



Article Info

Received: 2021-7-17
Accepted: 2022-1-2

Keywords

Experimental data,
Hyperspectral images,
Leaf water content,
Remote sensing, Spectral
curve, Supervised
modelling

How to cite this article

Tayebe Managhebi,
Mohammadreza
Mobasheri, "Improvement
the Leaf Water Content
Inventory Model Based on
the Hyper Spectral Data",
*Journal of Space Science,
Technology and
Applications*, vol 1 (2), p.:
10-21, 2022.

Improvement the Leaf Water Content Inventory Model Based on the Hyper Spectral Data

Tayebe Managhebi^{*1}, Mohammadreza Mobasheri²

1,*. Researcher ISRC, tb.managhebi@gmail.com, Corresponding author
2. Professor of Remote Sensing Group, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering,
K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran, m.zoei@isrc.ac.ir

Abstract

The leaf water content is a specific index for the assessment of the physiological status of the plant based on the water content of the vegetation. This research provides an appropriate model based on the reflectance spectra between 400 and 2500 nm to estimate the leaf water content. We examined 53 different species of the well-known Leaf Optical Properties Experiment and a total of 263 spectral curves were employed in a supervised modelling procedure. For this purpose, three different linear models were proposed based on the two different indices and their combination. The first index refers to the ratio of reflectance value in two wavelengths and the second one is the ratio of the derivative of the spectral curve slope in two wavelengths. The experimental results indicate the dependence between the water absorption bands and leaf water content. Finally, the determination of coefficient for hybrid linear model, which is used both indices, resulted to be 87 percent, indicating a very good fit. Also, the 0.06 relative root mean square error represents the acceptable accuracy in the water content modelling.

بهبود مدل تخمین موجودی آب برگ گیاه مبتنی بر داده‌های طیفی

طیبه مناقبی^{۱*}، محمدرضا مباشری^۲

۱.*: پژوهشگاه فضایی ایران، tb.managhebi@gmail.com (نویسنده مسئول)

۲. دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، doctor.mobasheri@gmail.com



دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال اول، شماره ۲، صفحه ۲۱-۱۰
پاییز و زمستان ۱۴۰۰

Available in:
Journal.isrc.ac.ir/article_
146830.html

DOI:
10.22034/jस्ता.2022.295493.1028

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

واژه‌های کلیدی

تصاویر ابرطیفی، داده آزمایشگاهی،
سنجش از دور، مدل سازی نظارت
شده، محتوای آب برگ، منحنی طیفی

نحوه استناد به این مقاله

طیبه مناقبی، محمدرضا مباشری،
"بهبود مدل تخمین موجودی آب برگ
گیاه مبتنی بر داده‌های طیفی"،
دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای
فضایی، جلد اول، شماره دوم، صفحات
۲۱-۱۰، ۱۴۰۰.

چکیده

محتوای آب برگ گیاه شاخص مناسبی برای بررسی فیزیولوژیکی گیاه بر مبنای وضعیت آب آن است. این پژوهش مدلی را برای برآورد محتوای آب گیاه بر اساس داده‌های ابرطیفی در محدوده ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر ارائه می‌دهد. در این مطالعه، طیف بازتابندگی ۵۳ گونه گیاهی مختلف از داده‌های آزمایشگاهی خواص اپتیکی برگ، مورد استفاده قرار گرفته و در مجموع ۲۶۳ منحنی طیفی در یک روند مدل‌سازی نظارت شده به کار گرفته شدند. برای این منظور، در این تحقیق سه مدل خطی بر مبنای دو شاخص مجزا و ترکیب آن‌ها پیشنهاد شدند. شاخص اول نسبت بازتابندگی طیفی در دو طول موج مختلف و شاخص دوم نسبت مشتق منحنی طیفی در دو طول موج است. نتایج تجربی تایید کننده وابستگی باندهای جذبی آب و محتوای آب برگ است. در نهایت، مقدار ضریب تعیین ۸۷ درصد برای مدل ترکیبی به دست آمد که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل بر داده‌ها است. همچنین، جذر میانگین مربعات خطای نسبی ۰/۰۶ بیان‌گر دقت قابل قبول مدل پیشنهادی در برآورد محتوای آب برگ است.

تعیین کننده در میزان تولید گندم است که در مدل‌های پیش‌بینی تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳]. از این‌رو، برآورد این پارامتر حیثه وسیعی از تحقیقات را در سنجش از دور با استفاده از تصاویر ابرطیفی به خود اختصاص داده است [۱۴] و [۱۵]. در تحقیقات زیادی که در زمینه برآورد موجودی آب با استفاده از بازتابندگی در طول موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی صورت گرفته است؛ استفاده از برازش خطی به روش کمترین مربعات برای برقراری ارتباط بین شاخص‌های موجودی آب و بازتابندگی به ویژه در محدوده‌های مادون قرمز نزدیک^{۱۲} (NIR) و مادون قرمز با طول موج کوتاه^{۱۳} (SWIR) بیشترین کاربرد را داشته است [۱۶-۲۰]. مراکز باندهای جذبی آب که عبارتند از ۹۷۰، ۱۲۰۰، ۱۴۵۰، ۱۹۳۰ و ۲۵۰۰ نانومتر به عنوان طول موج‌های حساس به موجودی آب گیاه [۲۱] در صدر توجه تعداد دیگری از محققین این عرصه بوده‌اند [۲۲-۲۵]. با این وجود مباحثی^{۱۴} و همکاران در یک بررسی جامع نشان دادند که موجودی آب برگ گیاه می‌تواند متناسب با نسبت بازتابندگی در دو باندهای باشد که نه تنها در محدوده جذب آب طیف الکترومغناطیسی قرار ندارند، بلکه هر یک از این دو باند استفاده شده به تنهایی نیز هیچ‌گونه همبستگی با شاخص موجودی آب برگ ندارند [۲۶]. نتایج این تحقیق از این جهت حائز اهمیت است که شاخص به‌دست آمده بر اساس بازتابندگی در طول موجی است که باند جذبی آب محسوب نمی‌شود و از این‌رو، شاخص به‌دست آمده قابل استفاده در سنجش از دور ماهواره‌ای است که به شدت از موجودی بخار آب جو متأثر است. پو^{۱۵} و همکاران با استخراج ویژگی‌های جذبی از منحنی طیف بازتابندگی و همچنین تعریف شاخص نسبت سه باندهای و ویژگی‌های مستخرج از منحنی طیفی، امکان برقراری ارتباط خطی ویژگی‌های مستخرج از طیف الکترومغناطیس را با شاخص محتوای آب گیاه مورد بحث و بررسی قرار دادند. برازش خطی

