


## Original Article

Iranian Remote Sensing & GIS  
Journal of

# Sensitivity Analysis of the Spectral Response of the Plant Leaf to the Biophysical-Biochemical Variables Using the PROSPECT Radiative Transfer Model

Elahe Akbari<sup>1</sup>, Mohammad Hajeb<sup>2</sup>, Mehrdad Jeihouni<sup>3</sup>, Saeed Hamze<sup>4\*</sup> 

## Affiliation

1. Assistant Professor, Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
2. Remote Sensing and GIS Center, Department of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
4. Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

## ABSTRACT

**Background and aim:** Determining how the leaf biochemical content affects its reflectance and spectral behavior through remote sensing can contribute to understanding the ecosystem process and its parameters, such as plant water stress. The optical properties of the canopy are strongly dependent on the optical properties of the leaves and the soil. Also, due to the non-availability of detailed information on the optical properties of leaves, the interpretation of spectral data collected through remote sensing has faced limitations. The internal structure of the leaf controls the amount of reflectance and transmission in the entire electromagnetic spectrum, but physical models have been developed to obtain detailed information and a comprehensive description of the optical properties of the leaf. In addition to calculating the leaf's spectral response, reversible models such as PROSPECT can calculate a small number of internal characteristics of the leaf, such as the amount of chlorophyll, leaf water content, and leaf structure. Using the reversibility property, it is possible to quantitatively determine the amount of water in the leaves and a small amount of biomass from the spectrum collected through the sensors. Therefore, the use of these models and their integration with remote sensing data, which are non-destructive for the plant and provide the possibility of monitoring in time and space, can open the way for studies and modeling related to the internal characteristics of plant leaves.

**Materials and methods:** In this research, the effect of leaf biophysical-biochemical variables, including leaf chlorophyll content (LCC), leaf structure, and leaf water content on reflectance, were quantitatively analyzed. To do so, the PROSPECT leaf radiative transfer model, which was developed to simulate the spectral behavior of plant leaves, was used. As a result, the effect of the quantity of leaf parameters, including chlorophyll, leaf water content, and leaf structure, on the shape of the spectral curve of the leaf has been investigated. The study employed two other parameters considered constant to study the effects caused by each parameter. By changing the value of the desired parameter, the spectral curves corresponding to the selected values are extracted using the PROSPECT model. The effect of the desired parameter on the leaf's spectral reflectance was investigated by comparing and analyzing the resulting curves.

**Results and discussion:** The research results indicate that the increase of leaf chlorophyll with the effect of reducing the reflectance leads to the rise in triangular plant indices. Based on the leaf structure and inner layers in the near-infrared (NIR) spectrum, it is possible to distinguish monocots, dicots, and old plants. Also, in the NIR spectrum, the amount of reflectance in old, dicotyledonous, and monocots decreases, respectively. In dicots with spongy parenchyma, more reflectance is expected in the NIR spectrum than in monocots. Monocots can be distinguished from other plants due to their lower reflectance in the 1400 to 1900 nm range. The influence of water content on leaf spectral reflectance starts from the wavelength of 1000 nm and continues until the end of the reflective range, 2500 nm, and with the increase of water content, the reflectance decreases. The drying of the plant does not have much effect on the reflectance, but drying more than a certain amount of leaf water content (0.03 to 0.04  $g/cm^2$ ) causes a significant increase in the reflectance, especially outside the water-absorbing bands. Therefore, finding the critical points of the reflectance curve against the water content can help detect severe water stress in plants. By examining the graphs, we can see that the critical point occurs around the leaf water content of 0.03 to 0.04  $g/cm^2$ .

**Conclusion:** Finding the critical points of the reflectance curve against leaf water content can be used to detect severe water stress in plants. In the PROSPECT model, the effect of the ground soil on the spectral reflectance of plants is not considered. Thus, it is suggested that models such as SAIL and SLC be used, which have been improved for this purpose. Also, considering that the PROSPECT model output is the plant's leaf spectral curve, canopy radiative transfer models such as the SAIL and SLC can also be employed.

**Keywords:** PROSPECT, Radiative transfer model, Leaf chlorophyll content, Leaf structure, Leaf water content, Remote sensing.

**Citation:** Akbari, E., Hajeb, M., Jeihouni, M., Hamze, S., Sensitivity Analysis of the Spectral Response of the Plant Leaf to the Biophysical-Biochemical Variables Using the PROSPECT Radiative Transfer Model, *Iran J Remote Sens GIS*, 16(4):17-33.

\* Corresponding Author: saeid.hamzeh@ut.ac.ir  
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2023.103728>

Received: 2023.01.14  
Accepted: 2023.07.22





# تحلیل حساسیت رفتار طیفی برگ گیاه در برابر متغیرهای بیوفیزیکی- بیوشیمیایی برگ با استفاده از مدل انتقال تابش PROSPECT

الهه اکبری<sup>۱</sup>، محمد حاجب<sup>۲</sup>، مهرداد جیهونی<sup>۲</sup>، سعید حمزه<sup>۳\*</sup>

## سمت

## چکیده

**سابقه و هدف:** تعیین نحوه اثرگذاری محتوای بیوشیمیایی برگ در بازتاب و رفتار طیفی آن، از طریق سنجش از دور، می‌تواند به درک فرایند اکوسیستم و پارامترهای آن، همچون تنش آبی گیاه، کمک شایان توجهی کند. ویژگی‌های نوری تاج‌پوشش بسیار تحت تأثیر ویژگی‌های نوری برگ‌ها و خاک زمینه است. همچنین به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات دقیق درباره ویژگی‌های نوری برگ‌ها، تفسیر اطلاعات طیفی را که از طریق سنجش از دور گرد می‌آیند، با محدودیت‌هایی روبه‌رو کرده است. ساختار داخلی برگ میزان انعکاس و عبور را در کل طیف الکترومغناطیس، کنترل می‌کند اما، برای کسب اطلاعات دقیق و توصیف جامع درباره ویژگی‌های نوری برگ، مدل‌های فیزیکی توسعه یافته‌اند. مدل‌های برگ‌گشت‌پذیر همانند PROSPECT علاوه بر محاسبه پاسخ طیفی برگ، امکان محاسبه مقدار کمی ویژگی‌های درونی برگ، مانند میزان کلروفیل، محتوای آب و ساختار برگ را فراهم می‌کنند. با استفاده از ویژگی برگ‌گشت‌پذیری، می‌توان بر اساس طیف جمع‌آوری شده از طریق سنجنده‌ها، کمیت آب برگ‌ها و زیست‌توده آنها را مشخص کرد. بنابراین استفاده از این مدل‌ها و تلفیق آن با داده‌های دورسنجی که برای گیاه غیرتخریبی است، امکان پایش در بُعد زمان و مکان را فراهم می‌آورد و می‌تواند راه‌گشای مطالعات و مدل‌سازی‌های مرتبط با ویژگی‌های درونی برگ گیاهان باشد.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش، اثر کمی متغیرهای بیوفیزیکی- بیوشیمیایی برگ شامل محتوای کلروفیل برگ، ساختار برگ و محتوای آب آن در میزان بازتاب تحلیل شده است. برای این منظور، مدل انتقال تابش PROSPECT که برای شبیه‌سازی رفتار طیفی برگ گیاهان توسعه داده شده، به کار رفته است. در نتیجه، تأثیر کمیت پارامترهای برگ شامل کلروفیل، محتوای آب و ساختار برگ در شکل منحنی طیفی برگ بررسی شده است. روش کار بدین ترتیب است که به منظور مطالعه تأثیرات ناشی از هر یک از پارامترها، دو پارامتر دیگر ثابت در نظر گرفته می‌شوند و با تغییر مقدار پارامتر مورد نظر، منحنی‌های طیفی متناظر با مقادیر انتخاب شده، با به‌کارگیری مدل PROSPECT استخراج می‌شود. با مقایسه منحنی‌های حاصل و تحلیل آنها، تأثیر پارامتر مورد نظر در بازتاب طیفی برگ مطالعه و بررسی می‌شود.

**نتایج و بحث:** نتایج تحقیق حاکی از آن است که افزایش کلروفیل، با اثر در کاهش انعکاس، به افزایش میزان شاخص‌های گیاهی مثلثی منجر می‌شود. بر اساس ساختار برگ و لایه‌های داخلی، در محدوده فرسوخ نزدیک، امکان تشخیص گیاهان تک‌لپه‌ای، دولپه‌ای و نیز گیاهان پیر وجود دارد. همچنین در محدوده فرسوخ نزدیک، میزان انعکاس در گیاهان پیر، گیاهان دولپه‌ای و تک‌لپه‌ای به ترتیب کاهش می‌یابد. در محدوده فرسوخ نزدیک، در گیاهان دولپه‌ای که دارای پارانثیم اسفنجی‌اند، بیشتر از گیاهان تک‌لپه‌ای انتظار بازتاب می‌رود. گیاهان تک‌لپه‌ای، به دلیل بازتاب کمترشان در محدوده ۱۴۰۰ تا ۱۹۰۰ نانومتر، از سایر گیاهان تفکیک‌پذیرند. اثرگذاری محتوای آب در بازتاب طیفی برگ از طول موج ۱۰۰۰ نانومتر آغاز می‌شود و تا پایان محدوده انعکاسی، ۲۵۰۰ نانومتر، ادامه دارد و با افزایش محتوای آب، کاهش بازتاب رخ می‌دهد. خشک‌شدن گیاه، تا مرحله، تأثیر چندانی در بازتاب ندارد ولی خشکیدن آب برگ، بیشتر از مقداری معین (۰/۰۳ تا ۰/۰۴ گرم بر سانتی‌متر مربع) باعث افزایش چشمگیر بازتاب، به‌ویژه خارج از باندهای جذبی آب می‌شود. بنابراین با پیداکردن نقاط بحرانی منحنی بازتاب در مقابل محتوای آب می‌توان به تشخیص تنش‌های شدید آبی در گیاهان کمک کرد. با بررسی نمودارها می‌توان پی برد که نقطه بحرانی در حوالی محتوای آب ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ گرم بر سانتی‌متر مربع اتفاق می‌افتد.

