه‌های مربوط به رویشگاه‌های پایین‌بند و میان‌بند نیز در طول موج‌هایی معنی‌دار باشد.

<sup>1</sup> Burger & Geladi

## ۷- پیشنهادها

- به منظور بررسی کامل‌تر تفاوت طیفی گونه‌ها به خصوص در مواردی که از نظر غلظت کلروفیل در سطح یکسانی هستند و از این رو طول موج‌های مرتبط با جذب کلروفیل از حساسیت پایینی برخوردار می‌باشند، می‌توان به بررسی رنگدانه‌ها و عناصر بیوشیمیایی دیگر از جمله لیگنین، سلولز و هم‌چنین میزان رطوبت برگ، با استفاده از طول موج‌های بیشتری پرداخت.

- علاوه بر برگ که سهم زیادی را در انعکاس طیفی تاج درخت دارد، شاخه، ساقه و تنه نیز در مجموعه انعکاس طیفی درخت نقش دارند. از این رو ضرورت دارد خصوصیات انعکاس طیفی آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد.

- لازمه مطالعات طیف‌سنجی زمینی در سطح تاج درخت، دسترسی به سطح تاج آن است. این امر در صورتی میسر است که با استفاده از دستگاه یا ماشینی بالارونده مانند جرثقیل بتوان اندازه‌گیری طیفی را از فاصله ۲-۳ متری از سطح تاج پوشش درخت انجام داد. با توجه به شرایط توپوگرافی جنگل‌های شمال و مشکلات انجام این کار در جنگل، پیشنهاد می‌شود به عنوان قدم اولیه در این خصوص به مطالعه انعکاس طیفی توده شاخه و برگ قطع شده پرداخت. منحنی انعکاس طیفی مجموعه شاخه، ساقه و برگ درخت می‌تواند اطلاعات طیفی نزدیک‌تری به تاج پوشش آن داشته باشد.

- با توجه به تغییر شاخص سطح برگ درختان در فصل رویش و هم‌چنین تغییر غلظت و ترکیب رنگدانه‌های مختلف پیشنهاد می‌شود منحنی انعکاس طیفی گونه‌ها در ماه‌های مختلف با هم مقایسه گردد.

- با توجه به تنوع گونه‌ای جنگل‌های شمال پیشنهاد می‌شود کتابخانه طیفی گونه‌های دیگر نیز تهیه گردد.

- محدوده طول موج لبه قرمز به عنوان یکی از مهم‌ترین محدوده‌های طول موج در بررسی ساختار سلول، غلظت نیتروژن و کلروفیل اطلاعات دقیقی را ارائه می‌دهد. مطالعه رابطه غلظت کلروفیل و نیتروژن با موقعیت نقطه لبه قرمز می‌تواند در بهبود نتایج تفکیک گونه‌ها مؤثر باشد.

- به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر در تفکیک طیفی گونه‌ها بر اساس تفاوت شدت فتوسنتز آن‌ها پیشنهاد می‌شود در بررسی حساسیت شاخص‌های PRI و تفکیک طیفی گونه‌ها بر اساس شدت فتوسنتز آن‌ها، علاوه بر بررسی رابطه‌ی کلروفیل با این شاخص‌ها از رنگدانه‌های فعال فتوسنتزی دیگر همچون گزانتوفیل و کاروتنوئید نیز استفاده گردد.
- پیشنهاد می‌شود کارایی دیگر روش‌های تبدیلی بر روی منحنی انعکاس طیفی، از جمله مشتق‌گیری در مراتب مختلف و هم‌چنین روش CR در محدوده‌های طیفی دیگر مورد بررسی قرار گیرد.
- با توجه به ساختار پیچیده و متنوع جنگل‌های شمال از نظر شرایط میکروکلیمات و حضور گسترده بعضی از گونه‌ها از جمله راش در دامنه ارتفاعی وسیع، پیشنهاد می‌شود عوامل مختلف را در مدل PLS وارد نموده و مؤثرترین آن‌ها در فرایند تفکیک گونه‌ها دخالت داده شود.
- پیشنهاد می‌شود به علت گسترش وسیع گونه راش در جنگل‌های خزری از آستارا تا گرگان، منحنی انعکاس طیفی آن در این رویشگاه‌ها بررسی گردد.
- مطالعه ارتباط بین تغییرات غلظت هر یک از مواد بیوشیمیایی (کلروفیل و نیتروژن) برگ راش به دلیل تغییر رویشگاه از نظر ارتفاع از سطح دریا و محدوده لبه قرمز، پیشنهاد می‌شود.

# منابع مورد استفاده

## فارسی

- ۱- حقیقی، م. (۱۳۷۸). اثر تنش کادمیوم بر تغییرات فیزیولوژیک، آنتی اکسیدانی و آنزیمی کاهو در حضور هورمونیک اسید. رساله دکتری باغبانی و گیاهپزشکی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ۱۵۰ صفحه.
- ۲- شتایی، ش.، درویش صفت، ع. ا.، سبحانی، ه.، (۱۳۸۶). مقایسه روش‌های طبقه‌بندی شی-پایه و پیکسل پایه تصاویر ماهواره‌ای در طبقه‌بندی تیپ‌های جنگل. مجله منابع طبیعی ایران، ۶(۲): ۸۸۱-۸۶۹.
- ۳- عباسی، م.، درویش صفت، ع. ا.، و شپمن، م.، (۱۳۸۸). بررسی منحنی انعکاس طیفی رقم‌های برنج شمال ایران در محدوده طول موج لبه قرمز (Red edge region). همایش و نمایشگاه ژئوماتیک، ۸ صفحه.
- ۴- مروی مهاجر، م. ر.، نصرتی، ک.، دیتز کناپ، ه.، بوده، و.، (۱۳۸۴). حفاظت از تنوع زیستی و مدیریت پایدار جنگل‌های خزری (شمال ایران). مجموعه مقالات ارائه شده در سمینار کارشناسی، کلارآباد (چالوس). ۱۸۷ صفحه.

## انگلیسی

1. Albrechtova, J., Seidl, Z., Aitkenhead-Peterson, J., Lhotakova Z., Rock, B.N., Alexander, J.E., Malenovsky, Z., & McDowell, W.H. (2008). Spectral analysis of coniferous foliage and possible links to soil chemistry: Are spectral chlorophyll indices related to forest floor dissolved organic C and N? *Science of the Total Environment*, 404, 424-432.
2. Aoki, M., Yabuki, K., & Totsuka, T. (1981). An evaluation of chlorophyll content of leaves based on the spectral reflectivity in several plants. *Research Report of the National Institute of Environmental Studies of Japan*, 66, 125- 130.
3. Armenta, S., Garrigues, S., & de la Guardia, M. (2007). Partial least squares-near infrared determination of pesticides in commercial formulations. *Vibrational Spectroscopy*, 44, 273-278.
4. Asner, G.P. (1998). Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 64, 134-53.
5. Asner, G.P., & Martin, R.E. (2008). Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3958-3970.
6. Atzberger, c. & Werner, W. (1998). Needle reflectance of healthy and diseased spruce stands. *Proc. of 1st EARsel Workshop on Imaging Spectrometry, Zurich*, 271-285.
7. Baltzer, J.L., & Thomas, S.C. (2005). Leaf optical responses to light and soil nutrient availability in temperate deciduous trees. *American Journal of Botany*, 92, 214-223.
8. Bao, X., & Dai, L. (2009). Partial least squares with outlier detection in spectral analysis: A tool to predict gasoline properties. *Fuel*, 88, 1216-1222.

9. Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161-173.
10. Baret, F., Vanderbilt, V.C., Steven, M.D., & Jacquemoud, S. (1994). Use of spectral analogy to evaluate canopy reflectance sensitivity to leaf optical properties. *Remote Sensing of Environment*, 48, 253-260.
11. Barnes, J. D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S., & Davison, A. W. (1992). A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 32(2), 85- 100.
12. Barry, K.M., Stone, C. and Mohammed, C.L. (2008). Crown-scale evaluation of spectral indices for defoliated and discoloured eucalypts. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 47-69.
13. Birth, G. S., & McVey, G. (1968). Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal*, 60, 640- 643.
14. Blackburn, G.A. (1998a). Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales; An evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 66(3), 273-285.
15. Blackburn, G.A. (1998b). Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 19(4), 657- 675.
16. Blackburn, G.A. & Milton E.J. (1995). Seasonal variation in the spectral reflectance of deciduous tree canopies evidence from a tower- mounted spectroradiometer. *International journal of Remote Sensing*, 16.4, 203-206.
17. Blackburn, G.A. (1999). Relationship between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of deciduous broadleaves. *Journal of remote sensing of environment*, 70, 224-237.
18. Blanco, M., Coello, J., Iturriaga, H., Maspoch, S., & De La Pezuela, C. (1996). Quantitation of the active compound and major excipients in a pharmaceutical formulation by near infrared diffuse reflectance spectroscopy with fibre optical probe. *Analytica Chimica Acta*, 333, 147-156.
19. Bojinski, S., Schaepman, M., Schlaepfer, D., & Itten, K. (2003). SPECCHIO: A spectrum database for remote sensing applications. *Computers and Geosciences*, 29, 27-38.
20. Bonham-Carter, G.F. (1988). Numerical procedures and computer program for fitting an inverted gaussian model to vegetation reflectance data. *Computers and Geosciences*, 14, 339-356.
21. Boochs, F., Kupfer, G., Dockter, K., & Kubauch, W. (1990). Shape of the red as vitality indicator for plants. *International Journal of Remote Sensing*, 11 (10), 1741-1753.
22. Boyer M., Miller, J., Belanger, M., & Hare E. (1988). Senescence and Spectral Reflectance in Leaves of Northern Pin Oak (*Quercus palustis* Muenchh.). *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 25, 71-87.
23. Brakke, T.W., Wergin, W.P., Erbe, E.F., & Harnden, J.M. (1993). Seasonal variation in the structure and red reflectance of leaves from yellow poplar, Red Oak, and Red Maple. *Remote Sensing of Environment*, 43, 115-130.

24. Broge, N. H., & Leblanc, E. (2001). 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(2), 156-172.
25. Bureau, S., Ruiz, D., Reich, M., Gouble, B., Bertrand, D., Audergon, J.M., & Renard, C.M.G.C. (2009). Rapid and non-destructive analysis of apricot fruit quality using FT-near-infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 113, 1323-1328.
26. Burger, J., & Geladi, P. (2006). Hyperspectral NIR imaging for calibration and prediction: A comparison between image and spectrometer data for studying organic and biological samples. *Analyst*, 131, 1152-1160.
27. Buschman, C., & Nagel, E. (1993). In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as a basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 711-722.
28. Card, D.H., Peterson, D.L., & Matson, P.A. (1988). Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*. 26(2), 123-147.
29. Carter, G.A. (1994). Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing*, 15(3), 697-703.
30. Chappelle, E.W., Kim, M. S., & McMurtrey, J. E. III (1992). Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sensing of Environment*, 39(3), 239-247.
31. Cho, M.A., and Skidmore, A.K. (2006). A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*, 101, 181-193.
32. Cho, M.A., Skidmore, A., Corsi, F., van Wieren, S.E., & Sobhan, I. (2007). Estimation of green grass/herb biomass from airborne hyperspectral imagery using spectral indices and partial least squares regression. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9, 414-424.
33. Cho, M.A., Skidmore, A.K., & Sobhan, I. (2009). Mapping beech (*Fagus sylvatica* L.) forest structure with airborne hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11, 201-211.
34. Ciganda, V., Gitelson, A., & Schepers, J. (2009). Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content. *Journal of Plant Physiology*, 166, 157-167.
35. Clark, M.L., Roberts, D.A., & Clark, D.B. (2005). Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales. *Remote Sensing of Environment*, 96, 375-398.
36. Clevers, J.G.P.W. (1991). Application of the WdVI in estimating LAI at the generative stage of barley. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46, 37-47
37. Clevers, J.G.P.W., & Buker, C. (1991). Feasibility of the red edge index for the detection of nitrogen deficiency. Physical measurements and signatures in remote sensing. Proc. 5th international colloquium, Courchevel, 1991. Vol.1, 165-168.
38. Clevers, J.G.P.W., Kooistra, L., & Schaepman, M.E. (2008). Using spectral information from the NIR water absorption features for the retrieval of canopy water content. *International Journal*

- of Applied Earth Observation and Geoinformation, 10, 388-397.
39. Clevers, J.G.P.W., Schaepman, M.E., Mucher, C.A., de Wit, A.J.W., Zurita-Milla, R., & Bartholomeus, H.M. (2007). Using MERIS on Envisat for land cover mapping in the Netherlands. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 637-652.
  40. Clevers, J.G.P.W.; Heijden, G.W., Van der; .A.M., Verzakov, S. and Schaepman, M.E. (2005). Estimating spatial patterns of biomass and nitrogen status in grasslands through imaging spectrometry. In: 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing (ISPMSRS), Beijing, 17-19 October 2005. Beijing: ISPRS WG VII/1: 56-59.
  41. Cochrane, M.A. (2000). Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 2075-2087.
  42. Collins, W. (1978). Remote sensing of crop type and maturity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44, 43- 55.
  43. Coops, N., Dury, S., Smith, M.L., Martin, M. & Ollinger, S. (2002). Comparison of green leaf eucalypt spectra using spectral decomposition. *Australian Journal of Botany*, 50, 567-576.
  44. Coops, N.C., Stone, C., Culvenor, D.S., Chisholm, L.A., Merton, R.N. (2003). Chlorophyll content in Eucalypt vegetation of the leaf and canopy level as derived from high spectral resolution data. *International journal of tree physiology, International Journal of Tree Physiology*, 23(1), 23-31.
  45. Curran, P.J. (1989). Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 30, 271-278.
  46. Curran, P.J., Dungan, J.L., Peterson, D.L. (2001). Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, 76 (3), 349-359.
  47. Darvishsefat, A., Abbasi, M. and Mohajer, M. R. M. (2003). Evaluation of the Potential of Landsat ETM for Forest Type Mapping in Northern Iran. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(7/B): 956-957.
  48. Daszykowski, M., Serneels, S., Kaczmarek, K., Van Espen, P.J., Croux, C., Walczak, B. (2007). TOMCAT: a MATLAB toolbox for multivariate calibration techniques. *Chemometr. Intell. Lab. Syst.* 85, 269-277.
  49. Datt, B. (1998). Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a + b and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment*, 66(2), 111- 121.
  50. Datt, B. (1999). Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 20(14), 2741- 2759.
  51. Daughtry, C.S.T. & Walthall C.L. (1998). Spectral discrimination of Cannabis sativa L. leaves and canopies. *Journal of Remote Sensing of Environments*, 64, 192-201.
  52. 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, 147-159.

53. de Luz, R.B., & Crowley, J.K. (2007). Spectral reflectance and emissivity features of broad leaf plants: Prospects for remote sensing in the thermal infrared (8.0-14.0 $\mu$ m). *Remote Sensing of Environment*, 109, 393-405.
54. Dechmi, F., Playan, E., Faci, J.M., & Tejero, M. (2003). Analysis of an irrigation district in northeastern Spain I. Characterisation and water use assessment. *Agricultural Water Management*, 61, 75-92.
55. Decoteau, D.R., Wilson, S.B. & Ray, C.I. (1996). A plant physiologist's view of the perception of light and color by plants. In proceeding, 26th National Agriculture plastics congress and the American greenhouse vegetable growers association conference, New Jersey, June 14-18(1996), pages, 7.
56. Demarez, V., Gastellu-Etchegorry, J.P., Mougin, E., Marty, G., Proisy, C., Dufrene, E., & Dantec, V.L. (1999). Seasonal variation of leaf chlorophyll content of a temperate forest. Inversion of the PROSPECT model. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 879-894.
57. Dong W., Gregory, A. & Barbet, J.T. (2002). Spectral reflectance of *Lemna gibba* fronds exposed to ethylene glycol. *Journal of Aquatic Botany*, 73, 275-281. ([www.Elsevier.com/locate/aquabot](http://www.Elsevier.com/locate/aquabot))
58. 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.
59. Drolet, G.G., Middleton, E.M., Huemmrich, K.F., Hall, F.G., Amiro, B.D., Barr, A.G., Black, T.A., McCaughey, J.H., & Margolis, H.A. (2008). Regional mapping of gross light-use efficiency using MODIS spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3064-3078.
60. Elvidge, C. D., & Zhikang, C. (1995). Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 54(1), 38- 48.
61. Fang L.G., Chen S.S., Chen L.F. & Liu, Q.H. (2005). Combining spectral library into intelligent expert classifier for Lychee orchard mapping (a case study on lychee in Shenzhen south China). *ISP MSRS 2005 conference proceedings*, Beijing, China, 264-567.
62. Filella, I. and Peñuelas, J. (1994). The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing*, 15(7), 1459-1470.
63. Fourty, T., Baret, F., Jacquemoud, S., Schmuck, G., & Verdebout, J. (1996). Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: Direct and inverse problems. *Remote Sensing of Environment*, 56, 104-117.
64. Fung, T., Ma, F. Y. and Siu, W. L. (1998) Hyperspectral data analysis for subtropical tree species recognition. *Symposium Proceedings, IGARSS'98, Sensing and Managing the Environment*, Vol. 3, pp. 1298-1300. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing*, New York.
65. Gamon, J.A., Penuelas, J. and Field, C.B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35-44.