تصاویر ابرطیفی^۱ یکی از منابع داده سنجش از دور^۲ به منظور شناسایی هدف^۳ و برآورد پارامترهای هدف است. امروزه پیش پوشش‌های گیاهی اعم از جنگل، مرتع، اراضی زارعی و باغی یکی از شاخه‌های مهم مطالعاتی در سنجش از دور است که به دلیل اهمیت و تنوع چالش‌ها، پژوهش‌های بسیاری را به خود اختصاص داده است. طبقه‌بندی پوشش زمین [۱]، تفکیک گونه‌های کشاورزی [۲]، مطالعه وضعیت گیاه [۳] و برآورد پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آن [۴] از مهم‌ترین این چالش‌ها هستند. بدیهی است که در هر یک از موضوعات یاد شده، داده مناسب بر اساس موضوع مدنظر انتخاب شده و دقت مورد نیاز تعیین می‌شود. انتخاب سکوی مناسب برای اخذ داده به صورت داده‌های هواپرد^۴ یا فضاپرد^۵، انتخاب حد تفکیک مکانی^۶ و طیفی^۷ مناسب و بالاخره نوع داده نوری^۸ یا راداری^۹، همگی به هدف مطالعه بستگی دارد. به صورت کلی، داده‌های راداری به فیزیک هدف حساس هستند و داده‌های نوری به ویژگی‌های شیمیایی اهداف حساسیت نشان می‌دهند. بدیهی است که انتخاب حد تفکیک مکانی مناسب نیز کاملاً متأثر از نوع هدف، موضوع مطالعه و دقت درخواستی، می‌تواند از چند متر در تشخیص نوع گونه تا میلیمتر در تشخیص نوع بیماری گیاه متغیر باشد. همچنین در مورد نوع سنجنده، سنجنده‌های چند طیفی^{۱۰} گزینه مناسبی برای شناسایی محدوده و تعیین گونه هستند.

یکی از پارامترهای بیوشیمیایی مهم گیاه، موجودی آب^{۱۱} گیاه است که شاخص مناسبی برای بررسی وضعیت فیزیولوژیکی گیاه [۸-۵]، تعیین زمان مناسب آبیاری [۹] و [۶]، و بالاخره پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها به‌شمار می‌آید [۱۰-۱۲]. همچنین بررسی و پایش محتوای آب برگ در فصل رشد، یکی از پارامترهای

9 Radar

10 Multi Spectral

11 Water Content

12 Near Infrared

13 Short Wave Infrared

14 Mobasheri

15 Pu

1 Hyper Spectral

2 Remote Sensing

3 Pattern Recognition

4 Airborne

5 Spaceborne

6 Spatial Resolution

7 Spectral Resolution

8 Optic

برآورد پارامترهای مختلف گیاه نظیر موجودی آب، کلروفیل و ... در سطح برگ، تاکنون مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است [۲۸] و [۲۶]. در این داده‌ها مقدار بازتابندگی در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر با حد تفکیک طیفی یک نانومتر برای گونه‌های مختلف ثبت شده است. شکل ۱ نمونه‌ای از منحنی طیفی را برای یک نمونه گیاه گندم نشان می‌دهد. بدیهی است که استفاده از نتایج حاصل از این داده‌های آزمایشگاهی در سنجش از دور هوایی و به‌ویژه فضایی، مستلزم اعمال تصحیحات اتمسفری بر تصاویر است.

در مطالعه حاضر، ۲۶۳ نمونه از داده‌های آزمایشگاهی مذکور به عنوان داده آموزشی^۹ و آزمایشی^{۱۰} به منظور مدل‌سازی و ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند. از مجموع نمونه‌های انتخاب شده که مربوط به ۵۳ گونه گیاهی مختلف بودند؛ ۲۱۰ نمونه برای مدل‌سازی و ۵۳ نمونه نیز برای ارزیابی مدل در نظر گرفته شدند. در انتخاب نمونه‌ها، جمعیت آماری نمونه‌ها با مقادیر مختلف ضخامت آب معادل برگ^{۱۱} (EWT) از 0.037 gcm^{-2} تا 0.525 gcm^{-2} با میانگین 0.117 gcm^{-2} و انحراف معیار آن‌ها 0.072 gcm^{-2} مدنظر قرار گرفت. همچنین در تفکیک داده‌های آموزشی و آزمایشی نیز تنوع مقدار EWT و تنوع نوع گونه در هر دو داده آموزشی و آزمایشی مدنظر قرار گرفت و در محدوده‌های مشخص از محتوای آب و در هرگونه، داده‌های آموزشی و آزمایشی به صورت تصادفی و با نسبت ۴ به ۱ انتخاب شدند. در صورتی که تعداد نمونه در یک نوع گونه یا مقدار EWT در یک محدوده کم بود، حداقل یک نمونه در داده آموزشی و یک نمونه در داده آزمایشی قرار داده شد.

بین شاخص و ویژگی‌های به‌دست آمده نشان داد که ویژگی مساحت^۱ در باندهای جذبی ۹۲۰-۱۱۲۰ نانومتر و ۱۰۷۰-۱۳۲۰ نانومتر و همچنین ویژگی‌های نسبت باندی تعریف شده، همبستگی مناسبی را با محتوای آب گیاه نشان می‌دهند. نکته ظریف و قابل تأمل در این مطالعه استفاده از CR^۲ به‌عنوان پیش‌پردازشی برای آشکارسازی بهتر و به عبارت دیگر مبالغه‌آمیزسازی عمق^۳ باندهای جذبی و به تبع آن سایر ویژگی‌های باندهای جذبی مانند مساحت و تقارن^۴ است [۲۷]. در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته برای برآورد پارامتر موجودی آب برگ گیاه، تنها نوع خاصی از گیاه با ظرفیت‌های آب متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته‌است [۱۶] و [۲۷]. همچنین عموماً از محدوده خاصی از طیف الکترومغناطیس که محدود به باندهای جذبی آب است استفاده شده‌است [۲۷]. در سال ۲۰۲۱، پژوهشی به منظور مطالعه میزان آب برگ^۵ (LWC) انجام شد که هدف از آن، استخراج پروفیل قائم موجودی آب گیاه بر اساس دو شاخص آب^۶ (WI) و شاخص اختلاف نرمال شده استرس آب^۷ (NDWSI) بود. دو شاخص نامبرده از مقادیر بازتابندگی در باندهای مادون قرمز نزدیک (طول موج‌های ۸۵۰، ۹۰۰ و ۹۷۰ نانومتر) استفاده می‌کنند [۱۳].