**نتیجه‌گیری:** با یافتن نقاط بحرانی منحنی بازتاب در مقابل محتوای آب، می‌توان تنش‌های شدید آبی در گیاهان را تشخیص داد. در مدل PROSPECT، اثر خاک زمینه در بازتاب طیفی گیاهان در نظر گرفته نمی‌شود؛ بنابراین استفاده از مدل‌هایی مانند SAIL و SLC پیشنهاد می‌شود که برای این منظور ارتقا یافته‌اند. همچنین با توجه به اینکه خروجی مدل PROSPECT منحنی طیفی برگ گیاه است، می‌توان استفاده از مدل‌های انتقال تابش تاج‌پوشش گیاه، مانند مدل SAIL و SLC را نیز بررسی کرد.

**کلیدواژه‌ها:** مدل انتقال تابش، محتوای کلروفیل برگ، ساختار برگ، محتوای آب برگ، PROSPECT.

۱. استادیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
۲. مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. استادیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۴. دانشیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

**استناد:** اکبری، ا.، حاجب، م.، جیهونی، م.، حمزه، س.، تحلیل حساسیت رفتار طیفی برگ گیاه در برابر متغیرهای بیوفیزیکی- بیوشیمیایی برگ با استفاده از مدل انتقال تابش PROSPECT. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳: ۱۴-۳۳.



## ۱- مقدمه

سنجش از دور روشی قدرتمند و مؤثر برای پایش وضعیت، رشد و پارامترهای بیوفیزیکی گیاه است که می‌تواند، در تکمیل مطالعات محیطی مبتنی بر اندازه‌گیری میدانی، نقش شایان توجهی داشته باشد (Hunter et al., 2010; Jiang et al., 2012; Akbari et al., 2023). ویژگی‌های نوری تاج‌پوشش<sup>۱</sup> بسیار تحت تأثیر ویژگی‌های نوری برگ‌ها و خاک زمینه است. همچنین به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات دقیق درباره ویژگی‌های نوری برگ‌ها، تفسیر اطلاعات طیفی که از طریق سنجش از دور جمع‌آوری می‌شوند با محدودیت‌هایی روبه‌رو شده است. طیف الکترومغناطیس، بر اثر برخورد با برگ‌های گیاهان، بر مبنای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی برگ‌ها دچار سه حالت متفاوت انعکاس، عبور و جذب می‌شود. در اساس، جذب تابعی از تغییرات در اسپین و زاویه لحظه‌ای الکترون‌هاست که علت آن جابه‌جایی بین سطوح اوربیتال‌های الکترونی در اتمی مشخص (در ناحیه مرئی از طریق کلروفیل‌های a و b، کاروتنوئیدها و رنگ‌دانه‌های قهوه‌ای یا سایر رنگ‌دانه‌های برگ) و ارتعاش‌های دورانی در مولکول‌های چنداتمی (در ناحیه فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ میانی از طریق آب) است (Hodanova, 1985; Alavipanah, 2011). اختلاف در ضریب شکست بخش‌های گوناگون برگ (۱/۴ برای دیواره‌های سلولی آب‌پوشی‌شده، ۱/۳۳ برای آب و ۱ برای هوا) باعث پراکنش امواج الکترومغناطیس می‌شود (Woolley, 1971; Gausman et al., 1974). بنابراین ساختار داخلی برگ میزان انعکاس و عبور را در کل طیف الکترومغناطیس، کنترل می‌کند اما این پدیده زمانی واضح است که میزان جذب اندک باشد؛ در نواحی فرورسرخ نزدیک، امکان برخورد به این حالت وجود دارد.

برای کسب اطلاعات دقیق و توصیف جامع درباره ویژگی‌های نوری برگ، مدل‌هایی فیزیکی توسعه یافته‌اند. مدل‌های فیزیکی ویژگی‌های نوری برگ دو

دسته می‌شوند. مدل‌های توصیفی که نمایشی پیچیده از مکانیسم‌ها را نشان می‌دهند و شامل ردیابی اشعه و روش مارکوف است (Jacquemoud & Ustin, 2001). این روش‌ها، علاوه بر نیاز به پارامترهای ورودی زیاد، برگشت‌پذیری ندارند. در مقابل، مدل‌های برگشت‌پذیر مثل مدل‌های انتقال تابشی از پارامترهایی بهره می‌برند که از داده‌های دورسنجی به دست می‌آیند. این گونه مدل‌ها که مدل‌های غیرتخریبی اندازه‌گیری ویژگی‌های درونی برگ نامیده می‌شوند، از گذشته متداول بوده است. مدل‌های برگشت‌پذیر همچون PROSPECT، علاوه بر محاسبه پاسخ طیفی برگ، امکان محاسبه کمیت ویژگی‌های درونی برگ مانند میزان کلروفیل، محتوای آب و ساختار برگ را دارند. با استفاده از ویژگی برگشت‌پذیری می‌توان، براساس طیف جمع‌آوری‌شده از طریق سنجنده‌ها، کمیت آب برگ‌ها و زیست‌توده آنها را مشخص کرد. بنابراین استفاده از این مدل‌ها و تلفیق آن با داده‌های دورسنجی که برای گیاه غیرتخریبی است و امکان پایش در بُعد زمان و مکان را فراهم می‌آورند، می‌تواند راه‌گشای مطالعات و مدل‌سازی‌های مرتبط با ویژگی‌های درونی برگ گیاهان باشد (Roberts et al., 2016).

مدل فیزیکی PROSPECT در مطالعات بسیاری، برای محاسبه تأثیرات ویژگی‌های نوری برگ در بازتاب طیفی و برعکس، به کار رفته است. ژاکمود و برت<sup>۲</sup> (۱۹۹۰) از مدل PROSPECT برای محاسبه تأثیر ویژگی‌های نوری برگ در بازتاب طیفی و معکوس آن بهره بردند. در این پژوهش، از گیاهان گوناگون (همچون ذرت، گندم، گوجه‌فرنگی، سویا و آفتاب‌گردان) پرورش‌یافته در گلخانه و نیز فضای آزاد (مانند افرا و بلوط) استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که این مدل هم در محاسبه پاسخ طیفی و هم در جهت معکوس، یعنی برآورد پارامترهای گیاهی، دقت بالایی (ضریب هبستگی ۰/۹۸) دارد. این مدل در

1. Canopy  
2. Jacquemoud & Baret

برگ و چگونگی پاسخ طیفی برگ به تغییرات در مقدار این پارامترها کمتر بررسی شده است. با توجه به خلأ مطالعاتی درباره مدل‌های فیزیکی انتقال تابشی در کشور و کارایی این قبیل مدل‌ها در برآورد ویژگی‌های بیوفیزیکی و نیاز آبی گیاهان در تلفیق با داده‌های ابرطیفی<sup>۱</sup>، این مطالعات می‌توانند در توسعه پایدار کشاورزی، نقش مؤثری داشته باشند. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر این است که با استفاده از شبیه‌سازی‌های مدل انتقال تابش PROSPECT، واکنش طیفی برگ گیاه در مقابل تغییرات متغیرهای بیوفیزیکی- بیوشیمیایی برگ، شامل ساختار و محتوای کلروفیل و محتوای آب برگ، بررسی و تحلیل شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدل PROSPECT

مدل PROSPECT از مدل‌های انتقال تابشی برای برگ‌های منفرد است (Jacquemoud & Baret, 1990). این مدل بر مبنای تعمیم «مدل صفحه‌ای» الین<sup>۱۰</sup> و همکاران (۱۹۶۹؛ ۱۹۷۰) است و ویژگی‌های نوری برگ‌های گیاه، در دامنه ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. در مدل صفحه‌ای، به صورت تئوری، برگ فشرده‌ی گیاه (بدون حفره‌های هوا) را به منزله صفحه‌ای شفاف، با لایه‌هایی که سطوحشان با هم موازی است، در نظر گرفته می‌شود. در واقع، فرض می‌شود که برگ از تعداد N صفحه فشرده و همگن تشکیل شده که با N-1 لایه هوا جدا شده‌اند. در برگ فشرده (N=1)، هیچ لایه هوایی وجود ندارد و فضاهای

برآورد میزان کلروفیل گیاهان نیز استفاده گسترده‌ای داشته است (Rivera et al., 2013; Ma et al., 2012; Zhang et al., 2008). یاروچینیسکا<sup>۱</sup> (۲۰۱۴) نیز، طی پژوهشی، از مدل PROSPECT برای مدل‌سازی بازتاب طیفی برگ‌ها در محیط مرتعی غیرهمگن استفاده کرد و نتایج با دقت بالایی (میانگین خطای مربعات ۰/۱) به دست آورد. وی بیان کرد، هرچه میزان زی‌توده و شاخص سطح برگ بیشتر باشد، دقت برآورد مدل بیشتر خواهد بود. وانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵) از این مدل برای برآورد میزان پروتئین و سلولز برگ بهره بردند و نتایج مورد قبولی (ضریب همبستگی ۰/۸۳) کسب کردند. علی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از معکوس این مدل، میزان ماده خشک و سطح ویژه برگ را بررسی کردند و به ضرایب همبستگی بیش از ۰/۸ دست یافتند. دشتی آهانگر<sup>۴</sup> و همکاران (2014) روش‌های عددی و جدول‌های مرجع در معکوس‌سازی مدل PROSAIL را مقایسه کردند. آنها، با استفاده از سنجنده AVNIR-2 روی برنج، به این نتیجه رسیدند که هر دو روش، در مورد تخمین پارامترهای گیاهی در سطح برگ، نامناسب است. پورقاسمی<sup>۵</sup> و همکاران (2021)، بر اساس مدل PROSPECT4، شبیه‌سازی بازتاب طیفی و تخمین کلروفیل و رطوبت برگ بنه<sup>۶</sup> را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که ترکیب مدل‌های انتقال تابشی با روش‌های رگرسیونی مانند PLS قدرت بسیاری در پیش‌بینی پارامترهای گیاهی دارند. کیو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۹) کلروفیل برگ را با استفاده از مدل PROSPECT محاسبه کردند و به ضریب همبستگی ۰/۸۸ دست یافتند. جانگ<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، با استفاده از مدل ارتقایافته PROSPECT، کلروفیل، کاروتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها را در مورد برگ گیاه به دست آوردند و به قابلیت مدل در ارزیابی این پارامترها، از طریق سنجش از دور، اشاره کردند.