66. Gamon, J.A., Serrano, L., & Surfus, J.S. (1997). The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112, 492-501.
67. Gausman, H.W. and Allen W.A. (1973). Optical Parameters of Leaves of 30 Plant Species. *International journal of plant physiology*, 52: 57-62.
68. Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1994). Spectral reflectance changes associate with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143, 286-292.
69. Gitelson, A. A., Buschmann, C., & Lichtenthaler, H. K. (1999). The chlorophyll fluorescence ratio F735/F700 as an accurate measure of the chlorophyll content in plants. *Remote Sensing of Environment*, 69(3), 296- 302.
70. 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.
71. Gitelson, A. and 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: 247-252.
72. Gitelson, A.A., Gritz, Y. and Merzlyak, M.N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160: 271-282.
73. Goodwin, N., Turner, R., & Merton, R. (2005). Classifying Eucalyptus forests with high spatial and spectral resolution imagery: An investigation of individual species and vegetation communities. *Australian Journal of Botany*, 53, 337-345
74. Gomez, C., Lagacherie, P., & Coulouma, G. (2008). Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*, 148, 141-148.
75. Gong, P., Ruilianp, P., & Bin, Y. (1997). Conifer species recognition: An exploratory analysis of in situ hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 62, 189-200.
76. Gong, P., Wang, D. X., & Liang, S. (1999). Inverting a canopy reflectance model using a neural network. *International Journal of Remote Sensing*, 20(1), 111 -122.
77. Grossman, Y.L., Ustin, S.L., Jacquemoud, S., Sanderson, E.W., Schmuck, G., & Verdebout, J. (1996). Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information from leaf reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 56, 182-193
78. Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81, 416-426.
79. Hall, F.G., Hilker, T., Coops, N.C., Lyapustin, A., Huemmrich, K.F., Middleton, E., Margolis, H., Drolet, G., & Black, T.A. (2008). Multi-angle remote sensing of forest light use efficiency by observing PRI variation with canopy shadow fraction. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3201-3211.

80. Hansen, P.M., & Schjoerring, J.K. (2003). Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 86, 542-553.
81. Hansen, P.M., Jørgensen, J.R., & Thomsen, A. (2002). Predicting grain yield and protein content in winter wheat and spring barley using repeated canopy reflectance measurements and partial least squares regression. *Journal of Agricultural Science*, 139, 307-318.
82. Heise, H.M., & Bittner, A. (1997). Rapid and reliable spectral variable selection for statistical calibrations based on PLS-regression vector choices. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 359, 93-99.
83. Hilker, T., Coops, N.C., Hall, F.G., Black, T.A., Wulder, M.A., Nesic, Z., & Krishnan, P. (2008). Separating physiologically and directionally induced changes in PRI using BRDF models. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2777-2788.
84. Himmelsbach, D.S., Barton, F.E., Yang, C.Q., & Kelly, J. (1996). Use of PLS-1 with NIR and MIR spectroscopy for quantification of textile finishes. *The Fibril Angle, Fall 1996 Newsletter - Cellulose, Paper and Textile Division of the American Chemical Society*
85. Hoque, E., & Hutzler, P.J.S. (1992). Spectral blue-shift of red edge monitors damage class of beech trees. *Remote Sensing of Environment*, 39, 81-84.
86. Horler, D. N. H., Dockray, M. and Barber, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance.. *International Journal of Remote Sensing*, 4, 273-288.
87. Huang, Z., Turner, B.J., Dury, S.J., Wallis, I.R., & Foley, W.J. (2004). Estimating foliage nitrogen concentration from HYMAP data using continuum removal analysis. *Remote Sensing of Environment*, 93, 18-29.
88. Hüni, A., Nieke, J., Schopfer, J., Kneubühler, M., and Itten, K.I. (2007). METADATA OF SPECTRAL DATA COLLECTIONS. *Proceedings 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*. Bruges, Belgium, April 23-25.
89. Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
90. Imanishi, J., Sugimoto, K., & Morimoto, Y. (2004). Detecting drought status and LAI of two Quercus species canopies using derivative spectra. *Computers and Electronics in Agriculture*, 43, 109-129.
91. Inoue, Y., Peñuelas, J., Miyata, A., & Mano, M. (2008). Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO<sub>2</sub> flux measurements in rice. *Remote Sensing of Environment*, 112, 156-172.
92. Ishihara, M., Matsunaga, T., & Tamura, M. (2005). Improved estimation of photochemical reflectance index using MODIS ocean bands. In, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*.
93. Jackson, R.D., & Huete, A.R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11, 185-200.

94. Jacquemoud, S., Ustin, S. L. (2000). Leaf optical properties: a state of the art. Proc. 8th International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing, Aussois (France), 8-12 January 2001, CNES, pages 223-232. <http://www.sigu7.jussieu.fr/Led/documents/aussois223.pdf>
95. Jago, R.A., Cutler, M.E.J., & Curran, P.J. (1999). Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. *Remote Sensing of Environment*, 68, 217-224.
96. Kalacska, M., Sanchez-Azofeifa, G.A., Rivard, B., Caelli, T., White, H.P., & Calvo-Alvarado, J.C. (2007). Ecological fingerprinting of ecosystem succession: Estimating secondary tropical dry forest structure and diversity using imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 108, 82-96.
97. Kimura, R., Okada, S., Miura, H., & Kamichika, M. (2004). Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field. *Agricultural Water Management*, 69, 83-100.
98. Kneubühler, M. (2002). Spectral Assessment of Crop Phenology Based on Spring Wheat and Winter Barley. PhD. Dissertation, RSS Vol. 38, University of Zurich, pp: 149.
99. Kneubühler, M., Schaepman, M.E. and Kellenberger, T.W. (1997). Comparison of different approaches of selecting endmembers to classify agricultural land by means of hyperspectral data (DAIS7915). *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2: 888-890.
100. Kokaly, R.F. (2001). Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration. *Remote Sensing of Environment*, 75, 153-161.
101. Kokaly, R.F., Clark, R.N., (1999). Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sens. Environ.* 67 (3), 267-287.
102. Kumar, L., Schmidt, K., Dury, S. & Skidmore A. (2001). Imaging spectrometry and vegetation science. In: F.D. Van der Meer & S.M. De Jong (Editor), *Imaging spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications*. Remote Sensing and Digital Image Processing. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 111-155.
103. Latifi, H., and Oladi D. (2006). Evaluating landsat ETM+ data capability to produce forest cover type maps in the timberline of northern forests of Iran. *Taiwan J For Sci* 21(3): 363-375.
104. le Maire, G., François, C., and Dufrêne, E., (2004). Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 89(1):1-28.
105. Lee Y.J., Yang, C.M., Chang, K. W., & Shen, Y. (2008). A Simple Spectral Index Using Reflectance of 735 nm to assess Nitrogen Status of Rice Canopy. *Agronomy Journal*, 100(1), 205-212.
106. Lenk, S., & Buschmann, C. (2006). "Distribution of UV-shielding of the epidermis of sun and shade leaves of the beech (*Fagus sylvatica* L.) as monitored by multi-colour fluorescence imaging." *Journal of Plant Physiology* 163(12): 1273-1283.
107. Li, L. (2008). Quantifying lunar soil composition with partial least squares modeling of reflectance. *Advances in Space Research*, 42, 267-274.