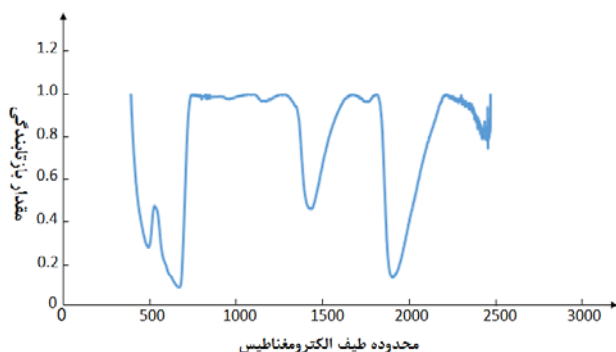
با توجه به مرور پژوهش‌های انجام شده، هدف از مطالعه حاضر، بررسی جامع نسبت‌های بین باندها در منحنی طیف الکترومغناطیس و مشتق این منحنی به منظور ارائه مدلی برای برآورد موجودی آب گیاه است. توضیح تفصیلی از داده‌های مورد استفاده و روش کار در بخش بعد ارائه می‌شود و پس از آن ضمن ارائه نتایج و ارزیابی دقت، پیشنهاداتی برای ادامه این پژوهش ارائه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

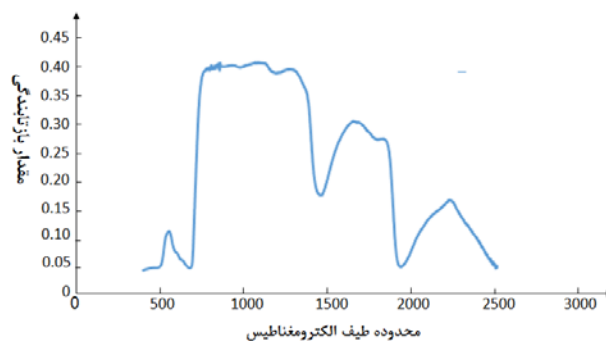
داده‌های آزمایشگاهی خواص اپتیکی برگ^۸ (LOPEX93)، به‌عنوان منبع مناسبی برای دسترسی به شاخص مناسب برای

7 Normalized Difference Water Stress Index
8 Leaf Optical Properties Experiment
9 Train Data
10 Test Data
11 Equivalent Water Thickness

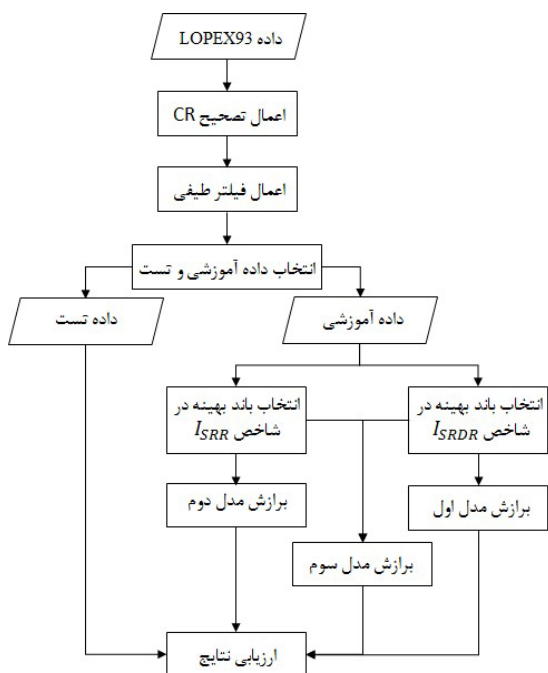
1 Area
2 Continuum Removal
3 Depth
4 Asymmetry
5 Leaf Water Content
6 Water Index



شکل ۲. اعمال تصحیح CR بر روی منحنی طیفی



شکل ۱. منحنی طیفی یک نوع گندم در داده LOPEX93



شکل ۳. روندنمای الگوریتم پیشنهادی

شکل ۳ روندنمای روش پیشنهادی را به صورت خلاصه نشان می‌دهد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، یکی از پیش‌پردازش‌های انجام شده بر روی داده‌های منحنی طیفی، اعمال یک فیلتر طیفی بر روی داده‌ها است. این فیلتر با کاهش حد تفکیک طیفی از ۱ نانومتر به ۱۰ نانومتر موجب نرم‌تر شدن منحنی و کاهش نویز در منحنی طیفی می‌شود. به این ترتیب، مقادیر مشتق طیف بازتابندگی از صفر (برابری مقادیر بازتابندگی در دو طول موج

پارامترهای متفاوتی برای بیان موجودی آب برگ گیاه تعریف می‌شود که از آن جمله می‌توان به شاخص درصد محتوای نسبی آب^۱ (RWC) و شاخص ضخامت آب معادل برگ^۲ (EWT) اشاره نمود که این دو شاخص به ترتیب با روابط (۱) و (۲) تعریف شده‌اند [۲۸].

$$RWC = 100 \times \frac{FW - DW}{DW} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$EWT = \frac{FW - DW}{A} \quad (g \text{ cm}^{-2}) \quad \text{رابطه ۲}$$

در روابط فوق، FW وزن برگ تازه^۳، DW وزن برگ خشک^۴ و A سطح برگ است. در داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده شاخص EWT به عنوان شاخص محتوای آب گیاه مورد استفاده قرار گرفته است.