در پژوهش‌های انجام‌شده تا کنون، بیشتر از معکوس این مدل برای برآورد میزان کلروفیل و زی‌توده استفاده شده و محدوده‌های جذبی هریک از پارامترهای

1. Jarocińska
2. Wang
3. Ali
4. Dashti Ahangar
5. Poorghasemi
6. *Pistacia Mutica*
7. Qiu
8. Zhang
9. Hyperspectral
10. Allen

$$\rho_{\alpha} = [1 - t_{av}(\alpha, n)] + \frac{t_{av}(90, n)t_{av}(\alpha, n)\theta^2[n^2 - t_{av}(90, n)]}{n^4 - \theta^2[n^2 - t_{av}(90, n)]^2}$$

رابطه (۱)

$$\tau_{\alpha} = \frac{t_{av}(90, n)t_{av}(\alpha, n)\theta^2 n^2}{n^4 - \theta^2[n^2 - t_{av}(90, n)]^2}$$

رابطه (۲)

$\alpha$  برابر بیشینه زاویه برخورد،  $n$  برابر با ضریب شکست و  $\Theta$  برابر با ضریب گذردهی صفحه است. براساس معادلات (۱) و (۲)، می توان بیان کرد:

$$\rho_{\alpha} = x\rho_{90} + y$$

رابطه (۳)

$$\tau_{\alpha} = x\tau_{90}$$

رابطه (۴)  
که

$$x = t_{av}(\alpha, n) / t_{av}(90, n)$$

رابطه (۵)

$$y = x(t_{av}(90, n) - 1) + 1 - t_{av}(\alpha, n)$$

رابطه (۶)

مدل صفحه‌ای دارای سه پارامتر ورودی  $\alpha$ ،  $n$  و  $\Theta$  است اما، چون این مدل را نمی توان در گیاهان دولپه‌ای (که دارای بافت اسفنجی چندلایه‌اند) و برگ‌های مسن با ساختار پیچیده به کار برد؛ بنابراین بر مبنای روش مطرح شده از سوی استوک، می توان پارامتر  $N$  را برای انواع برگ‌ها تعیین کرد. به کارگیری قانون استوک این گونه است که ابتدا اولین لایه نور را با بیشینه زاویه برخورد می کنیم، زیرا اولین لایه نور را با بیشینه زاویه برخورد دریافت می کند. فرض آن است که انتشار نور، در داخل برگ، همگراست و اگر  $\rho_{90}$  میزان انعکاس و  $\tau_{90}$  بیانگر گذردهی اولین لایه باشد، میزان کل بازتاب و گذردهی برای  $N$  لایه طبق رابطه‌های (۷) و (۸) به دست می آید.

$$R_{N, \alpha} = \rho_a + \frac{\tau_{\alpha} \tau_{90} R_{N-1, 90}}{1 - \rho_{90} R_{N-1, 90}}$$

رابطه (۷)

$$T_{N, \alpha} = \frac{\tau_{\alpha} T_{N-1, 90}}{1 - \rho_{90} R_{N-1, 90}}$$

رابطه (۸)

بین بافت مزوفیل اشباع از آب است. راه حل این مشکل را استوکس<sup>۱</sup> (۱۸۶۲) مطرح کرده بود. طبق این فرض، فضای گسسته را می توان به صورت فضایی پیوسته در نظر گرفت؛ به صورتی که  $N$  ممکن است عدد صحیح نباشد و اعداد اعشاری را هم شامل شود.

مقدار  $N$  براساس آرایش سلولی درون برگ تعیین می شود؛ این آرایش، در میان گونه‌های گیاهی، متفاوت است. مقدار  $N$ ، در عمل، از طریق نسبت میانگین ضریب پراکنش برگ در محدوده ۷۰۰ تا ۱۰۵۰ نانومتر به ضریب پراکنش برگ مرکبات بشاش (به‌منزله استاندارد)، در همین دامنه، سنجیده می شود. مقدار  $N$ ، در مورد گیاهان تک‌لپه‌ای با ساختار مزوفیل فشرده، بین ۱ تا ۱/۵ است. گونه‌های دولپه‌ای، با بافت پارانسیم اسفنجی و حفره‌های هوا، مقدار  $N$  بین ۱/۵ تا ۲/۵ دارند. مقادیر بالای ۲/۵ برای برگ‌های مسن با ساختار به هم ریخته در نظر گرفته می شود (Jacquemoud & Baret, 1990).

ضریب گذردهی مدل صفحه‌ای با ضریب جذب ویژه اجزای برگ مرتبط است. ویژگی‌های جذبی آب و رنگ‌دانه‌ها تفکیک پذیرند و می توان آنها را به صورت مستقل توصیف کرد. ضریب جذب ویژه آب و ضریب جذب ویژه رنگ‌دانه‌ها را می توان به صورت تجربی اندازه‌گیری کرد. شکل رایج مدل PROSPECT به صورت زیر است:

$$\text{PROSPECT} = [\text{انعکاس و گذردهی}]$$

(ساختار برگ، میزان کلروفیل برگ، میزان آب برگ)

بدین معنی که مدل PROSPECT مانند تابعی ویژگی‌های برگ، شامل میزان آب برگ، میزان کلروفیل و ساختار برگ را به‌منزله ورودی دریافت می کند و میزان انعکاس و گذردهی برگ در دامنه طیفی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر را به‌منزله خروجی به کاربر می دهد. مقدار کل بازتاب و عبور برای هر طول موج طبق معادلات (۱) و (۲) حاصل می شود (Jacquemoud & Baret, 1990):

برای رنگ‌دانه‌های برگ (کلروفیل) ( $C_{ab}$ ) و آب ( $C_w$ ) محاسبه و برای هر یک بازنویسی می‌شود. در نهایت، PROSPECT امکان محاسبه بازتاب و عبور در دامنه ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر را با استفاده از سه پارامتر ورودی، پارامتر ساختار مزوفیل ( $N$ )، میزان کلروفیل و آب برگ (جدول ۱)، در حالت‌های گوناگون فراهم می‌کند. همچنین با معکوس‌سازی آن می‌توان، از بازتاب طیفی، به مقادیر این اجزا در داخل برگ نیز پی برد.

جدول ۱. پارامترهای ورودی برای مدل PROSPECT در سطح برگ

نماد	پارامتر
$C_{ab}$	میزان کلروفیل (میکروگرم بر سانتی‌متر مربع)
$N$	پارامتر ساختار برگ
$C_w$	میزان آب (گرم بر سانتی‌متر مربع)
$C_{dm}$	مقدار ماده خشک (گرم بر سانتی‌متر مربع)
$C_s$	فاکتور پیری (-)

## ۲-۲- روش کار

در این تحقیق، مدل PROSPECT برای بررسی تأثیر کمیت پارامترهای برگ شامل کلروفیل، محتوای آب و ساختار برگ، در شکل منحنی طیفی برگ به کار می‌رود و تأثیر هر یک از پارامترهای برشمرده به‌طور جداگانه بررسی می‌شود. روش کار بدین ترتیب است که برای مطالعه تأثیرات هر یک از پارامترها، دو پارامتر دیگر ثابت در نظر گرفته می‌شوند و با تغییر مقدار پارامتر مورد نظر، منحنی‌های طیفی متناظر با مقادیر انتخاب‌شده، با به‌کارگیری مدل PROSPECT استخراج می‌شود. با مقایسه منحنی‌های حاصل و تحلیل آنها، تأثیر پارامتر مورد نظر در بازتاب طیفی برگ مطالعه و بررسی می‌شود. شکل ۱ شیوه کار در تحقیق حاضر را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.

دامنه مقادیر پارامترهای مورد نظر در مدل PROSPECT در جدول ۲ آورده شده‌اند. این دامنه مقادیر براساس محدوده مجاز برای هر پارامتر که در مدل PROSPECT تعیین شده است، انتخاب شده‌اند. ستون سوم این جدول مقدار نرمال در نظر گرفته‌شده

در گام بعدی، کمینه‌سازی  $\alpha\rho$  و  $\alpha\tau$  بر مبنای معادلات (۳) و (۴) انجام می‌شود که حاصل آن معادلات (۹) و (۱۰) است.

$$R_{N,\alpha} = xR_{N,90} + y \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$T_{N,\alpha} = xT_{N,90} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

مقادیر  $x$  و  $y$  براساس معادلات (۵) و (۶) مشخص شده‌اند. به‌منظور تبدیل ساختار ناهمگن برگ به ساختار همگن استوک (۱۸۶۲)، از رابطه (۱۱) استفاده می‌کنیم.

$$\frac{R_{N,90}}{b_{90}^N - b_{90}^{-N}} = \frac{T_{N,90}}{a_{90} - a_{90}^{-1}} = \frac{1}{a_{90}b_{90}^N - a_{90}^{-1}b_{90}^{-N}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که در آن

$$a_{90} = (1 + \rho_{90}^2 - \tau_{90}^2 - \delta_{90}) / (2\rho_{90}) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$b_{90} = (1 + \rho_{90}^2 - \tau_{90}^2 - \delta_{90}) / (2\tau_{90}) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\delta_{90} = \sqrt{(\tau_{90}^2 - \rho_{90}^2 - 1)^2 - 4\rho_{90}^2} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در نهایت، با داشتن پارامترهای  $\alpha$ ،  $n$ ،  $\Theta$  و  $\Theta$  می‌توانیم پاسخ طیفی را به دست آوریم.