108. Li, P.M., Fang, P., Wang, W.B., Gao, H.Y., & Peng, T. (2007). The higher resistance to chilling stress in adaxial side of *Rumex K-1* leaves is accompanied with higher photochemical and non-photochemical quenching. *Photosyntheticia*, 45 (4): 496-502.
109. Liu, H.Q., & Huete, A. (1995). Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 457-465.
110. Lovelock, C.E., & Robinson, S.A. (2002). Surface reflectance properties of Antarctic moss and their relationship to plant species, pigment composition and photosynthetic function. *Plant, Cell and Environment*, 25: 1239-1250.
111. Luginbühl, W., Jimeno, J., & Zehntner, U. (2006). Identification of seven species of the *Lactobacillus acidophilus* group by FT-IR spectroscopy, *Food Science and Technology*, 39, 152-158
112. Maccioni, A., Agati, G., & Mazzinghi, P. (2001). New vegetation indices for remote measurement of chlorophylls based on leaf directional reflectance spectra. *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology*, 61(1- 2), 52-61.
113. Malenovský, Z., Martin, E., Homolova, L., Gastellu-Etchegorry, J.P., Zurita-Milla, R., Schaepman, M.E., Pokorný, R., Clevers, J.G.P.W., & Cudlin, P. (2008). Influence of woody elements of a Norway spruce canopy on nadir reflectance simulated by the DART model at very high spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1-18
114. Malenovský, Z., Ufer, C., Lhotakova, Z., Clevers, J.G.P.W., Schaepman, M.E., Cudlin, P. and Albrechtova, J. (2005). A new Optical Index for Chlorophyll Estimation of a Forest Canopy from Hyperspectral Images. In *Imaging Spectroscopy - New Quality in Environmental Studies* (eds B. Zagajewski & M. Sobczak), 1: 651-659. EARSeL, Warsaw (Pl).
115. Malenovský, Z., Ufer, C.M., Lhotáková, Z., Clevers, J.G.P.W., Schaepman, M.E., Albrechtová, J. (2006). A new hyperspectral index for chlorophyll estimation of a forest canopy: area under curve Normalized to Maximal Band depth between 650-725 nm. *EARSeL eProceedings*, 5, 161-172.
116. Mc Murtey III, J. E., Chappelle, E. W., Kim, M. S., Meisinger, J. J., & Corp, L. A. (1994). Distinguish nitrogen fertilization levels in field corns (*Zea mays L.*) with actively induced fluorescence and passive reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 47, 36- 44.
117. Miller, J. R., Hare, E. W., & Wu, J. (1990). Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance. *Remote Sensing*, 11(10), 1755- 1773.
118. Mutanga, O., & Skidmore, A.K. (2004). Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3999-4014.
119. Mutanga, O., & Skidmore, A.K. (2007). Red edge shift and biochemical content in grass canopies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, 34-42.
120. Mutanga, O., Skidmore A.K. & Van Wieren, S., (2003). Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry. *ISPRS journal of photogrammetry & remote sensing*, Vol. 57. No. 3, 263-272.

121. Mutanga, O., Skidmore, A.K., & Prins, H.H.T. (2004). Predicting in situ pasture quality in the Kruger National Park, South Africa, using continuum-removed absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 89, 393-408.
122. Niewiadomska, A. (2007). Estimation of biochemical vegetation parameters and biomass of the natural vegetation in the Millingerwaard using imaging spectroscopy. Center for Geo-information, thesis report GIRS-2006-38. Page:76
123. Nørgaard, L., Saudland, A., Wagner, J., Nielsen, J.P., Munck, L., and Engelsen, S.B. (2000) Interval partial least-squares regression (iPLS): A comparative chemometric study with an example from near-infrared spectroscopy, *Applied Spectroscopy*, 54, 413-419.
124. Ourcival, J.M., Joffre, R., & Rambal, S. (1999). Exploring the relationships between reflectance and anatomical and biochemical properties in *Quercus ilex* leaves. *New Phytologist*, 143, 351-364.
125. Penuelas, J., Baret, F., & Filella, I. (1995). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31(2), 221- 230.
126. Penuelas, J., Gamon, J. A., Fredeen, A. L., Merino, J., & Field, C. B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, 135- 146.
127. Peñuelas, J., Gamon, J. A., Griffin, K. L., & Field, C. B. (1993). Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 46, 110–118.
128. Price, J.C. (1994). How unique are spectral signatures? *Remote Sensing of Environment*, 49, 181–186.
129. Reeves Iii, J.B., & Van Kessel, J.S. (2000). Near-infrared spectroscopic determination of carbon, total nitrogen, and ammonium-N in dairy manures. *Journal of Dairy Science*, 83, 1829-1836.
130. Ren, H.Y., Zhuang, D.F., Pan, J.J., Shi, X.Z., & Wang, H.J. (2008). Hyper-spectral remote sensing to monitor vegetation stress. *Journal of Soils and Sediments*, 8, 323-326.
131. Richardson, A.D., Berlyn, G.P., & Duigan, S.P. (2003). Reflectance of Alaskan black spruce and white spruce foliage in relation to elevation and latitude. *Tree Physiology*, 23, 537-544.
132. Richardson, A.D., Reeves Iii, J.B., & Gregoire, T.G. (2004). Multivariate analyses of visible/near infrared (VIS/NIR) absorbance spectra reveal underlying spectral differences among dried, ground conifer needle samples from different growth environments. *New Phytologist*, 161, 291-301.
133. Richardson, A.J., & Wiegand, C.L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(2), 1541-1552.
134. Roberts, D.A., Ustin, S.L. Ogunjemiyo, S., Greenberg, J., Dobrowski, S.Z., Chen, J., & Hinckley, T.M. (2004). Spectral and Structural Measures of Northwest Forest Vegetation at Leaf to Landscape Scales. *Ecosystems*, 7, 545-562.
135. Roujean, J. -L., & Breon, F. -M. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51(3), 375-384.

136. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, Washington, D.C., 10–14 December 1973. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. Rep. Nos. E74-10027 and NASA-TM-X-69450. pp. 309–317.
137. Royo, C., Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Monneveux, P., & Araus, J.L. (2003). Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 4403-4419.
138. Ruckebusch, C., Orhan, F., Durand, A., Boubellouta, T., & Huvenne, J.P. (2006). Quantitative analysis of cotton-polyester textile blends from near-infrared spectra. *Applied Spectroscopy*, 60, 539-544.
139. Sanger, J.E. (1971). Quantitative Investigations of Leaf Pigments From Their Inception in Buds through Autumn Coloration to Decomposition in Falling Leaves. *Ecology*, 52(6), 1075-1089.
140. Schaepman, M.E. (2007). Spectrodirectional remote sensing: From pixels to processes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9, 204-223.
141. Schaepman, M.E. and Dangel S. (2000). Solid laboratory calibration of nonimaging spectroradiometer. *Applied Optics*, 39(21): 3754-3764.
142. Schaepman, M.E., Koetz, B., Gabriela Schaepman-Strub, Itten K.I. (2005). Spectrodirectional remote sensing for the improved estimation of biophysical and -chemical variables: two case studies. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 6, 271-282.
143. Schaepman, M.E., Wamelink, G.W.W., Van Dobben, H., Gloor, M., Schaepman-Strub, Kooistra, L., Schmidt, A. & Berendse, F. (2005a). Regional scale ecosystem modeling for vegetation scenario development. *ISP MSRS 2005 conference proceedings*, Beijing, China, 667-670.
144. Schaepman-Strub, G., Limpens, J., Menken, M., Bartholomeus, H.M., & Schaepman, M.E. (2008). Towards spatial assessment of carbon sequestration in peatlands: Spectroscopy based estimation of fractional cover of three plant functional types. *Biogeosciences Discussions*, 5, 1293-1317.
145. Schlerf, M., Hill, J., Buddenbaum, H. & Werner, W. (2005). Assessment of vegetation nitrogen status from hyperspectral laboratory and image data. *ISP MSRS 2005 conference proceedings*, Beijing, China, 60-63.
146. Schmidt K.S., Skidmore A.K. (2003). Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sensing of Environments*, 85, 92-108.
147. Schmidt, K.S., & Skidmore, A.K. (2003). Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sensing of Environment*, 85, 92-108.
148. Schneider, W.E., Young, R. (1998). *Spectroradiometry Methods: A guide to photometry and visible spectroradiometry*. Application Note (A14), OPTRONIC LABORATORIES, INC. pp, 47. Website: [www.olinet.com](http://www.olinet.com).