در مرحله پیش‌پردازش، به منظور استفاده بهینه از ویژگی‌های جذبی ابتدا CR بر منحنی طیفی تمامی نمونه‌ها اعمال شد. با اعمال این اپراتور، در واقع نواحی جذبی بارزتر شده و نقاط حداکثری منحنی به حداکثر مقدار ممکن یعنی یک می‌رسند [۲۷]. شکل ۲ نمونه‌ای از منحنی طیفی را بعد از اعمال تصحیح مذکور نشان می‌دهد.

3 Fresh Weight
4 Dry Weight

1 Relative Water Content
2 Equivalent Water Thickness

مباشری و همکاران شاخص نسبت بازتابندگی بین دو باند را به صورت زیر تعریف کردند [۲۶]:

رابطه ۶

$$I_{SRR} = \frac{R_{\lambda i}}{R_{\lambda j}}, i, j \in \{1, 2, \dots, 2101\}, i \neq j$$

که در آن، I_{SRR} شاخص نسبت بازتابندگی طیفی^۵، مقدار بازتابندگی در طول موج i ام و بالاخره $R_{\lambda j}$ مقدار بازتابندگی در طول موج j ام است.

در سال ۲۰۱۵، شاخص NIDI با استفاده از نسبت‌های بین بانندی بر اساس مقادیر بازتابندگی در باندهای محدوده مادون قرمز میانی به صورت زیر تعریف شد [۳۰]:

$$NIDI = \frac{R_{1529}}{R_{1416}} \quad \text{رابطه ۷}$$

با توجه به مقادیر طول موج ۱۵۲۹ و ۱۴۱۶ نانومتر، عدم استفاده از فیلترهای کاهش نویز مهم‌ترین اشکالی است که به مدل مذکور وارد می‌شود.

در سال ۲۰۲۰، شاخص آب کامپوزیت^۸ (CWI) به عنوان شاخصی برای برآورد میزان آب گیاه به صورت زیر تعریف شد [۳۱]:

$$CWI = R_{1660} \times R_{1820} \quad \text{رابطه ۸}$$

همچنان که ملاحظه می‌شود، در شاخص‌های مختلف مورد استفاده، مقادیر بازتابندگی در طیف الکترومغناطیس مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، شاخص جدیدی بر اساس مقادیر شیب منحنی طیفی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به این ترتیب، علاوه بر مقدار بازتابندگی، نرخ تغییرات بازتابندگی نیز مورد بررسی قرار

متوالی در منحنی با حد تفکیک طیفی یک نانومتر) فاصله می‌گیرند و به عبارت دیگر، با کاهش نویز در منحنی طیفی، بررسی شیب منحنی به دور از نقاط اکسترمم محلی میسر می‌شود. به منظور استقلال شاخص‌های مورد استفاده در مدل‌سازی از برخی اثرات محتوای بیوشیمیایی و ساختاری گونه‌های مختلف برگ، در عموم شاخص‌های محتوای آب از نسبت‌های بین بانندی طیف بازتابندگی و اختلاف نرمال شده باندها استفاده می‌شود. در ادامه، شاخص‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند معرفی می‌شوند.

هاردیسکی^۱ و همکاران، شاخص اختلاف نرمال شده مادون قرمز^۲ (NDII) را به شکل زیر پیشنهاد دادند [۱۷]:

$$NDII = \frac{R_{850} - R_{1650}}{R_{850} + R_{1650}} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن اختلاف بازتابندگی نرمال شده در دو طول موج ۸۵۰ و ۱۶۵۰ نانومتر که متناظر با باندهای مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه است مورد استفاده قرار می‌گیرد.

گائو^۳ و همکاران نیز باند مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی^۴ (MIR) را برای محاسبه شاخص نرمال شده آب^۵ (NDWI) مورد استفاده قرار دادند [۱۸].

$$NDWI = \frac{R_{850} - R_{1240}}{R_{850} + R_{1240}} \quad \text{رابطه ۴}$$

هانت^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۱ شاخص NDWSI را بر اساس اختلاف نرمال شده مقادیر بازتابندگی در مادون قرمز نزدیک به صورت زیر تعریف کردند [۲۹]:

$$NDWSI = \frac{R_{850} - R_{970}}{R_{850} + R_{970}} \quad \text{رابطه ۵}$$

5 Normalized Difference Water Index

6 Haunt

7 Spectral Reflectance Ratio

8 Composite Water Index

1 Hardisky

2 Normalized Difference Infrared Index

3 Gao

4 Near Infrared

رابطه ۱۲

$$EWT = a_3 I_{optSRR} + b_3 I_{optSRDR} + c_3$$

که در آن a_3 ، b_3 و c_3 پارامترهای مدل خطی ترکیبی هستند. بدیهی است که نیازی به انجام مرحله بهینه‌سازی در این مدل وجود ندارد و باندهای بهینه به دست آمده برای مدل‌های رابطه و رابطه در مدل اخیر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور ارزیابی نتایج و بررسی میزان تطابق نتایج حاصل از روش‌های ارائه شده و مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌ها از سه شاخص آماری استفاده می‌شود. شاخص آماری رگرسیون به نام ضریب تعیین^۲ که در واقع توان دوم میزان همبستگی نتایج حاصل از مدل و نتایج حاصل از اندازه‌گیری است به صورت زیر قابل محاسبه است:

رابطه ۱۳

$$R^2 = \frac{E(EWT_O - \overline{EWT_O})(EWT_C - \overline{EWT_C})}{E(EWT_O - \overline{EWT_O})^2 E(EWT_C - \overline{EWT_C})^2}$$

که در آن، EWT_O و $\overline{EWT_O}$ به ترتیب، محتوای آب برگ مشاهداتی و محتوای آب برگ مشاهداتی متوسط هستند، EWT_C و $\overline{EWT_C}$ به ترتیب محتوای آب برگ محاسباتی از مدل و متوسط آن هستند و بالاخره E اپراتور امید ریاضی است که در برآوردگر نزدیک‌ترین همسایه^۳ به صورت میانگین تعریف شده و منجر به رابطه زیر می‌شود:

رابطه ۱۴

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (EWT_{O_i} - \overline{EWT_O})(EWT_{C_i} - \overline{EWT_C})}{\sum_{i=1}^n (EWT_{O_i} - \overline{EWT_O})^2 (EWT_{C_i} - \overline{EWT_C})^2}$$