مقدار  $N$  میزان پارامتر به ساختار برگ باز می‌گردد. مقادیر  $\alpha$  و  $n$ ، نشان دهنده زاویه برخورد تابش و ضریب شکست است، عبارت است از  $\alpha = 59$  (Jacquemoud & Baret, 1990) و  $n = 1/4$  (Baret, 1990). مقدار پارامتر  $\Theta$  بیانگر میزان جذب ویژه رنگ‌دانه‌ها و آب است و طبق معادله (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$\theta - (1 - k)e^{-k} - k^2 \int_k^\infty x^{-1} e^{-x} dx = 0 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

ضریب جذب طیفی به‌صورت معادله (۱۶) نوشته می‌شود

$$k(\lambda) = \sum k_i(\lambda)c_i \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

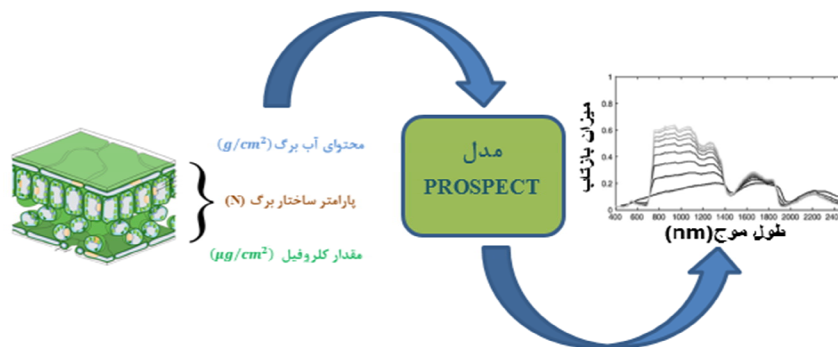
در این رابطه،  $\lambda$  برابر طول‌موج،  $K_i(\lambda)$  ضریب جذب ویژه مرتبط با جزء مورد بررسی برگ و  $C_i$  برابر مقداری از جزء مورد بررسی برگ در واحد سطح برگ است.  $i$

۱-۳- اثر میزان کلروفیل در رفتار طیفی برگ  
برای بررسی اثر میزان کلروفیل در این تحقیق، مقادیر ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شدند. این مقادیر با توجه به دامنه مقدار کلروفیل در هفت گونه گیاهی که در طراحی مدل PROSOECT به کار رفته‌اند، انتخاب شدند. در این مرحله، مقدار محتوای آب برابر با ۰/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مربع و پارامتر ساختار (N) برابر ۲ در نظر گرفته شد. شکل ۲ منحنی‌های طیفی حاصل از اجرای مدل PROSOECT را برای مقادیر متفاوت کلروفیل نشان می‌دهد. چنانکه در این منحنی‌ها مشاهده می‌شود، میزان بازتاب در بخش مرئی طیف الکترومغناطیس تحت تأثیر محتوای کلروفیل برگ قرار می‌گیرد. بدین ترتیب در تمامی طول‌موج‌های محدوده مرئی، با افزایش محتوای کلروفیل، کاهش بازتاب اتفاق می‌افتد. همچنین در طول‌موج‌های بلندتر از ۸۶۸ نانومتر (محدوده فرورسرخ نزدیک به بعد)، تغییرات میزان کلروفیل برگ تأثیری در بازتاب برگ ندارد. به‌عبارتی میزان کلروفیل برگ، با این بخش از طیف الکترومغناطیس، هیچ برهم‌کنشی ندارد.

برای هر پارامتر را نشان می‌دهد؛ بدین معنی که مثلاً برای بررسی اثر میزان کلروفیل، مقدار محتوای آب برابر با ۰/۰۵ ( $g/cm^2$ ) و پارامتر ساختار (N) برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود و با تغییر مقدار کلروفیل به مقادیر ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ ( $\mu g/cm^2$ )، تأثیر میزان کلروفیل در منحنی طیفی برگ ارزیابی می‌شود. شایان ذکر است که مقدار نرمال برای هر پارامتر، با توجه به بیشترین تکرار آنها در گونه‌های گیاهی (ذرت، گندم، گوجه‌فرنگی، سویا، آفتاب‌گردان، افرا و بلوط) که در طراحی مدل PROSOECT به کار رفته‌اند (Jacquemoud & Baret, 1990)، انتخاب شده است. مدل PROSOECT در محیط نرم‌افزار MATLAB اجرا شد.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای مدل بیان و تأثیر کمی هر یک از پارامترهای میزان کلروفیل برگ، ساختار برگ و محتوای آب تحلیل می‌شود.



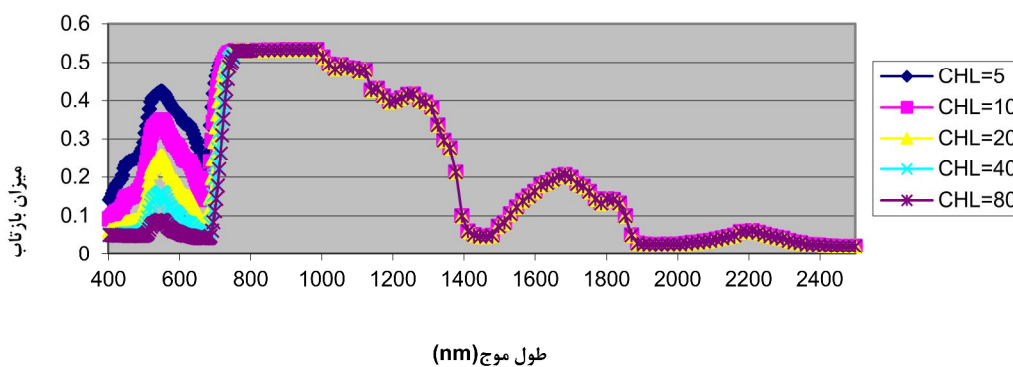
شکل ۱. شمای روش پیشنهادی. براساس پارامترهای ورودی مدل، میزان تغییرات بازتاب در طول موجهای مختلف بدست می‌آید.

جدول ۲. دامنه مقادیر پارامترها و مقدار ثابت در نظر گرفته شده برای آنها در مدل PROSOECT

مقدار نرمال	مقادیر	پارامتر
۴۰	۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰	میزان کلروفیل ( $\mu g/cm^2$ )
۲	۱، ۲، ۳، ۴ و ۵	پارامتر ساختار برگ
۰/۰۵	۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۹	محتوای آب ( $g/cm^2$ )

ناحیه ۶۷۲ نانومتری (قرمز) است. بنابراین تغییرات کلروفیل برگ در انعکاس (رنگ سبز) برگ تأثیر بسیاری دارد و با افزایش آن، انعکاس برگ بسیار کمتر می‌شود. در جدول ۳، طول موج دارای بیشترین و کمترین بازتاب به‌ازای مقادیر متفاوت کلروفیل، آورده شده است. مطابق داده‌های جدول ۳، مقدار بیشترین بازتاب به‌ازای تمامی مقادیر کلروفیل، در طول موج ۵۵۲ نانومتر رخ داده است اما، به‌علت تأثیر کاهنده شدیدتر کلروفیل در طول موج‌های بلندتر از سبز، برای مقادیر کلروفیل ۵، ۱۰ و ۲۰ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع در طول موج آبی (۴۰۴ نانومتر) و مقادیر کلروفیل ۴۰ و ۸۰ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع در طول موج قرمز (۶۶۸ و ۶۷۲ نانومتر) کمترین بازتاب رخ داده است.

در شکل ۳، ترکیب رنگی واقعی براساس میزان بازتاب در طول موج‌های آبی (۴۸۰ نانومتر)، سبز (۵۵۲ نانومتر) و قرمز (۶۷۲ نانومتر) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار کلروفیل، بازتاب در همه طول موج‌ها کاهش می‌یابد؛ این مسئله به تیره‌شدن رنگ گیاه مورد نظر می‌انجامد. با توجه به اینکه طول موج سبز دارای انعکاس غالب است، زمینه رنگ سبز در همه موارد حفظ شده است. با توجه به نمودار شکل ۲، در دو ناحیه ۵۵۲ نانومتر (سبز) و ۶۷۲ نانومتر (قرمز)، با افزایش میزان کلروفیل برگ، میزان انعکاس کاهش می‌یابد و این کاهش انعکاس در ناحیه ۵۵۲ نانومتری (سبز)، با افزایش کلروفیل، شدیدتر است و شیب کاهش آن بیشتر از



شکل ۲. منحنی‌های طیفی حاصل از اجرای مدل PROSOECT به‌ازای مقادیر متفاوت کلروفیل. نمودار فیروزه‌ای (CHL=40) حالت نرمال است



شکل ۳. ترکیب رنگی واقعی براساس میزان بازتاب در طول موج‌های آبی، سبز و قرمز

جدول ۳. طول موج با بیشترین و کمترین بازتاب، به‌ازای مقادیر متفاوت کلروفیل

		محتوای کلروفیل ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )				
		۸۰	۴۰	۲۰	۱۰	۵
محدوده						
مرئی	طول موج Min (nm)	۶۶۸	۶۷۲	۴۰۴	۴۰۴	۴۰۴
	طول موج Max (nm)	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲



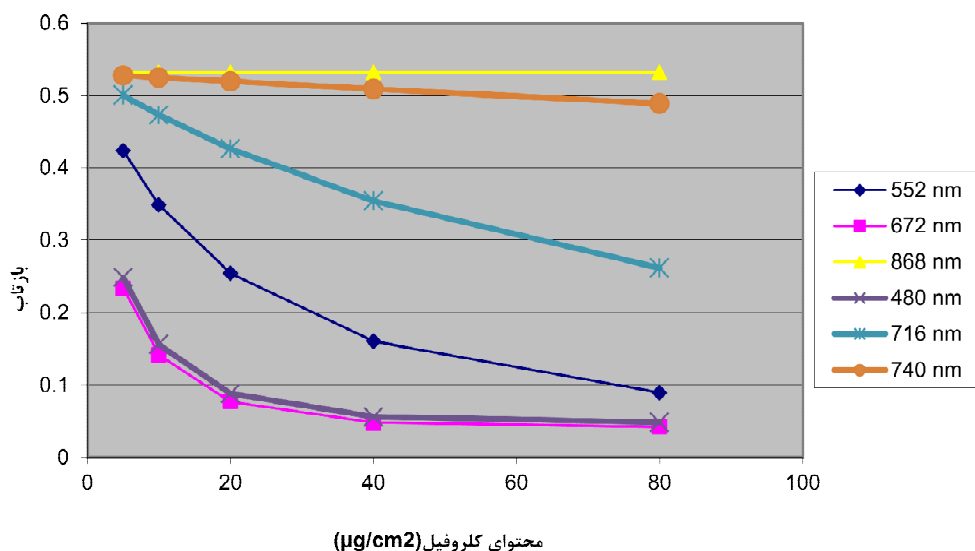
محتوای بالای کلروفیل به تغییرات اندکی در بازتاب منجر می‌شود. این نکات را می‌توان با توجه به شکل نمایی منحنی‌ها، به‌ویژه در طول موج‌های قرمز و آبی، استنباط کرد که در مقادیر اندک محتوای کلروفیل، دارای شیب بیشتر و در مقادیر بالا، دارای شیب کم‌ترند. آن‌گونه که مشخص است، بعد از طول موج‌های حدود ۷۱۶ نانومتر، منحنی‌ها از شکل نمایی به سمت خطی می‌روند و پس از آن، با افزایش طول موج، شیب خطوط نیز کم می‌شود؛ این مسئله بیانگر بی‌اثر شدن تغییرات در محتوای کلروفیل بر میزان بازتاب است.