149. Seager, S., Turner, E.L., Schafer, J., & Ford, E.B. (2005). Vegetation's red edge: A possible spectroscopic biosignature of extraterrestrial plants. *Astrobiology*, 5, 372-390.
150. Shen, Y., Lo, J.C. & Cheng, S.P. (2000). Development of remote sensing techniques to identify nitrogen status of paddy rice. (in Chinese with English abstract). *Chin. J. Agromet.* 7, 23-32.
151. Sims, D.A. and Gamon, J.A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81, 337-354.
152. Skidmore, A.K. and Schmidt, K.S. (1998) Mapping rangeland vegetation using hyperspectral vegetation spectra. In: 1st EARSeL workshop on imaging spectroscopy, University of Zurich, Switzerland, 6-8 October, 285-297.
153. Smith, M.-L., Ollinger, S.V., Martin, M.E., Aber, J.D., Hallett, R.A., Goodale, C.L. (2002). Direct estimation of aboveground forest productivity through hyperspectral remote sensing of canopy nitrogen. *Ecological Applications*, 12(5), 1286-1302.
154. Smith, R. C. G., Adams, J., Stephens, D. J., & Hick, P. T. (1995). Forecasting wheat yield in a Mediterranean-type environment from the NOAA satellite. *Australian Journal of Agricultural Research*, 46, 113- 125.
155. Stæhr, P.A., & Cullen, J. J. (2003). Detection of *Karenia mikimotoi* by spectral absorption signatures. *Journal of Plankton Research*, 25(10), 1237-1249.
156. Stimson, H.C., Breshears, D.D., Ustin, S.L. and Kefauver, S.C. (2005). Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occurring conifer species: *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma*. *Remote Sensing of Environment*, 96: 108-118.
157. Sturb, G., Keller, P., Kneubuehler, M., Schlapfer D., Schaepman, M.E. & Itten, K.I. (1998). Extraction and validation of biophysical variables of grassland communities using spectroradiometric measurements. *Proc. of 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectrometry, Zurich*.
158. Thorhaug, A., Richardson, A.D., & Berlyn, G.P. (2006). Spectral reflectance of *Thalassia testudinum* (Hydrocharitaceae) seagrass: Low salinity effects. *American Journal of Botany*, 93, 110-117.
159. Tinetti, G., Rashby, S.; Yung, Y. (2006). Detectability of red-edge-shifted vegetation on terrestrial planets orbiting M Stars. *The Astrophysical Journal*, 644 (2), 129-132.
160. Turner, B. (1998). Hyperspectral characteristics of Australian native Eucalypt forests. *Proc. of 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectrometry, Zurich*, 285-297.
161. Ustin, S. L., Asner, G. P., Gamon, J.A., Gitelson, A. A., Huemmrich, K. F., Jacquemoud, S., Schaepman, M.E. and Zarco-Tejada, P. J. (2006). Retrieval of quantitative and qualitative information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Article number 4241664: 1996-1999

162. Ustin, S. L., Smith, M. O. and Adams J. B. (1993). Remote sensing of ecological processes: A strategy for developing and testing ecological models using spectral mixture analysis. In: J. R. Ehrlinger and C. B. Field, Editors, *Scaling Physiological Processes. Leaf to Globe*, Academic Press, San Diego pp. 339-35.
163. Vaesen, K., Gilliams, S., Nackaerts, K., & Coppin, P. (2001). Ground-measured spectral signatures as indicators of ground cover and leaf area index: The case of paddy rice. *Field Crops Research*, 69, 13-25.
164. Van Aardat, J.A.N. (2000). Spectral separability among six southern tree species. MSc Thesis, Virginia polytechnic institute and state university Blacksburg, USA. Pp. 184.
165. Vogelman, J. E., Rock, B. N., & Moss, D. M. (1993). Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 14(8), 1563-1575.
166. Wang, F. M., Huang, J. F. & Wang, X. Z. (2008). Identification of Optimal Hyperspectral Bands for Estimation of Rice Biophysical Parameters. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50 (3), 291-299.
167. Williams, D.L. (1991). A comparison of spectral reflectance properties of the needle, branch and canopy level for selected conifer species. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 35, 79-93.
168. Xue, L., & Yang, L. (2008). Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* article in press.
169. Xue, L., Cao, W., Luo, W., Dai, T., & Zhu, Y. (2004). Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. *American Society of Agronomy*, 96, 135-142.
170. Yang C.M. & Cheng C.H. (2001). Spectral characteristics of rice plants infested by brown planthoppers. *Proceedings of Natural Science*, 25(3), 180-186.
171. Yao, Z., Sakai, K., Ye, X., Akita, T., Iwabuchi, Y., & Hoshino, Y. (2008). Airborne hyperspectral imaging for estimating acorn yield based on the PLS B-matrix calibration technique. *Ecological Informatics*, 3, 237-244.
172. Ye, X., Sakai, K., Sasao, A., & Asada, S.i. (2008). Potential of airborne hyperspectral imagery to estimate fruit yield in citrus. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90, 132-144.
173. Yitagesu, F.A., van der Meer, F., van der Werff, H., & Zigterman, W. (2009). Quantifying engineering parameters of expansive soils from their reflectance spectra. *Engineering Geology*, 105, 151-160.
174. Yoder, B. J., and Pettigrew-Crosby, R. E. (1995). Predicting Nitrogen and Chlorophyll Content and Concentrations from Reflectance Spectra (400-2500 nm) at Leaf and Canopy Scales. *Remote Sensing of Environment*, 53, 199-211.
175. Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Noland, T. L., Mohammed, G. H., & Sampson, P. (2001). Scaling up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7), 1491-1501.
176. Zarco-Tejada, P.J., Berjon, A., Lopez-Lozano, R., Miller, J. R., Martin, P., Cachorro, V., Gonzalez, M. R. and de Frutos, A. (2005a). Assessing vineyard condition with hyperspectral

indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment*, 99, 271-287.

177. Zarco-Tejada, P.J., Ustin, S.L., & Whiting, M.L. (2005b). Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 97, 641-653.
178. Zhu, Y., Yao, X., Tian, Y., Liu, X., & Cao, W. (2008). Analysis of common canopy vegetation indices for indicating leaf nitrogen accumulations in wheat and rice. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, 1-10.
179. <http://speclib.asu.edu> (Christensen *et al.* 2000)
180. [http://pds.geosciences.wustl.edu/missions/mro/spectral\\_library.htm](http://pds.geosciences.wustl.edu/missions/mro/spectral_library.htm) and
181. <http://speclab.cr.usgs.gov> (Clark *et al.* 2007)
182. [http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mro/spectral\\_library.htm](http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mro/spectral_library.htm)
183. [http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~spex/IRTF\\_Spectral\\_Library](http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~spex/IRTF_Spectral_Library)
184. [http://www.chemlin.de/chemistry/spectral\\_database.htm](http://www.chemlin.de/chemistry/spectral_database.htm)
185. <http://asterweb.jpl.nasa.gov>
186. <http://www.thermo.com/>



جدول ۱: جدول تجزیه واریانس رگرسیون کلروفیل با نیتروژن برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه

| موقعیت برگ | رابطه رگرسیون        | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F        | سطح معنی داری |
|------------|----------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|----------|---------------|
| نور        | $y = 0.197x - 0.112$ | ۴۸         | ۰/۸۵         | ۰/۰۰۰                      | ۶/۶۱    | ۱۲۶/۹*** | ۰/۰۰۰         |
| سایه       | $y = 0.15x - 0.16$   | ۴۸         | ۰/۷۸         | ۰/۰۰۰                      | ۸/۸     | ۷۷/۴۴*** | ۰/۰۰۰         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۰/۹۹

جدول ۲: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRI1 حاصل از برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه با کلروفیل و نیتروژن

| متغیر   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون        | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F    | سطح معنی داری |
|---------|------------|----------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|------|---------------|
| کلروفیل | نور        | $y = -16/98x + 4/22$ | ۴۹         | -۰/۲۴        | ۱/۲۱                       | -۱/۷۲   | ۲/۹۹ | ۰/۰۹          |
|         | سایه       | $y = -35/42x + 2/49$ | ۴۹         | -۰/۲۶        | ۱/۴۴                       | -۱/۸۲   | ۳/۳۴ | ۰/۰۷۴         |
| نیتروژن | نور        | $y = -0.15x + 0.55$  | ۹۳         | -۰/۱۳        | ۰/۰۰۰                      | -۱/۲۶   | ۱/۶۰ | ۰/۲۰۸         |
|         | سایه       | $y = -0.17x + 0.28$  | ۹۱         | -۰/۱۶        | ۰/۰۰۰                      | -۱/۵۳   | ۲/۳۶ | ۰/۱۲۸         |

جدول ۳: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRI2 حاصل از برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه با کلروفیل و نیتروژن

| متغیر   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون        | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F     | سطح معنی داری |
|---------|------------|----------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|-------|---------------|
| کلروفیل | نور        | $y = 0.02x + 0.008$  | ۴۸         | ۰/۱۲         | ۰/۰۰۰                      | ۰/۰۸۳   | ۰/۰۰۷ | ۰/۹۳          |
|         | سایه       | $y = 0.004x - 0.350$ | ۴۹         | ۰/۰۴         | ۰/۰۰۰                      | ۰/۳۲    | ۱/۰۸  | ۰/۷۲          |
| نیتروژن | نور        | $y = 0.008x - 0.009$ | ۹۳         | ۰/۰۸         | ۰/۰۰۰                      | ۰/۷۸۲   | ۰/۶۱۱ | ۰/۴۳۶         |
|         | سایه       | $y = 0.460x - 0.041$ | ۹۳         | ۰/۰۴         | ۰/۰۰۰                      | ۰/۹۳    | ۱/۳۴  | ۰/۶۵          |

جدول ۴: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRI2 حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با کلروفیل