که در آن، n تعداد نمونه مورد استفاده در مجموعه داده‌های تست است. شاخص آماری دوم جذر میانگین مربعات خطا^۴ (RMSE) است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

داده می‌شود. این شاخص تحت عنوان نسبت مشتق بازتابندگی طیفی^۱ بین هر دو باند به صورت زیر تعریف شد:

رابطه ۹

$$I_{SRDR} = \frac{\frac{\partial R_{\lambda i}}{\partial \lambda}}{\frac{\partial R_{\lambda j}}{\partial \lambda}}, i, j \in \{1, 2, \dots, 2101\}, i \neq j$$

که در آن، I_{SRDR} شاخص نسبت مشتق بازتابندگی طیفی و θ اپراتور مشتق نسبی است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شاخص اخیر صرفاً بر اساس شیب منحنی طیفی عمل می‌کند. در ادامه هر یک از شاخص‌های رابطه ۶ و ۹ به‌ازای تمامی باندهای طیفی محاسبه شدند و همبستگی شاخص با مقدار EWT به‌ازای هر دو باند در داده‌های آموزشی ثبت شد. در نهایت، مدل خطی تخمین مقدار EWT بر حسب شاخص بهینه I_{SRR} به صورت زیر تعریف شد:

$$EWT = a_1 I_{optSRR} + b_1 \quad \text{رابطه ۱۰}$$

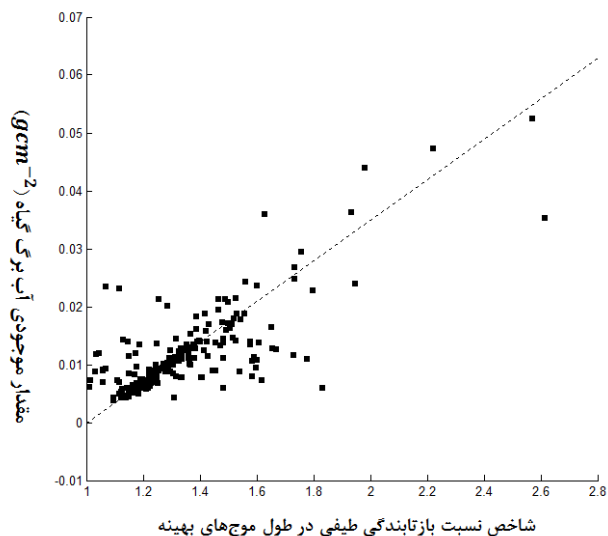
که در آن، I_{optSRR} شاخص بهینه شده I_{SRR} به‌ازای باندهای طیفی بهینه است و a_1 و b_1 ضرایب مدل خطی هستند. مشابه این مدل خطی برای شاخص تعریف شده I_{SRDR} و به‌ازای باندهای بهینه به صورت زیر است:

$$EWT = a_2 I_{optSRDR} + b_2 \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن، $I_{optSRDR}$ شاخص بهینه شده I_{SRDR} به‌ازای باندهای طیفی بهینه است و a_2 و b_2 ضرایب مدل خطی هستند. مدلی که در نهایت به عنوان مدل نهایی در این روش پیشنهاد می‌شود، مدلی ترکیبی است که هر دو شاخص بهینه را در خود جای داده و در واقع علاوه بر اطلاعات مقدار بازتابندگی در منحنی طیفی، از شیب منحنی طیفی نیز بهره می‌برد. مدل اخیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

3 Maximum Likelihood
4 Root Mean Square Error

1 Spectral Reflectance Derivation Ratio
2 Determination of Coefficient



شکل ۴. برازش خطی بین EWT مشاهده شده و شاخص نسبت بازتابندگی در طول موج‌های ۷۵۰ و ۱۳۹۰ نانومتر

به طور مشابه پس از تعیین باندهای بهینه در شاخص دوم با استفاده از داده‌های آموزشی که عبارتند از باند طیف ۱۳۴۰ و ۱۵۲۰ نانومتر در محدوده مادون قرمز کوتاه، ضرایب مدل خطی متناظر با آن نیز به روش کمترین مربعات و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$EWT = -0.0302 \frac{S_{1340}}{S_{1520}} - 0.0101 \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EWT_O - EWT_c)^2 \quad \text{رابطه ۱۵}$$

شاخص آماری سومی که در تعیین دقت روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت، شاخص جذر میانگین مربعات خطای نسبی^۱ (RRMSE) است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RRMSE = \frac{RMSE}{EWT_O} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

که در آن خطای هر متغیر تصادفی با توجه به مقدار واقعی متغیر تعیین می‌شود. به این ترتیب، سه پارامتر آماری یاد شده در کنار بررسی میزان همبستگی بین محاسبات و مشاهدات، مقدار خطای مطلق و نسبی محاسبات را نیز برآورد خواهد کرد.

۳- نتایج

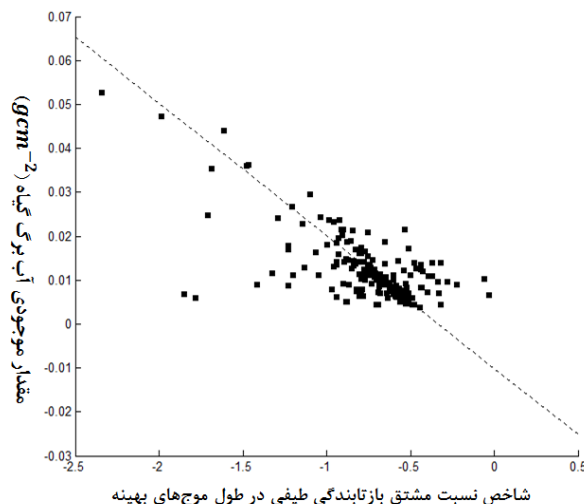
بررسی شاخص ضریب تعیین در هر یک از مدل‌های پیشنهادی (روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲))، منجر به شناسایی طول موج‌های بهینه در هر مدل می‌شود. بر مبنای شاخص آماری کیفیت برازش یعنی ضریب تعیین، بهترین نتایج در مدل اول مربوط به نسبت بازتابندگی در دو طول موج ۷۵۰ و ۱۳۹۰ نانومتر است که مربوط به محدوده لبه قرمز^۲ و مادون قرمز کوتاه است. پس از تعیین باندهای بهینه، بر اساس داده‌های آموزشی ضرایب مدل خطی به روش کمترین مربعات به دست می‌آید. رابطه ۱۷ مدل خطی برآورد بر اساس شاخص اول را نشان می‌دهد:

$$EWT = 0.035 \frac{R_{750}}{R_{1390}} - 0.0351 \quad \text{رابطه ۱۷}$$

برازش خط به داده‌های آموزشی به منظور برآورد ضرایب مدل خطی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۱۳۴۰ و ۱۵۲۰ نانومتر است؛ همواره مقداری منفی است که به معنی اختلاف جهت شیب در دو نقطه مذکور است. به عبارت دیگر، از آنجایی که طول موج‌های ذکر شده در دو سوی باند جذبی واقع شده‌اند؛ دارای مقادیر شیب بازتابندگی با علامت متفاوت است.