### ۲-۳- اثر پارامتر ساختار برگ در رفتار طیفی آن

برای بررسی اثر پارامتر ساختار برگ، در این پژوهش مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ برای این پارامتر در نظر گرفته شدند. این مقادیر با توجه به دامنه مقدار پارامتر ساختار برگ در هفت گونه گیاهی انتخاب شد که در طراحی مدل PROSOECT به کار رفتند. در این مرحله، مقدار کلروفیل ۴۰ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع و مقدار محتوای آب ۰/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شد. شکل ۵ منحنی‌های طیفی حاصل از اجرای مدل

نکته دیگری که از منحنی‌های شکل ۲ استنباط می‌شود جابه‌جایی لبه قرمز به سمت طول موج‌های بلندتر است که با افزایش مقدار کلروفیل رخ می‌دهد. بر این مبنا، می‌توان به اساس کار شاخص‌های گیاهی مثلثی پی برد؛ بدین شرح که مساحت مثلثی که بین مقدار بازتاب در قله سبز و قرمز و فروسرخ نزدیک تشکیل می‌شود، با افزایش محتوای کلروفیل، افزایش می‌یابد.

در شکل ۴، رابطه مقدار کلروفیل برگ و میزان بازتاب آن برای طول موج‌های ۴۸۰، ۵۵۲، ۶۷۲، ۷۱۶، ۷۴۰ و ۸۶۸ نانومتر نشان داده شده است. رابطه معکوس بازتاب و مقدار کلروفیل، در محدوده مرئی، در این نمودار به وضوح مشاهده می‌شود. همچنین می‌توان حساسیت‌نداشتن میزان بازتاب به تغییرات در محتوای کلروفیل گیاه، ورای محدوده مرئی را در خط مربوط به طول موج ۸۶۸ نانومتر این گراف مشاهده کرد. با دقت در این منحنی‌ها، می‌توان دریافت که وقتی میزان کلروفیل کم باشد، حساسیت بازتاب به تغییرات در کلروفیل بیشتر است. به بیان دیگر، تغییرات اندک در نزدیکی محتوای پایین کلروفیل به تغییرات زیاد در بازتاب منجر می‌شود و برعکس، تغییرات پیرامون

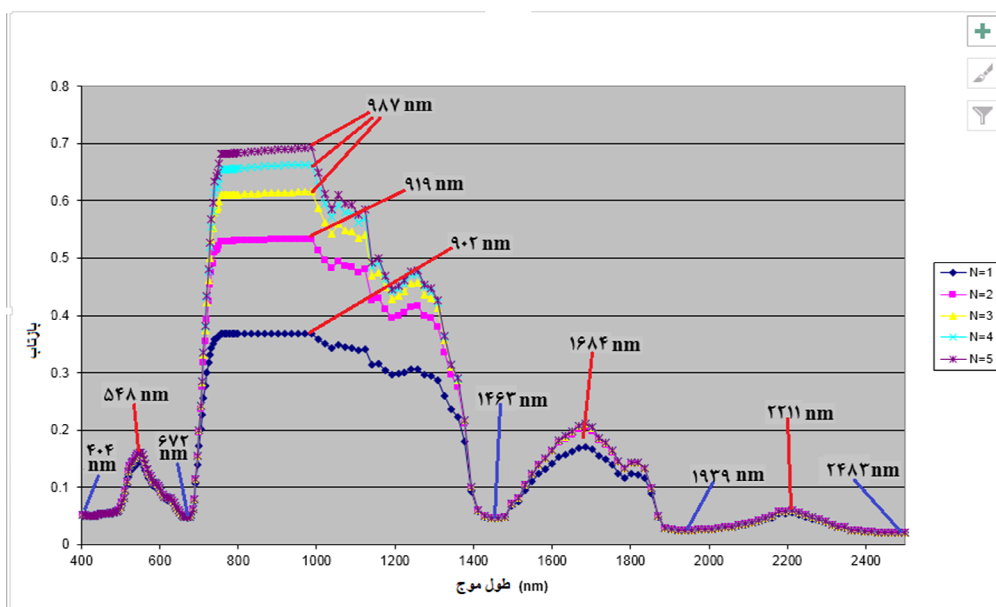


شکل ۴. رابطه مقدار کلروفیل برگ و میزان بازتاب آن

مقادیر پارامتر ساختار بالای ۲/۵ برای برگ‌های مسن با ساختار به هم ریخته در نظر گرفته می‌شود. هرچه ساختار برگ لایه‌های N بیشتری داشته باشد، به طبع لایه‌های هوای (N-1) بیشتری نیز دارد و بنابراین، در ناحیه فرسرخ نزدیک، بازتاب آن بیشتر و گذردهی امواج الکترومغناطیس آن کم می‌شود ( Jacquemoud & Baret, 1990). در محدوده SWIR I (۱۴۰۰ تا ۱۹۰۰ نانومتر)، افزایش انعکاس به صورت جزئی است و فقط می‌توان برگ‌های با پارامتر ساختار برابر با یک را از سایر برگ‌ها جدا کرد و بقیه طیف‌ها کاملاً روی یکدیگر منطبق‌اند. بنابراین در این محدوده، گیاهان تک‌لپه‌ای به دلیل بازتاب کمترشان، از سایر گیاهان تفکیک پذیرند.

نکته دریافتی دیگر از منحنی‌های شکل ۵ این است که با افزایش پارامتر N، طول موج با بیشترین بازتاب به سمت طول موج‌های بیشتر می‌رود. در جدول ۴، طول موج‌های دارای بیشترین و کمترین بازتاب، به‌ازای مقادیر متفاوت N در محدوده‌های گوناگون طیف الکترومغناطیس آورده شده است. این طول موج‌ها در شکل ۵ نیز مشخص شده‌اند.

PROSOECT برای مقادیر گوناگون پارامتر ساختار برگ را نشان می‌دهد. مهم‌ترین تأثیر پارامتر ساختار در محدوده فرسرخ نزدیک، ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر و به صورت رابطه مستقیم است؛ بدین معنی که با افزایش پارامتر، ساختار بازتاب نیز در همه طول موج‌های مذکور افزایش می‌یابد. البته تأثیرات جزئی در SWIR I (بین دو باند جذبی آب در ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر) و نیز اثری بسیار ناچیز در طول موج سبز مشاهده می‌شود. با توجه به منحنی‌های شکل ۵، با افزایش تعداد لایه‌ها (N)، میزان انعکاس در دو محدوده فرسرخ نزدیک و SWIR I افزایش می‌یابد. این افزایش، در ناحیه فرسرخ نزدیک، بسیار زیاد و ملموس است بدین ترتیب طیف‌ها تا حدودی از یکدیگر تمییز داده می‌شوند؛ به‌ویژه در محدوده ۷۲۰ تا ۹۹۰ نانومتر که به خوبی می‌توان گیاهان را از یکدیگر متمایز کرد. بنابراین امکان تشخیص گیاهان تک‌لپه‌ای و دولپه‌ای و همچنین گیاهان پیر وجود دارد زیرا برگ گیاهان تک‌لپه‌ای که فاقد پارانشیم اسفنجی‌اند، دارای لایه دارند و پارامتر ساختار برای آنها برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. در گونه‌های دولپه‌ای که دارای بافت پارانشیم اسفنجی و حفره‌های هوا هستند، مقدار N بین ۱/۵ تا ۲/۵ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵. منحنی‌های طیفی حاصل از اجرای مدل PROSOECT به‌ازای مقادیر متفاوت پارامتر ساختار برگ. نمودار بنفش (N=2) حالت نرمال است.