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون        | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F      | سطح معنی داری |
|--------|------------|----------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|--------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = 13/27x + 4/838$ | ۱۵         | ۰/۴۷         | ۰/۰۰                       | ۲/۰۷۳   | ۱۰/۴** | ۰/۰۰۲         |
|        | سایه       | $y = -28/86x + 4/25$ | ۱۶         | -۰/۴۵        | ۰/۳۵۲                      | -۲/۰۶۱  | ۴/۲۳*  | ۰/۰۰۴         |
| انجیلی | نور        | $y = 6/859x + 2/111$ | ۱۳         | ۰/۳۹         | ۰/۱۳۲                      | ۱/۵۴۳   | ۱/۳۳۵  | ۰/۱۴۷         |
|        | سایه       | $y = 7/655x + 2/217$ | ۱۲         | ۰/۱۸         | ۰/۱۱۲                      | ۰/۶۴۹   | ۰/۴۵۲  | ۰/۵۲۸         |
| بلوط   | نور        | $y = 11/64x + 3/677$ | ۱۵         | ۰/۴۵         | ۰/۰۸۹                      | ۱/۹۵۷   | ۰/۴۶۴  | ۰/۰۶۹         |
|        | سایه       | $y = 7/852x + 3/975$ | ۱۴         | ۰/۱۷         | ۰/۲۲۴                      | ۰/۶۵۶   | ۰/۵۴۶  | ۰/۵۲۲         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۰/۹۹، \* معنی دار در سطح اطمینان ۰/۹۰.

جدول ۵: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRI2 حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با نیتروژن

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون          | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F     | سطح معنی داری |
|--------|------------|------------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|-------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = -1/944 x + 0/695$ | ۱۵         | -۰/۳۰        | ۰/۰۰۴                      | -۱/۲۲۵  | ۱/۵۰  | ۰/۲۳۹         |
|        | سایه       | $y = 1/806 x + 0/670$  | ۱۶         | ۰/۲۴         | ۰/۰۰۶                      | ۰/۹۹۶   | ۰/۹۹۴ | ۰/۳۳۳         |
| ممرز   | نور        | $y = -0/833 x + 0/641$ | ۱۶         | -۰/۲۲        | ۰/۰۰۴                      | -۰/۹۲۶  | ۰/۸۵  | ۰/۳۶۸         |
|        | سایه       | $y = 0/232 x + 0/569$  | ۱۶         | ۰/۰۵۶        | ۰/۰۰۵                      | ۰/۲۲۸   | ۰/۰۵۲ | ۰/۸۲۲         |
| راش    | نور        | $y = -0/803 x + 0/444$ | ۲۴         | -۰/۲۲        | ۰/۰۰۵                      | -۱/۱۰۷  | ۱/۲۲  | ۰/۲۷۹         |
|        | سایه       | $y = 1/043 x + 0/437$  | ۲۴         | ۰/۳۳         | ۰/۰۰۲                      | ۱/۷۳۴   | ۳/۰۰۵ | ۰/۰۹۶         |
| انجیلی | نور        | $y = 0/028 x + 0/21$   | ۱۳         | ۰/۰۲۲        | ۰/۰۰۱                      | ۰/۰۷۹   | ۰/۰۰۶ | ۰/۹۳۷         |
|        | سایه       | $y = -2/64 x + 0/099$  | ۱۲         | -۰/۴۸        | ۰/۰۰۲                      | -۱/۹۱   | ۳/۶۵  | ۰/۰۸۱         |
| بلوط   | نور        | $y = 0/091 x + 0/746$  | ۱۵         | ۰/۰۱۶        | ۰/۰۰۶                      | ۰/۰۶۵   | ۰/۰۰۴ | ۰/۹۴۸         |
|        | سایه       | $y = 0/034 x + 0/68$   | ۱۴         | ۰/۰۰۴        | ۰/۰۱۱                      | ۰/۰۱۵   | ۰/۰۰  | ۰/۹۸۷         |

جدول ۶: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRI3 حاصل از برگ نور و سایه همه گونه‌های مورد مطالعه با کلروفیل و نیتروژن

| متغیر   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون          | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F        | سطح معنی داری |
|---------|------------|------------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|----------|---------------|
| کلروفیل | نور        | $y = 0/076 x + 0/079$  | ۴۹         | ۰/۲۱         | ۰/۰۰۰                      | ۰/۸۵۴   | ۰/۷۳     | ۰/۴۰۶         |
|         | سایه       | $y = 0/045 x + 0/0701$ | ۴۹         | ۰/۳۵         | ۰/۰۰۰                      | ۲/۵۶    | ۶/۵۶***  | ۰/۰۱۴         |
| نیتروژن | نور        | $y = -0/019 x - 0/057$ | ۹۳         | -۰/۲۲        | ۰/۰۰۰                      | ۲/۱۴    | ۴/۶۰*    | ۰/۰۳۵         |
|         | سایه       | $y = 0/048 x - 0/083$  | ۹۳         | ۰/۵۰         | ۰/۰۰۰                      | ۵/۴۸    | ۳۰/۰۲*** | ۰/۰۰۰         |

\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪، \* معنی دار در سطح اطمینان ۹۰٪.

جدول ۷: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRI3 حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با کلروفیل

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون          | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F       | سطح معنی داری |
|--------|------------|------------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|---------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = 4/343 x + 4/879$  | ۱۵         | ۰/۱۲         | ۰/۰۰                       | ۰/۴۶۸   | ۰/۲۵    | ۰/۶۴۶         |
|        | سایه       | $y = -23/64 x + 3/446$ | ۱۶         | -۰/۴۶        | ۰/۳۵۲                      | -۲/۱۲   | ۴/۱۶*** | ۰/۰۴۹         |
| انجیلی | نور        | $y = 9/292 x + 2/532$  | ۱۳         | ۰/۴۳         | ۰/۱۳۲                      | ۱/۷۵۶   | ۱/۴۱۵   | ۰/۱۰۳         |
|        | سایه       | $y = 7/28 x + 2/496$   | ۱۲         | ۰/۱۹         | ۰/۱۱۲                      | ۰/۶۸۴   | ۰/۱۵۲   | ۰/۵۰۷         |
| بلوط   | نور        | $y = -1/13 x + 0/698$  | ۱۵         | -۰/۱۶        | ۰/۰۸۹                      | -۰/۶۳۵  | ۰/۴۶۴   | ۰/۵۳۴         |
|        | سایه       | $y = -8/392 x + 3/487$ | ۱۴         | -۰/۱۷        | ۰/۲۲۴                      | -۰/۶۵۳  | ۰/۲۵    | ۰/۵۲۴         |

جدول ۸: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی PRI3 حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با نیتروژن

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون          | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F     | سطح معنی داری |
|--------|------------|------------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|-------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = -0.0741x + 0.680$ | ۱۵         | -۰/۱۰        | ۰/۰۰۰                      | -۰/۳۹۴  | ۰/۱۵۵ | ۰/۶۹۹         |
|        | سایه       | $y = -0.358x + 0.625$  | ۱۶         | -۰/۰۸        | ۰/۰۰۰                      | -۰/۳۲۶  | ۰/۳۳۳ | ۰/۷۴۸         |
| ممرز   | نور        | $y = 1/42x + 0.676$    | ۱۵         | ۰/۲۶         | ۰/۰۰۰                      | ۱/۰۵۶   | ۱/۱۱  | ۰/۳۰۸         |
|        | سایه       | $y = 1/477x + 0.629$   | ۱۶         | ۰/۲۸         | ۰/۰۰۰                      | ۱/۱۸۹   | ۱/۴۱  | ۰/۲۵۲         |
| راش    | نور        | $y = -0.900x + 0.403$  | ۲۴         | -۰/۲۴        | ۰/۰۰۰                      | -۱/۲۲۱  | ۱/۴۹  | ۰/۲۳۴         |
|        | سایه       | $y = 1/01x + 0.480$    | ۲۴         | ۰/۲۵         | ۰/۰۰۰                      | ۱/۳۱۸   | ۱/۷۳  | ۰/۲۰۰         |
| انجیلی | نور        | $y = 0.073x + 0.229$   | ۱۴         | ۰/۰۱۸        | ۰/۰۰۰                      | ۰/۰۶۷   | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۴۶         |
|        | سایه       | $y = -1/803x + 0.055$  | ۱۳         | ۰/۰۷۳        | ۰/۰۰۰                      | -۱/۳۸۸  | ۰/۹۶  | ۰/۱۸۹         |
| بلوط   | نور        | $y = -1/13x + 0.698$   | ۱۵         | -۰/۱۶        | ۰/۰۰۰                      | -۰/۶۳۵  | ۰/۴۰  | ۰/۵۳۴         |
|        | سایه       | $y = -2/027x + 0.577$  | ۱۴         | -۰/۲۱        | ۰/۰۰۰                      | -۰/۸۰۸  | ۰/۶۵  | ۰/۴۳۲         |