در ادامه، بر اساس مدل ۱۷، به‌عنوان مدلی که بهترین برازش را بر داده‌های آموزشی داشت، موجودی آب برگ گیاه در داده‌های تست برآورد شد. شکل ۵ نمایشی نقطه‌ای از EWT برآورد شده با استفاده از مدل اول را در مقابل EWT اندازه‌گیری شده برای داده‌های آزمون نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، ملاحظه می‌شود که دقت برآورد در مدل دوم نسبت به مدل اول بهتر است. در واقع، نسبت نرخ تغییر بازتابندگی در مقایسه با نسبت بازتابندگی، شاخص مناسب‌تری در برآورد پارامتر مد نظر است.



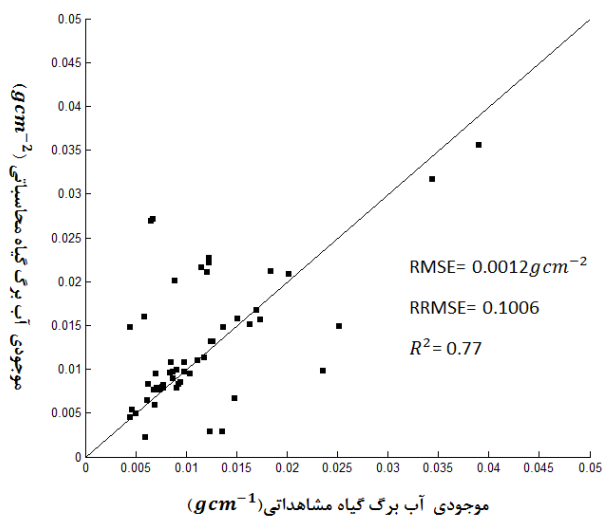
شکل ۵. برازش خطی بین EWT و شاخص نسبت شیب منحنی طیفی در طول موج‌های ۱۳۴۰ و ۱۵۲۰ نانومتر

همچنان که ملاحظه می‌شود شیب منحنی طیفی در محدوده SWIR شاخص مناسبی برای برآورد مقدار EWT است. در نهایت مدل ترکیبی خطی بر اساس رابطه ۱۲ و با استفاده از طول موج‌های بهینه به صورت زیر است:

رابطه ۱۹

$$EWT = +0.0113 \frac{R_{750}}{R_{1390}} - 0.0207 \frac{S_{1340}}{S_{1520}} - 0.0183$$

در محاسبه پارامترهای گیاه بر اساس منحنی طیفی، توجه به استقلال مدل ارائه شده از گونه گیاهی و نیز توانایی مدل در برآورد دقیق میزان پارامتر مورد بررسی در حالات مختلف از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. از این‌رو، همچنان که از شکل ۴ و ۵ برمی‌آید، در انتخاب داده‌های آموزشی تلاش شده است تا از مقادیر مختلف EWT استفاده شود. لازم به توضیح است که در نمونه آزمایشگاهی مورد استفاده، فراوانی داده‌ها با EWT بالا نسبت به داده‌های با EWT کم، کمتر بود. بررسی نتایج حاصل از مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهد، نسبت شیب منحنی طیفی در دو سوی باندهای جذبی با میزان موجودی آب گیاه ارتباط دارد. نسبت شیب به‌کار گرفته شده در مدل دوم که مربوط به دو طول موج



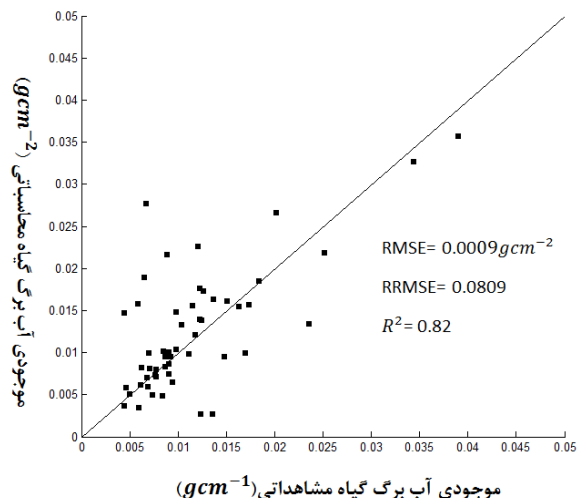
شکل ۶. نمایش موجودی آب برگ محاسباتی از مدل اول در مقابل موجودی آب برگ مشاهداتی

EWT محاسبه شده قادر به برآورد مقدار واقعی EWT با دقت نسبی بهتر از ۶ درصد است. اگر چه مقادیر ضریب تعیین برای شاخص‌های NDWI و NDII بهتر از نتیجه حاصل از شاخص نسبت باندی و برابر با ۰/۸۱ و ۰/۸۳ بود اما مقادیر خطای نسبی این دو شاخص به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۱۳۵ به دست آمد که نشان می‌دهد شاخص‌های مذکور در مقایسه با نتایج این پژوهش از دقت پایین‌تری برخوردار هستند. استفاده از مشتق منحنی طیفی در کنار منحنی طیفی، این اجازه را می‌دهد که ضمن بررسی مقادیر بازتابندگی از نرخ تغییرات بازتابندگی در باندهای مجاور نیز استفاده شود.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