جدول ۴. طول موج‌های دارای بیشترین و کمترین بازتاب به‌ازای مقادیر متفاوت پارامتر ساختار برگ

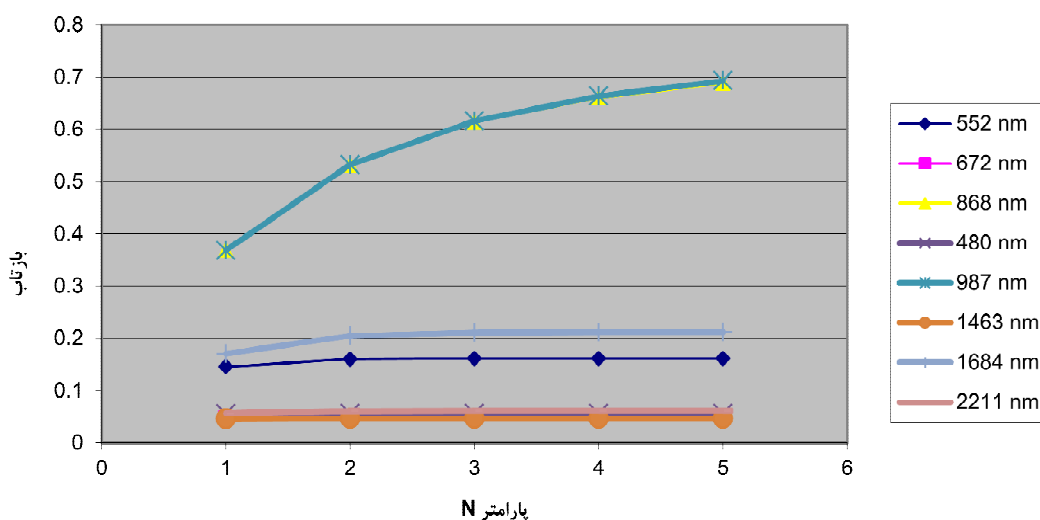
		پارامتر ساختار (N)				
		۵	۴	۳	۲	۱
محدوده						
مرئی	طول موج Min (nm)	۶۷۲	۶۷۲	۶۷۲	۶۷۲	۶۷۲
	طول موج Max (nm)	۵۴۸	۵۴۸	۵۴۸	۵۴۸	۵۴۸
فروسرخ نزدیک	طول موج Max (nm)	۹۸۷	۹۸۷	۹۸۷	۹۱۹	۹۰۲
فروسرخ میانی	طول موج Min (nm)	۲۴۸۳	۲۴۸۳	۲۴۸۳	۲۴۸۳	۲۴۸۳
	طول موج Max (nm)	۱۶۸۴	۱۶۸۴	۱۶۸۴	۱۶۸۴	۱۶۸۴

در شکل ۶، منحنی‌های دارای شکل لگاریتمی بیانگر طول موج‌های محدوده فرسرخ نزدیک با تأثیرگذاری بالا هستند و خطوط افقی به طول موج‌ها با تأثیرگذاری پایین اشاره دارند. با توجه به شیب هریک از منحنی‌ها (به‌ویژه، در طول موج‌های دارای تأثیرگذاری بالا) مشخص می‌شود که حساسیت بازتاب به تغییرات پارامتر ساختار، در محدوده مقادیر کم این پارامتر، بیشتر است و هرچه مقدار این پارامتر بیشتر می‌شود، تأثیرپذیری انعکاس از آن کاهش می‌یابد.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، در گیاهان پیر و بدون ساختار داخلی منسجم، انتظار انعکاس بیشتری در محدوده فرسرخ نزدیک می‌رود. در گیاهان دولپه‌ای که دارای پارانشیم اسفنجی‌اند نیز، در مقایسه با گیاهان تک‌لپه‌ای، می‌توان بازتاب بیشتری را در محدوده فرسرخ نزدیک انتظار داشت.

در شکل ۶، رابطه پارامتر ساختار برگ و میزان بازتاب آن برای طول موج‌های ۴۸۰، ۵۵۲، ۶۷۲، ۸۶۸، ۹۸۷، ۱۴۶۳، ۱۶۸۴ و ۲۲۱۱ نانومتر نشان داده شده است. رابطه مستقیم بازتاب و پارامتر ساختار در محدوده مرئی را در نمودارهای این شکل می‌توان به‌وضوح مشاهده کرد. مطابق این شکل، سه محدوده متفاوت اثرگذاری وجود دارد:

- محدوده بدون تأثیر: در طول موج‌های ۴۸۰، ۶۷۲، ۱۴۶۳ و ۲۲۱۱ نانومتر؛
- محدوده تأثیر کم: در طول موج‌های ۵۵۲ و ۱۶۸۴ نانومتر؛
- محدوده تأثیر زیاد: در طول موج‌های ۸۶۸ و ۹۸۷ نانومتر.



شکل ۶. رابطه پارامتر ساختار برگ و میزان بازتاب آن

مناطق انعکاسی، در زمینه شناسایی، عملکرد بهتری خواهند داشت.

هرچه مقدار آب داخل برگ بیشتر باشد، انعکاس برگ در مناطق جذبی و انعکاسی قوی کاهش می‌یابد و در حالت کلی، نمودار به پایین کشیده می‌شود. با افزایش میزان آب برگ، طیف الکترومغناطیس انعکاسی در محدوده ۹۸۷ تا ۲۴۰۰ نانومتر کاهش بسیار محسوسی می‌یابد. تفکیک گیاهان با محتوای آب متفاوت در نواحی دارای انعکاس قوی، در ۱۶۸۴ و ۲۲۱۱ نانومتر، بسیار آسان‌تر از تفکیک آنها در نواحی جذبی است.

نتیجه دیگری که از نمودارهای شکل ۷ حاصل می‌شود آن است که در گیاه با محتوای آب اندک، بازتاب در همه طول‌موج‌ها بیشتر از گیاه با محتوای آب بالاست و افزون‌براین نوسان منحنی آن نیز، در طول‌موج‌های بیشتر از ۱۰۰۰ نانومتر، بیشتر است. از این نکته می‌توان برای توسعه شاخص‌هایی به‌منظور مطالعه تنش‌های آبی گیاهان بهره برد.

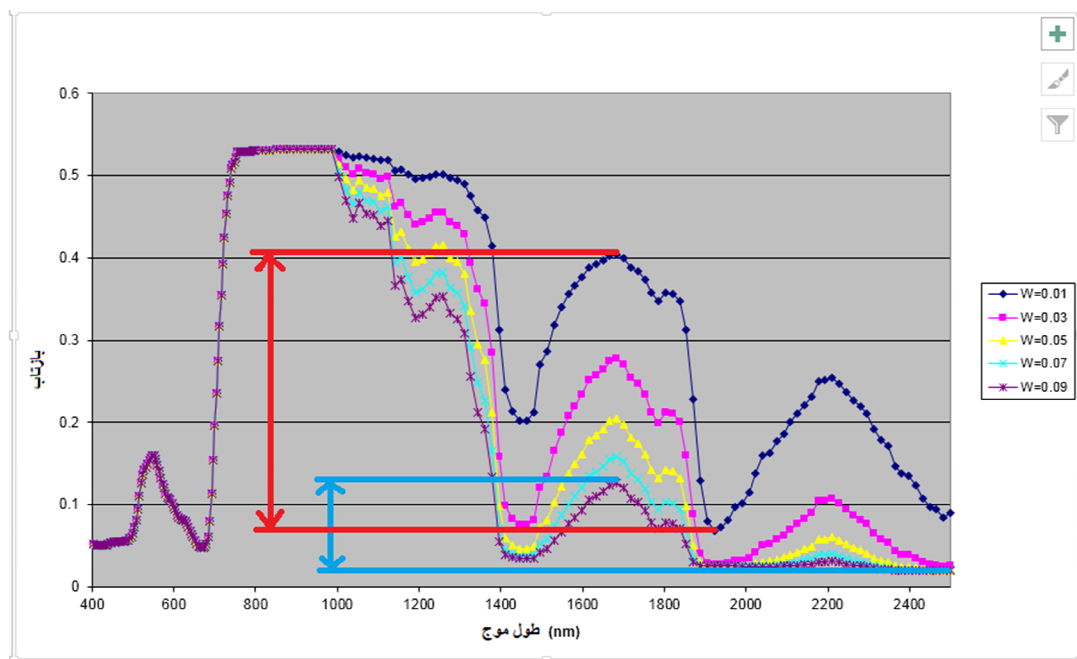
شکل ۸ رابطه محتوای آب برگ و میزان بازتاب آن در مورد طول‌موج‌های ۸۶۸، ۹۸۷، ۱۴۴۶، ۱۶۸۴، ۱۹۲۲ و ۲۲۱۱ نانومتر را نشان می‌دهد. رابطه معکوس بازتاب و محتوای آب گیاه، در این نمودار، به‌روشنی دیده می‌شود. البته باید توجه داشت که تأثیرپذیری انعکاس از محتوای آب، در طول‌موج‌های متفاوت، یکسان نیست. این نتیجه از مقایسه شیب کلی نمودارها، در طول‌موج‌های متفاوت، به دست می‌آید. شیب صفر نمودار طول‌موج‌های ۸۶۸ و ۹۷۸ نانومتر بیانگر تأثیرپذیرفتن انعکاس، در این طول‌موج‌ها، طی تغییرات محتوای آب است. همچنین شیب بیشتر دو باند جذبی آب، ۱۴۴۶ و ۲۲۱۱ نانومتر، اثرپذیری بیشتر این دو طول‌موج را در قیاس با دیگر طول‌موج‌ها نشان می‌دهد. کاهش بازتاب در محدوده ۱۶۸۴ نانومتر نیز بیشتر از همه است و شیب زیادتری دارد. از سویی، انعکاس در دو ناحیه ۱۴۴۶ و ۲۲۱۱ نانومتر، ابتدا در پی افزایش مقدار آب، کاهش شدیدی دارد اما رفته‌رفته

۳-۳- اثر میزان محتوای آب برگ در رفتار طیفی آن  
برای بررسی اثر محتوای آب برگ، در این پژوهش، مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۹ گرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شد. این مقادیر با توجه به دامنه مقدار محتوای آب در هفت گونه گیاهی که در طراحی مدل PROSOECT استفاده شد، انتخاب شدند. در این مرحله، مقدار کلروفیل برابر ۴۰ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع و پارامتر ساختار برابر ۲ در نظر گرفته شد. اثرگذاری محتوای آب گیاه در بازتاب طیفی آن از طول‌موج ۱۰۰۰ نانومتر آغاز و تا پایان محدوده انعکاسی، ۲۵۰۰ نانومتر، ادامه دارد. محتوای آب و میزان بازتاب رابطه‌ای معکوس دارند؛ بدین معنی که با افزایش محتوای آب، بازتاب کاهش می‌یابد. اما این کاهش در همه طول‌موج‌ها یکسان نیست بلکه در طول‌موج‌های جذبی آب، ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ و ۲۵۰۰ نانومتر، بیشتر از سایر طول‌موج‌ها رخ می‌دهد. شکل ۷ منحنی‌های طیفی حاصل از اجرای مدل PROSOECT برای مقادیر متفاوت محتوای آب را نشان می‌دهد. در این شکل، به‌وضوح مشاهده می‌شود که در بازتاب طیفی گیاهان با محتوای آب متفاوت، در محدوده ۴۰۰ تا ۹۸۷ نانومتر هیچ تفاوتی وجود ندارد و منحنی‌های طیفی کاملاً بر هم منطبق‌اند.