جدول ۹: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی SIPI حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با کلروفیل

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون         | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F        | سطح معنی داری |
|--------|------------|-----------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|----------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = 18/01x - 13/34$  | ۱۵         | -۰/۷۱        | ۰/۰۰                       | -۳/۹۶۹  | ۱۰/۲۵*** | ۰/۰۰۱         |
|        | سایه       | $y = -41/51x + 46/3$  | ۱۶         | -۰/۴۶        | ۰/۳۵۲                      | -۲/۱۱۶  | ۴/۱۶*    | ۰/۰۵۱         |
| انجیلی | نور        | $y = -42/64x + 45/1$  | ۱۳         | -۰/۶۱        | ۰/۱۳۲                      | -۲/۸۴   | ۶/۴۱۵*** | ۰/۰۱          |
|        | سایه       | $y = -33/04x + 35/51$ | ۱۲         | -۰/۵۳        | ۰/۱۱۲                      | -۲/۲۱۳  | ۰/۱۵۲    | ۰/۰۴۸         |
| بلوط   | نور        | $y = -17/35x + 21/25$ | ۱۵         | -۰/۲۶        | ۰/۰۸۹                      | -۱/۰۶۹  | ۰/۴۶۴    | ۰/۳۰          |
|        | سایه       | $y = -66/56x + 63/27$ | ۱۴         | -۰/۳۸        | ۰/۲۲۴                      | -۱/۵۴   | ۲/۲۵     | ۰/۱۴۶         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۹۹٪، \* معنی دار در سطح اطمینان ۹۰٪.

جدول ۱۰: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی SIPI حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با نیتروژن

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون         | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F       | سطح معنی داری |
|--------|------------|-----------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|---------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = -2/114x + 2/835$ | ۱۵         | -۰/۴۶        | ۰/۰۰۰                      | -۲/۰۷   | ۴/۲۸*   | ۰/۰۵۵         |
|        | سایه       | $y = 0/966x - 0/324$  | ۱۶         | ۰/۰۸۶        | ۰/۰۰۰                      | ۰/۳۴۸   | ۰/۱۲۱   | ۰/۷۳۲         |
| ممرز   | نور        | $y = -0/686x + 1/324$ | ۱۶         | -۰/۰۳۷       | ۰/۰۰۰                      | -۰/۱۵۰  | ۰/۰۲۳   | ۰/۸۸۲         |
|        | سایه       | $y = 2/985x - 2/449$  | ۱۶         | ۰/۲۷         | ۰/۰۰۰                      | ۱/۱۶۱   | ۱/۳۴۹   | ۰/۲۶۲         |
| راش    | نور        | $y = -0/332x + 0/790$ | ۲۴         | -۰/۰۳۵       | ۰/۰۰۰                      | -۰/۱۷۴  | ۰/۰۳۰   | ۰/۸۶۳         |
|        | سایه       | $y = -1/463x + 1/881$ | ۲۴         | -۰/۱۷        | ۰/۰۰۰                      | -۰/۸۸۴  | ۰/۷۸۳   | ۰/۳۸۵         |
| انجیلی | نور        | $y = -0/289x + 0/502$ | ۱۳         | -۰/۰۵۷       | ۰/۰۰۰                      | -۰/۲۰۸  | ۰/۰۴۳   | ۰/۸۳۸         |
|        | سایه       | $y = 5/216x - 5/114$  | ۱۲         | ۰/۶۴         | ۰/۰۰۰                      | ۲/۹۲۹   | ۸/۵۷*** | ۰/۰۱۳         |
| بلوط   | نور        | $y = -6/742x + 7/565$ | ۱۵         | -۰/۴۵        | ۰/۰۰۰                      | -۱/۹۸۹  | ۳/۹۵*   | ۰/۰۶۵         |

|       |         |        |       |       |    |                        |      |
|-------|---------|--------|-------|-------|----|------------------------|------|
| ۰/۰۳۸ | ۵/۲۸*** | -۲/۲۲۹ | ۰/۰۰۰ | -۰/۵۲ | ۱۴ | $y = -۱۶/۶۵ x + ۱۷/۴۸$ | سایه |
|-------|---------|--------|-------|-------|----|------------------------|------|

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۰/۹۹، \* معنی دار در سطح اطمینان ۰/۹۰.

جدول ۱۱: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی Datt حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با کلروفیل

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون          | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F     | سطح معنی داری |
|--------|------------|------------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|-------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = ۱/۵۶۴ x + ۳/۵۷۵$  | ۱۶         | ۰/۴۴         | ۰/۰۷۹                      | ۱/۹۱۴   | ۳/۶۶* | ۰/۰۷۵         |
|        | سایه       | $y = ۱۰/۵۹ x - ۲/۵۱۵$  | ۱۶         | ۰/۳۰         | ۰/۴۰۵                      | ۱/۲۲۱   | ۱/۴۹۱ | ۰/۲۴۰         |
| انجیلی | نور        | $y = ۱/۲۰۳ x + ۱/۳۳۳$  | ۱۳         | ۰/۰۷         | ۰/۱۴۵                      | ۰/۲۶۲   | ۰/۰۶۸ | ۰/۷۹۸         |
|        | سایه       | $y = ۰/۴۰۱ x + ۱/۷۴۱$  | ۱۳         | ۰/۰۱۳        | ۰/۱۱۴                      | ۰/۰۴۵   | ۰/۰۰۲ | ۰/۹۶۵         |
| بلوط   | نور        | $y = -۰/۸۳۵ x + ۴/۲۵۲$ | ۱۵         | ۰/۱۵         | ۰/۱۲۸                      | ۰/۰۵۸   | ۰/۰۰۳ | ۰/۹۵۵         |
|        | سایه       | $y = ۷/۳۳۹ x - ۰/۹۷۷$  | ۱۵         | ۰/۲۵         | ۰/۳۰۴                      | ۰/۹۵۶   | ۰/۹۱۳ | ۰/۳۵۶         |

\* معنی دار در سطح اطمینان ۰/۹۰.

جدول ۱۲: جدول تجزیه واریانس رگرسیون شاخص طیفی Datt حاصل از برگ نور و سایه هر گونه با نیتروژن

| گونه   | موقعیت برگ | رابطه رگرسیون         | درجه آزادی | ضریب همبستگی | میانگین مربعات (باقیمانده) | آماره t | F        | سطح معنی داری |
|--------|------------|-----------------------|------------|--------------|----------------------------|---------|----------|---------------|
| توسکا  | نور        | $y = ۰/۷۵۳ x + ۰/۱۹۰$ | ۱۵         | ۰/۵۸         | ۰/۰۰۳                      | ۲/۷۴    | ۷/۵۰***  | ۰/۰۱۵         |
|        | سایه       | $y = ۱/۸۰۵ x - ۰/۵۸۱$ | ۱۶         | ۰/۷۵         | ۰/۰۰۲                      | ۴/۵۵۶   | ۲۰/۷۶*** | ۰/۰۰۰         |
| ممرز   | نور        | $y = ۰/۲۸۵ x + ۰/۴۴۹$ | ۱۶         | ۰/۲۰         | ۰/۰۰۴                      | ۰/۷۵۵   | ۰/۶۰     | ۰/۴۵۰         |
|        | سایه       | $y = ۰/۵۲۵ x + ۰/۵۴۲$ | ۱۶         | ۰/۱۴         | ۰/۰۰۳                      | ۰/۱۹۸   | ۰/۵۷۴    | ۰/۵۷۴         |
| راش    | نور        | $y = -۰/۰۵۸ x + ۰/۴۹$ | ۲۴         | ۰/۱۲         | ۰/۰۰۵                      | -۰/۶۰۵  | ۰/۳۶۶    | ۰/۵۵۱         |
|        | سایه       | $y = ۰/۰۵۱ x + ۰/۳۶۹$ | ۲۴         | ۰/۰۲         | ۰/۰۰۳                      | ۰/۱۰۶   | ۰/۰۱     | ۰/۹۱۶         |
| انجیلی | نور        | $y = ۰/۲۳۲ x + ۰/۰۶۶$ | ۱۳         | ۰/۳۶         | ۰/۰۰۱                      | ۱/۴۲۱   | ۱/۴۶۷    | ۰/۱۷۹         |
|        | سایه       | $y = ۰/۶۶۷ x + ۰/۵۸۸$ | ۱۳         | ۰/۶۱         | ۰/۰۸۹                      | ۲/۶۸    | ۷/۲۱***  | ۰/۰۲۷         |
| بلوط   | نور        | $y = ۰/۹۶۳ x + ۰/۰۹۷$ | ۱۵         | ۰/۱۲         | ۰/۰۰۵                      | ۰/۴۵۷   | ۰/۲۰۸    | ۰/۶۵۵         |
|        | سایه       | $y = ۰/۵۴۳ x + ۰/۳۲۱$ | ۱۵         | ۰/۲۳         | ۰/۰۱۰                      | ۰/۹۰۵   | ۰/۸۱۹    | ۰/۳۸۱         |

\*\*\* معنی دار در سطح اطمینان ۰/۹۹، \* معنی دار در سطح اطمینان ۰/۹۰.