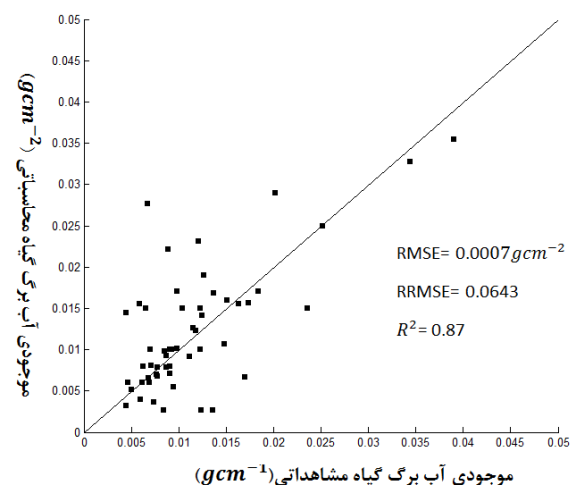
در حال حاضر، شرکت‌های متعددی در ایران و سایر کشورها به دنبال استفاده از فناوری سنجش از دور هوایی و فضایی در راستای دستیابی به کشاورزی هوشمند هستند. کشاورزی هوشمند نه تنها در کنار کشاورز منجر به بهبود شرایط مزرعه می‌شود بلکه راهنمای مناسبی نیز برای مدیران مربوطه در راستای بحث صادرات و واردات کشاورزی، تعیین حق آبه، تخصیص خدماتی همچون بیمه کشاورزی و ارائه مشاوره کشاورزی و ... است. در این راستا، مطالعه دقیق وضعیت فیزیولوژیکی گیاه به منظور بررسی سلامت گیاه، میزان تولید، نیاز گیاه به آب و کود و سم‌پاشی مد نظر است. لازم به تاکید است که بسیاری از پارامترهای گیاه قابل اندازه‌گیری مستقیم نیستند و باید با روش‌های غیرمستقیم برآورد شوند. در این میان، فناوری سنجش از دور با ارائه شاخص‌هایی بر اساس بازتابندگی گیاه در طول موج‌های مختلف در کنار اینترنت اشیا از مهم‌ترین فناوری‌هایی است که در حوزه کشاورزی هوشمند کاربرد دارد.

هدف از این پژوهش، برآورد موجودی آب برگ گیاه با استفاده از فناوری سنجش از دور است. مطالعه موجودی آب گیاه در دوره رشد گیاه علاوه بر اینکه اطلاعات مفیدی در راستای وضعیت فیزیولوژیکی گیاه ارائه می‌دهد، سبب بهبود دقت برآورد مقدار تولید می‌شود. بدیهی است که تعیین مقدار تولید مزارع کشاورزی پیش از دوره برداشت گیاه، راهنمای مدیران مربوطه به ویژه در حوزه صادرات و واردات کشاورزی است.



شکل ۷. نمایش موجودی آب برگ محاسباتی از مدل دوم در مقابل موجودی آب برگ مشاهده‌ای

شکل ۸ نتایج محاسباتی با استفاده از مدل ترکیبی را در مقایسه با مشاهدات انجام شده در داده تست نمایش می‌دهد.



شکل ۸. نمایش موجودی آب برگ محاسباتی از مدل ترکیبی در مقابل موجودی آب برگ مشاهده‌ای

نتایج حاصل از مدل سوم بیان‌گر این مطلب است که استفاده از نسبت بازتابندگی منحنی طیفی و نسبت شیب آن در یک مدل خطی سبب بهبود کیفیت مدل ارائه شده در برآورد میزان موجودی آب برگ گیاه می‌شود. همچنان که از شکل ۸ برمی‌آید،

جدول ۱ مقایسه‌ای از مقادیر RMSE به‌ازای شاخص‌های ارائه شده و شاخص‌های متداول ارائه می‌دهد. نتایج ارائه شده بیان‌گر قابلیت مدل ارائه شده در برآورد موجودی آب گیاه است.

۵- پیشنهادها

با توجه به اینکه در این مقاله به دلیل عدم دسترسی به مجموعه کاملی از داده‌های حقیقی از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده است، در مرحله اول پیشنهاد می‌شود این پژوهش بر پایه داده حقیقی انجام شود. همچنین، در عموم پژوهش‌های انجام شده در این حوزه از رگرسیون خطی برای مدل‌سازی EWT بر اساس یک شاخص استفاده شده است، از این‌رو، پیشنهاد دوم استفاده از یک فضای ویژگی غنی‌تر شامل شاخص‌هایی نظیر شاخص‌های تفاضل نرمال شده NDWI و NDII در کنار ویژگی‌های دیگری نظیر مساحت و تقارن مستخرج از منحنی طیفی و شاخص معرفی شده در این مقاله و به‌کارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی نظیر شبکه عصبی و یادگیری عمیق برای مدل‌سازی EWT است. همچنین در داده مورد استفاده در این پژوهش، تعداد نمونه‌های با مقادیر موجودی آب گیاه بالاتر ۰/۰۲۵ گرم بر سانتیمتر محدود بود و از این‌رو، مدل‌سازی در این محدوده با دقت مناسبی انجام نشده است بنابراین، پیشنهاد می‌شود با جمع‌آوری داده با مقادیر بالاتر موجودی آب، مدل‌سازی جامع‌تری صورت گیرد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

اد

مراجع

[1] W. Zhang et al., "WTS: A Weakly towards strongly supervised learning framework for remote sensing land cover classification using segmentation models". *Remote Sensing*, 2021. 13(3): p. 394.

در این مقاله، شاخص‌هایی برای تخمین مقدار موجودی آب برگ گیاهان با استفاده از اطلاعات منحنی طیفی گیاه ارائه شد که مستقل از نوع گیاه، با مقدار EWT همبستگی دارد (جدول ۱). برای انجام این پژوهش، از داده‌های شناخته شده آزمایشگاهی خواص اپتیکی برگ (Iopex93) استفاده شده است. در ادامه، با استفاده از داده‌های آموزشی مدلی خطی با ترکیب دو شاخص ارائه شده تعریف شد که با دقت نسبی ۰/۰۶۴۳ قادر به تخمین موجودی آب برگ گیاه است. در این مسیر، برای عبور از وابستگی شاخص ارائه شده به نوع گیاه، شاخص مشتق منحنی طیف بازتابندگی در کنار بازتابندگی طیفی به‌کار گرفته شده است. بررسی نسبت مقادیر بازتابندگی در باندهای جذبی آب نشان دهنده تاثیرپذیری شیب منحنی طیفی از موجودی آب برگ است. از آنجایی‌که در مدل نهایی تعریف شده از نسبت بازتابندگی طیفی و نسبت مشتق بازتابندگی طیفی استفاده شده است، علاوه بر اینکه، امکان برآورد EWT برای گونه‌های مختلف گیاهی را فراهم می‌کند، به دلیل نسبت‌گیری باندی و در نتیجه حذف تقریبی اثر جو، امکان استفاده از این شاخص در سنجش از دور هوایی و فضایی نیز وجود خواهد داشت.