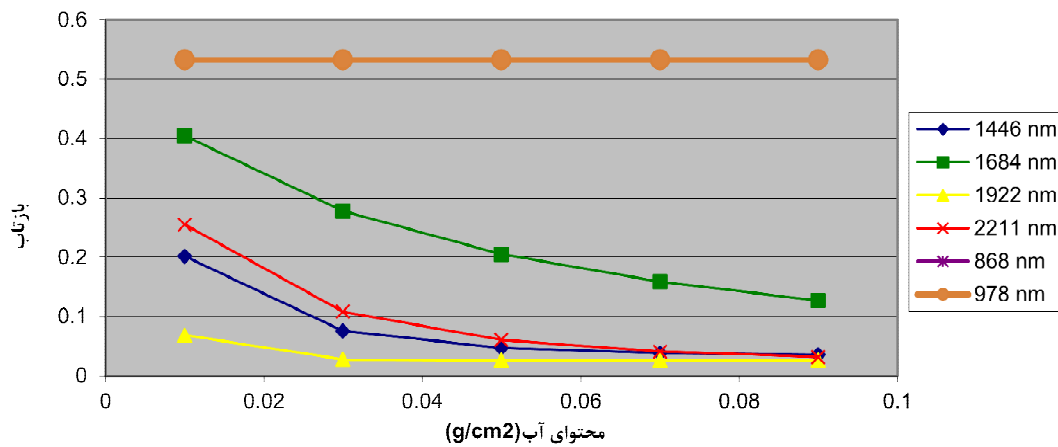
به‌طور کلی در امضای طیفی آب خالص (محدوده ۸۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر)، دو ناحیه جذب قوی در نزدیکی طول‌موج‌های ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر و دو ناحیه انعکاسی قوی در نزدیکی ۱۶۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر وجود دارند. در نمودار فوق هم دو ناحیه جذب قوی در محدوده ۱۴۴۶ و ۱۹۲۲ نانومتر و دو ناحیه انعکاسی قوی در ۱۶۸۴ و ۲۲۱۱ نانومتر دیده می‌شود که به‌وضوح نشان از تأثیر برهم‌کنش آب و طیف الکترومغناطیس دارد. بنابراین می‌توان بیان کرد مقدار آب برگ‌ها بازتاب طیفی را از ۹۸۷ نانومتر به بالاتر تحت تأثیر قرار می‌دهد و حداکثر اثرگذاری آن در چهار محدوده ۱۴۴۶ و ۱۹۲۲ نانومتر (نواحی جذب قوی) و ۱۶۸۴ و ۲۲۱۱ نانومتر (نواحی انعکاسی قوی) است؛ اما

این نکته مهم را می‌توان چنین تفسیر کرد که خشک شدن گیاه، تا مرحله‌ی، تأثیر چندانی در بازتاب ندارد اما خشکیدن بیشتر از مقداری معین باعث افزایش چشمگیر بازتاب، به ویژه خارج از باندهای جذبی آب می‌شود. از این رو با یافتن نقاط بحرانی منحنی بازتاب در مقابل محتوای آب، می‌توان تنش‌های شدید آبی در گیاهان را تشخیص داد. طبق نمودارها می‌توان پی برد این نقطه بحرانی با محتوای آب حدود  $0/03$  تا  $0/04$  گرم بر سانتی‌متر مربع ایجاد می‌شود؛ اینجا نقطه‌ای مرزی است که تغییرات بیشتر در محتوای آب تأثیر چندانی در بازتاب ندارد اما، در صورت رسیدن محتوای آب به کمتر از آن، شاهد تغییرات بسیاری در منحنی بازتاب خواهیم بود.

روند ثابتی را در پیش می‌گیرد و بدین ترتیب، پس از محتوای آب  $0/07$  گرم بر سانتی‌متر مربع، تغییرات محسوسی مشاهده نمی‌شود. درباره کاهش انعکاس در محدوده  $1922$  نانومتری می‌توان بیان کرد که روند کلی آن، با افزایش مقدار آب، کاهش است اما این کاهش بعد از  $0/03$  گرم بر سانتی‌متر مربع، روندی ثابت و بدون تغییر را طی می‌کند. به بیان دیگر، نقش میزان محتوای آب در بازتاب بسیار تعیین کننده است؛ اگر محتوای آب اندک باشد، حساسیت بسیار بیشتر از زمانی می‌شود که محتوای آب زیاد است. این نکته با توجه به شکل نمایی منحنی‌ها دریافت می‌شود زیرا، در بخش‌هایی که محتوای آب اندک است، شیب منحنی زیاد و در بخش‌های با محتوای آب بالا، شیب منحنی کم است.



شکل ۷. منحنی‌های طیفی حاصل از اجرای مدل PROSOECT به‌ازای مقادیر متفاوت محتوای آب برگ. تفاوت دامنه انعکاسی و جذب قوی در محدوده‌های  $1684$  و  $1922$  نانومتر، برای محتوای آب برگ  $0/01$  و  $0/09$   $g/cm^2$ ، به ترتیب با رنگ‌های قرمز و آبی نشان داده شده است. نمودار فیروزه‌ای ( $W=0.07$ ) بیانگر حالت نرمال است.



شکل ۸. رابطه محتوای آب برگ و میزان بازتاب آن

درمورد کارایی باندهای سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ باید گفته شود مراکز باندهای ۱۱ و ۱۲ این سنجنده نیز، به ترتیب، ۱۶۱۳ و ۲۲۰۲ نانومتر است و این باندها می‌توانند، در شناسایی و تفکیک مقدار آب برگ گیاهان، کارآمد باشند. نکته درخور توجه آن است که سنجنده مورد نظر نیز، همانند سنجنده OLI، قدرت تفکیک طیفی پایینی دارد و کارایی آن در تحلیل‌ها و بررسی‌های دقیق اندک است اما قدرت تفکیک مکانی آن بیشتر از سنجنده OLI است که نقطه قوت آن به شمار می‌رود و استفاده از آن می‌تواند ارجحیت نسبی داشته باشد.

در سنجنده‌های ابرطیفی مانند Hyperion و PRISMA، برای شناسایی و تفکیک ویژگی‌های برگ، به جای تک‌باند می‌توان از اطلاعات باندهای بیشتری در یک دامنه طیفی استفاده کرد. برای نمونه، با استفاده از سنجنده Hyperion، می‌توان در مطالعه کلروفیل برگ از باندهای ۸-۴۵ با دامنه طیفی ۴۲۷-۸۰۳ نانومتر، در مطالعه ساختار برگ از باندهای ۳۶-۵۷ و ۷۹-۱۱۹ با دامنه‌های طیفی ۷۱۲-۹۲۵ و ۹۹۳-۱۳۳۶ نانومتر، و در مطالعه محتوای آب برگ از باندهای ۸۶-۱۱۹، ۱۳۳-۱۶۴ و ۱۸۳-۲۲۰ با دامنه‌های طیفی ۱۰۰۳-۱۳۳۶، ۱۴۷۷-۱۷۹۰ و ۱۹۸۲-۲۳۵۵ نانومتر استفاده کرد.

#### ۴-۳- مقایسه تطبیقی با تصاویر سنجنده‌های چندطیفی و ابرطیفی

با مقایسه طول‌موج‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر و موقعیت باندهای ۶ و ۷ لندست ۸ سنجنده OLI، می‌توان گفت باند ۶ این سنجنده با دامنه طول‌موج ۱۵۶۶ تا ۱۶۵۱ نانومتر که منطقه انعکاسی قدرتمندی است، هم‌خوانی دارد و بنابراین می‌تواند، در شناسایی و تفکیک مقدار آب برگ گیاهان، سودمند باشد اما قدرت تفکیک مکانی و طیفی آن مانع انجام‌شدن تحلیل‌ها و بررسی‌های دقیق می‌شود و در اصل، برای این‌گونه مطالعات کارایی چندانی ندارد. از سویی، باند ۷ این سنجنده با طول‌موج ۲۲۰۰ نانومتر که منطقه انعکاسی دیگری است، هم‌خوانی دارد و میزان انعکاس آن کمتر از منطقه انعکاسی قبلی است. این منطقه انعکاسی، در برابر میزان آب برگ بالاتر از ۰/۰۷ گرم بر سانتی‌مترمربع، حساسیت کمتری دارد و مقادیر آب بالاتر، در این ناحیه، انعکاس را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند و این، خود، عاملی محدودکننده در مطالعه میزان آب برگ در این ناحیه و با استفاده از باند ۷ است. اما لازم است اشاره کنیم استفاده از این سنجنده، در چنین مطالعاتی، با محدودیت‌های دیگری همچون قدرت تفکیک مکانی و طیفی نیز مواجه است.

تأثیرگذاری محتوای آب در بازتاب با توجه به مقدار آب مشخص می‌شود؛ به گونه‌ای که اگر محتوای آب کم باشد، حساسیت بازتاب بسیار بیشتر از زمانی خواهد بود که محتوای آب زیاد است. خشک شدن گیاه، تا مرحله‌ی تأثیر چندانی در بازتاب ندارد اما کاهش محتوای آب گیاه، به مقادیر کمتر از ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ گرم بر سانتی‌مترمربع، باعث افزایش چشمگیر بازتاب، به‌ویژه خارج از باندهای جذبی آب می‌شود. از این رو با پیدا کردن این نقاط بحرانی منحنی بازتاب در مقابل محتوای آب، می‌توان تنش‌های شدید آبی در گیاهان را تشخیص داد. در مدل PROSPECT، اثر خاک زمینه در بازتاب طیفی گیاهان در نظر گرفته نمی‌شود؛ بنابراین استفاده از مدل‌هایی همچون SAIL<sup>۱</sup> (Verhoef, 1984; 1985) و SLC<sup>۲</sup> (Verhoef & Bach, 2007) پیشنهاد می‌شود که برای این منظور ارتقا یافته‌اند. همچنین با توجه به اینکه خروجی مدل PROSPECT منحنی طیفی برگ گیاه است، استفاده از مدل‌های انتقال تابش تاج پوشش گیاه مانند مدل SAIL و SLC را نیز می‌توان بررسی کرد.