جدول ۱۳: نتایج آزمون نرمال بودن به روش Kolmogorov-Smirnov و سطح معنی داری (p) هر شاخص محاسبه شده برای برگ نور و سایه ( $p > ۰/۰۵$ ) پراکنش داده‌ها نرمال است.

| توسکا | ممرز  | راش   | انجیلی | بلوط  |      |
|-------|-------|-------|--------|-------|------|
| ۰/۸۸۸ | ۰/۹۴۹ | ۰/۸۲۳ | ۰/۸۳۰  | ۰/۹۹۶ | PRI1 |
| ۰/۹۹۲ | ۰/۱۷۹ | ۰/۶۶۲ | ۰/۹۵۴  | ۰/۹۷۸ |      |
| ۰/۷۵۸ | ۰/۹۶۸ | ۰/۹۳۷ | ۰/۹۷۷  | ۰/۸۸۹ | PRI2 |
| ۰/۹۹۸ | ۰/۷۶۷ | ۰/۹۰۶ | ۰/۷۶۱  | ۰/۸۸۸ |      |
| ۰/۹۴۳ | ۱/۰۰  | ۰/۹۹۹ | ۰/۸۰۹  | ۰/۹۸۲ | PRI3 |
| ۰/۳۷۱ | ۰/۸۴۱ | ۰/۵۸۶ | ۰/۸۸۰  | ۰/۸۲۱ |      |
| ۰/۴۳۳ | ۰/۸۶۸ | ۰/۳۶۵ | ۰/۴۴۲  | ۰/۶۴۱ | SIPI |

|      |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| سایه | ۰/۸۸۷ | ۰/۸۸۵ | ۰/۴۷۲ | ۰/۶۳۹ | ۰/۹۶۷ |
| نور  | ۰/۸۸۸ | ۰/۹۸۷ | ۰/۹۵۱ | ۰/۲۳۳ | ۰/۶۹۰ |
| سایه | ۰/۹۶۸ | ۰/۷۶۸ | ۰/۹۱۶ | ۰/۷۵۵ | ۰/۵۲۵ |
| نور  | ۰/۹۶۶ | ۰/۹۹۱ | ۰/۶۱۳ | ۰/۹۱۵ | ۰/۹۴۲ |
| سایه | ۰/۷۶۴ | ۰/۴۷۹ | ۰/۹۴۳ | ۰/۷۸۱ | ۰/۹۳۳ |

جدول ۱۴: نتایج حاصل از آزمون t برای مقایسه برگ‌های نور و سایه هر گونه توسط شاخص‌های طیفی SIPI

| شاخص طیفی SIPI |         | درجه آزادی | گونه‌ها |
|----------------|---------|------------|---------|
| نتیجه آزمون    |         |            |         |
| p              | t       |            |         |
| ۰/۶۳           | -۰/۴۹۱  | ۱۷         | توسکا   |
| ۰/۳۸۳          | -۰/۸۹۳  | ۱۸         | ممرز    |
| ۰/۴۷۵          | -۰/۷۲۶  | ۲۶         | راش     |
| ۰/۰۱۹          | -۲/۶۵** | ۱۴         | انجیلی  |
| ۰/۲۴           | ۱/۲۱    | ۱۶         | بلوط    |

\*\* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪

جدول ۱۵: نتایج حاصل از آزمون t برای مقایسه برگ‌های نور و سایه هر گونه توسط شاخص‌های طیفی Datt

| شاخص طیفی Datt |         | درجه آزادی | گونه‌ها |
|----------------|---------|------------|---------|
| نتیجه آزمون    |         |            |         |
| p              | t       |            |         |
| ۰/۰۰۲          | ۳/۷**   | ۱۷         | توسکا   |
| ۰/۴۲۴          | ۰/۸۱۹   | ۱۸         | ممرز    |
| ۰/۰۱۰          | ۲/۸**   | ۲۶         | راش     |
| ۰/۰۰۰          | ۶۴/۵۵** | ۱۴         | انجیلی  |
| ۰/۱۹۱          | ۱/۳۶    | ۱۶         | بلوط    |

\*\* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪

جدول ۱۶: نتایج حاصل از آزمون t برای مقایسه برگ‌های نور و سایه هر گونه توسط شاخص‌های طیفی ANCB

| شاخص طیفی ANCB |        | درجه آزادی | گونه‌ها |
|----------------|--------|------------|---------|
| نتیجه آزمون    |        |            |         |
| p              | t      |            |         |
| ۰/۰۰۲          | ۳/۵۵** | ۱۷         | توسکا   |
| ۰/۱۳۳          | ۱/۵۷   | ۱۸         | ممرز    |
| ۰/۰۰۰          | ۹/۶۱** | ۲۶         | راش     |
| ۰/۱۴۹          | ۱/۵۲   | ۱۴         | انجیلی  |
| ۰/۲۰۲          | ۱/۳۳   | ۱۶         | بلوط    |

## Abstract

Remote sensing systems, especially hyperspectral remote sensing require fundamental knowledge of spectral reflectance of desired tree species for recognizing tree species and mapping forest type. Field spectrometry as a field of remote sensing, dealing with determination of these spectral characteristics tries to provide the spectral libraries for different objects. The first objective of this study was to prepare and investigate the significant differences between the spectral signature of the most important forest tree species namely Beech (*Fagus orientalis*), Hornbeam (*Carpinus betulus*), Alder (*Alnus subcordata*), Oak (*Quercus castaneifolia*) and Ironwood (*Parrotia persica*) of the northern forest of Iran. This was carried out using a full range spectrometer during the summer 2007. The second objective of this study was to discriminate the spectral signature of Beech (*Fagus orientalis*) in three elevational sites (low, middle and high altitude). A total of 642 leaf 'pile' spectral curves of illuminated and shaded leaves were acquired of 107 trees of the mentioned species in altitude gradients between 250 and 2200m (asl.) under a clear and cloudless sky. Following the measurements, chlorophyll and nitrogen of the same leaf were extracted in laboratory. After quality control and noise remove, the spectral fingerprint of the species was prepared along 350-2500 nm. In order to investigate the spectral reflectance differences, five important vegetation indices related to leaf chlorophyll and nitrogen content were calculated and statistically analyzed. Also in order to investigate the species separability and to define the best wavelength for this aim, the partial least square (PLS) analysis was used. We conclude that ANCB has the most relation ( $r=0.60-0.81$ ) with nitrogen content in comparison with the other indices. The value of vegetation indices of illuminated leaves was more than shaded leaves; it was significantly different in Beech, Hornbeam and Ironwood. This result has been proved by statistical results obtained by chlorophyll and nitrogen data in lab. The results showed that the sensitivity of all indices is not similar for any range of chlorophyll and nitrogen content. Based on robust sensitivity of ANCB index to nitrogen content we could surely justify about the spectral differences between species by this index. Based on the PLS result it proved that by interring nitrogen variable the ability to discriminate species has been increased. This results showed that there was the most distinct separation between Ironwood and both Alder and Oak, although there was a strong similarity between Beech and Hornbeam. The result obtained by PLS regression showed that there was a distinct separability between Beech leaves at highest elevation than either the mid or low elevation sites. Based on the result obtained by using vegetation indices and PLS regression, we could conclude that the best wavelength region for spectral separability of species is in red edge region.

**Key words:** Field Spectroradiometry, Spectral fingerprint (library), Vegetation indices, Chlorophyll and nitrogen content, PLS regression, Caspian forest tree species.



University of Tehran  
College of Agriculture and Natural Resources  
Faculty of Natural Resources  
Department of Forestry and Forest Economic

Investigation of the spectral signature of forest species leaf: *Fagus orientalis*, *Quercus castaneifolia*, *Carpinus betulus*, *Alnus subcordata*, *Parotia persica* using field spectroradiometry

By:  
Mozhgan Abbasi

Under supervision of:  
Dr. A.A. Darvishsefat  
Prof. M. Schaepman

A thesis submitted to the graduate studies office in partial fulfillment of  
the requirements for the degree of Ph. D. in  
Forestry and Forest Economic

September 2009