#### ۵- منابع

- Akbari, E., Bolorani, A.D., Verrelst, J., Pignatti, S., Neysani Samany, N., Soufizadeh, S. & Hamzeh, S., 2023, **Biophysical Variable Retrieval of Silage Maize with Gaussian Process Regression and Hyperparameter Optimization Algorithms**, Remote Sensing, 15(14), P. 3690. <https://doi.org/10.3390/rs15143690>.
- Alavipanah, S.K., 2011, **Principles of modern remote sensing and interpretation of satellite images and aerial photographs**, Tehran University, Tehran. (in Persian).
- Ali, A.M., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Duran, I.V., Heiden, U. & Heurich, M., 2016, **Estimating Leaf Functional Traits by Inversion of PROSPECT: Assessing Leaf**

سنجنده PRISMA نیز دارای ۶۷ باند در محدوده ۴۰۰-۱۰۰۰ نانومتر و ۱۶۴ باند در محدوده ۱۰۰۰-۲۵۰۰ نانومتر است که می‌توان آن را در مطالعاتی با موضوع شناسایی و تفکیک ویژگی‌های برگ، به کار برد. استفاده از سنجنده‌های ابرطیفی در شناسایی ویژگی‌ها بسیار کارآمد است اما محدودیت قدرت تفکیک مکانی آنها همچنان پابرجاست.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر کمی پارامترهای برگ که در نحوه بازتاب و رفتار طیفی آن مؤثرند، تحلیل شده است. این پارامترها شامل مقدار کلروفیل برگ، ساختار برگ و محتوای آب آن می‌شوند. بدین‌منظور از مدل انتقال تابش PROSPECT که برای شبیه‌سازی رفتار طیفی برگ گیاهان توسعه یافته، استفاده شده است. نتایج این تحقیق بیان می‌کند که بیشتر تأثیر مقدار کلروفیل در بازتاب برگ در محدوده مرئی طیف الکترومغناطیس رخ می‌دهد و در این محدوده، با افزایش مقدار کلروفیل، کاهش بازتاب را مشاهده می‌کنیم. در ضمن، حساسیت بازتاب به مقدار اندک کلروفیل برگ بیشتر از زمانی است که این مقدار بالا باشد. پارامتر ساختار برگ معمولاً بازتاب برگ در محدوده فرورسرخ نزدیک، ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر، را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه، با افزایش پارامتر ساختار، بازتاب افزایش می‌یابد. بنابراین در گیاهان پیر و بدون ساختار داخلی منسجم، شاهد بازتاب بیشتری در محدوده فرورسرخ نزدیک هستیم. همچنین در گیاهان دولپه‌ای که پارانشیم اسفنجی دارند، انتظار بازتاب در محدوده فرورسرخ نزدیک بیشتر از گیاهان تک‌لپه‌ای است. گیاهان تک‌لپه‌ای، به‌علت بازتاب کمترشان در محدوده ۱۴۰۰ تا ۱۹۰۰ نانومتر، از سایر گیاهان تفکیک می‌شوند. اثرگذاری محتوای آب در بازتاب طیفی برگ از طول‌موج ۱۰۰۰ نانومتر آغاز و تا پایان محدوده انعکاسی، ۲۵۰۰ نانومتر، ادامه دارد و به‌نحوی، با افزایش محتوای آب، شاهد کاهش بازتاب هستیم. البته

1. Scattering by Arbitrary Inclined Leaves  
2. Soil-Leaf-Canopy

- Dry Matter Content and Specific Leaf Area in Mixed Mountainous Forest**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 45, PP. 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.11.004>.
- Allen, W.A., Gausman, H.W., Richardson, A.J. & Thomas, J.R., 1969, **Interaction of Isotropic Light with a Compact Plant Leaf**, J. Opt. Soc. Am., 59(10), PP. 1376–1379. <https://doi.org/10.1364/JOSA.59.001376>.
- Allen, W.A., Gausman, H.W. & Richardson, A.J., 1970, **Mean Effective Optical Constants of Cotton Leaves**, J. Opt. Soc. Am., 60(4), PP. 542–547. <https://doi.org/10.1364/JOSA.60.000542>.
- Dashti Ahangar, A., Darvishzadeh, R., Matkan, A.A. & Alizadeh, H., 2014, **Comparison of Numerical Methods and Reference Tables in Inversion of Radiation Transfer Models and Extraction of Plant Parameters**, 21th Geomatics Conference. (in Persian).
- Gausman, H.W., Allen, W.A. & Escobar, D.E., 1974, **Refractive Index of Plant Cell Walls**, Applied Optics, 13(1), PP. 109–111. <https://doi.org/10.1364/AO.13.000109>.
- Hodanova, D., 1985, **Leaf Optical Properties, in Photosynthesis during Leaf Development (Zdenek Sest-k, Ed.)**, Academia Praha, Prague. <https://doi.org/10.3390/plants10071455>.
- Hunter, P.D., Gilvear, D.J., Tyler, A.N., Willby, N.J. & Kelly, A., 2010, **Mapping Macro-Phytic Vegetation in Shallow Lakes Using the Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI)**, Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 20, PP. 717–727. DOI:10.1002/aqc.1144.
- Jacquemoud, S. & Baret, F., 1990, **PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra**, Remote Sensing of Environment, 34(2), PP. 75–91. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90100-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90100-Z).
- Jacquemoud, S. & Ustin, S.L., 2001, **Leaf Optical Properties: A State of the Art**, In 8<sup>th</sup> International Symposium of Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing (pp. 223-332), CNES Aussois France.
- Jarocińska, A.M., 2014, **Radiative Transfer Model Parametrization for Simulating the Reflectance of Meadow Vegetation**, MISCELLANEA GEOGRAPHICA – Regional Studies on Development, 18(2), PP. 5–9. DOI:10.2478/mgrsd-2014-0001.
- Jiang, H., Zhao, D., Cai, Y. & An, S., 2012, **A Method for Application of Classification Tree Models to Map Aquatic Vegetation Using Remotely Sensed Images from Different Sensors and Dates**, Sensors, 12(9), PP. 12437–12454. <https://doi.org/10.3390/s120912437>.
- Ma, Z.G., Chen, X., Wang, Q., Li, P.H. & Jiapaerl, G., 2012, **Retrieval of Leaf Biochemical Properties by Inversed PROSPECT Model and Hyperspectral Indices: An Application to Populous Euphratica Polymorphic Leaves**, J. Arid. Land., 4(1), PP. 52–62.
- Poorghasemi, N., Abbasi, M., Jafari, A. & Riyahi Bakhtyari, H.R., 2021, **Spectral Reflectance Simulation and Estimation of Chlorophyll and Water Content of Pistacia Mutica Leaf Based on PROSPECT4 Model**, Journal of Wood and Forest Science and Technology, 28(3), PP. 53–69. doi: 10.22069/jwfst.2021.19284.1934. (in Persian).
- Qiu, F., Chen, J.M., Croft, H., Li, J., Zhang, Q., Zhang, Y. & Ju, W., 2019, **Retrieving Leaf Chlorophyll Content by Incorporating Variable Leaf Surface Reflectance in the PROSPECT Model**, Remote Sensing, 11(13), P. 1572. <https://doi.org/10.3390/rs11131572>.
- Rivera, J.P., Verrelst, J., Leonenko, G. & Moreno, J., 2013, **Multiple Cost Functions and Regularization Options for Improved Retrieval of Leaf Chlorophyll Content and LAI through Inversion of the PROSAIL Model**, Remote Sens., 5(7), PP. 3280–3304. <https://doi.org/10.3390/rs5073280>.
- Roberts, D.A., Roth, K.L. & Perroy, R.L., 2016, **14 Hyperspectral Vegetation Indices**, Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation, 309.
- Stokes, G.G., 1862, **On the Intensity of the Light Reflected from or Transmitted through a Pile of Plates**, Proc. Roy. Soc.



- Lend., 11, PP. 545–556 (30 Nov. 1860 to 27 Feb. 1862). <https://doi.org/10.1364/JOSA.37.000818>.
- Vanderbilt, V.C. & Grant, L., 1986, **Polarization Photometer to Measure Bidirectional Reflectance Factor R (55, 0; 55, 180) of Leaves**, *Optical Engineering*, 25(4), PP. 566–571.
- Verhoef, W., 1984, **Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: the SAIL Model**, *Remote Sensing of Environment*, 16, PP. 125–141.
- Verhoef, W., 1985, **Earth Observation Modeling Based on Layer Scattering Matrices**, *Remote Sensing of Environment*, 17, PP. 165–178.
- Verhoef, W. & Bach, H., 2007, **Coupled Soil-Leaf-Canopy and Atmosphere Radiative Transfer Modeling to Simulate Hyperspectral Multi-Angular Surface Reflectance and TOA Radiance Data**, *Remote Sensing of Environment*, 109(2), PP. 166–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.013>.
- Wang, Z., Skidmore, A.K., Wang, T., Darvishzadeh, R. & Hearne, J., 2015, **Applicability of the PROSPECT Model for Estimating Protein and Cellulose + Lignin in Fresh Leaves**, *Remote Sensing of Environment*, 168, PP. 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.007>.
- Woolley, J.T., 1971, **Reflectance and Transmittance of Light by Leaves**, *Plant Physiology*, 47(5), PP. 656–662. <https://doi.org/10.1104/pp.47.5.656>.
- Zhang, Y.Q., Chen, J.M., Miller, J.R. & Noland, T.L., 2008, **Retrieving Chlorophyll Content in Conifer Needles from Hyperspectral Measurements**, *Can. J. Remote Sens.*, 34(3), PP. 296–310.
- Zhang, Y., Li, X., Wang, C., Zhang, R., Jin, L., He, Z., Tian, S., Wu, K. & Wang, F., 2022, **PROSPECT-PMP+: Simultaneous Retrievals of Chlorophyll a and b, Carotenoids and Anthocyanins in the Leaf Optical Properties Model**, *Sensors*, 22(8), P. 3025. Doi: 10.3390/s22083025.

**This Page is Intentionally Left Blank**