جدول ۱. مقایسه نتایج شاخص پیشنهادی و شاخص‌های رایج برآورد EWT

منبع	RMSE	رابطه	شاخص طیفی
[۱۷]	0.0042	$NDII = \frac{R_{850} - R_{1650}}{R_{850} + R_{1650}}$	شاخص اختلاف نرمال شده مادون قرمز
[۱۸]	0.0051	$NDWI = \frac{R_{850} - R_{1240}}{R_{850} + R_{1240}}$	شاخص نرمال شده آب
[۲۹]	0.00095	$NDWSI = \frac{R_{850} - R_{970}}{R_{850} + R_{970}}$	شاخص اختلاف نرمال شده استرس آب
[۳۰]	0.0012	$NIDI = \frac{R_{1529}}{R_{1416}}$	شاخص نسبت بین باندی
[۳۱]	0.0013	$CWI = R_{1660} \times R_{1820}$	شاخص آب کامپوزیت
پژوهش حاضر	0.0007	$EWT = +0.0113 \frac{R_{750}}{R_{1390}} - 0.0207 \frac{S_{1340}}{S_{1520}} - 0.0183$	مدل ترکیبی منحنی طیفی و مشتق آن

- hyperspectral indices and inverse modeling". *Remote Sensing of Environment*, 2008. 112(4): p. 1820-1834.
- [17] M. Hardisky, V. Klemas and M. Smart, "The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of". *Spartina alterniflora*, 1983. 49: p. 77-83.
- [18] B. C. Gao, "Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space". in *Imaging Spectrometry*. 1995. International Society for Optics and Photonics.
- [19] G. Krishna et al., "Application of thermal imaging and hyperspectral remote sensing for crop water deficit stress monitoring". *Geocarto International*, 2021. 36(5): p. 481-498.
- [20] R. Filgueiras et al., "Soil water content and actual evapotranspiration predictions using regression algorithms and remote sensing data". *Agricultural Water Management*, 2020. 241: p. 106346.
- [21] L. Zhang et al., "Monitoring cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaf ion content and leaf water content in saline soil with hyperspectral reflectance". *European Journal of Remote Sensing*, 2014. 47: p. 593-610.
- [22] E.B. Knipling, "Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation". *Remote sensing of environment*, 1970. 1(3): p. 155-159.
- [23] C.J. Tucker, "Remote sensing of leaf water content in the near infrared". *Remote sensing of Environment*, 1980. 10(1): p. 23-32.
- [24] P. Ceccato et al., "Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain". *Remote sensing of environment*, 2001. 77(1): p. 22-33.
- [25] P.J. Zarco-Tejada and S. Ustin. "Modeling canopy water content for carbon estimates from MODIS data at land EOS validation sites". in *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217)*. 2001. IEEE.
- [26] M.R. Mobasheri, and S.B. Fatemi, "Leaf Equivalent Water Thickness assessment using reflectance at optimum wavelengths". *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2013. 25(3): p. 196-202.
- [27] R. Pu et al., "Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves". *International Journal of Remote Sensing*, 2003. 24(9): p. 1799-1810.
- [28] P. Bowyer and F. Danson, "Sensitivity of spectral reflectance to variation in live fuel moisture content at leaf and canopy level". *Remote Sensing of Environment*, 2004. 92(3): p. 297-308.
- [29] E.R. Hunt et al., "Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index". 2011.
- [30] D.M. Kim et al., "Highly sensitive image-derived indices of water-stressed plants using hyperspectral
- [2] A. Orynbaikyzy, U. Gessner & C. Conrad, "Crop type classification using a combination of optical and radar remote sensing data: a review". *international journal of remote sensing*, 2019. 40(17): p. 6553-6595.
- [3] J. Jung et al., "The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems". *Current Opinion in Biotechnology*, 2021. 70: p. 15-22.
- [4] Q. Xie et al., "Crop height estimation of corn from multi-year RADARSAT-2 polarimetric observables using machine learning". *Remote Sensing*, 2021. 13(3): p. 392.
- [5] G.A. Carter, "Responses of leaf spectral reflectance to plant stress". *American Journal of Botany*, 1993. 80(3): p. 239-243.
- [6] J. Peñuelas et al., "Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen-and water-limited sunflower leaves". *Remote sensing of Environment*, 1994. 48(2): p. 135-146.
- [7] H.C. Stimson et al., "Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occurring conifer species: *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma*". *Remote Sensing of Environment*, 2005. 96(1): p. 108-118.
- [8] C. Xu et al., "Monitoring crop water content for corn and soybean fields through data fusion of MODIS and Landsat measurements in Iowa". *Agricultural Water Management*, 2020. 227: p. 105844.
- [9] J. Penueles, I. Filella, C. Biel, L. Serrano & R. Save, "The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status". *International Journal of Remote Sensing*, 1993. 14: p. 1887-1905.
- [10] S.L. Ustin et al., "Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods". *Remote Sensing of Environment*, 1998. 65(3): p. 280-291.
- [11] J. Carlson, and R. Burgan, "Review of users' needs in operational fire danger estimation: the Oklahoma example". *International Journal of remote sensing*, 2003. 24(8): p. 1601-1620.
- [12] E. Chuvieco et al., Improving burning efficiency estimates through satellite assessment of fuel moisture content. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004. 109(D14).
- [13] W. Kong et al., "Estimating Vertical Distribution of Leaf Water Content within Wheat Canopies after Head Emergence". *Remote Sensing*, 2021. 13(20): p. 4125.
- [14] A.F. Goetz et al., "Imaging spectrometry for earth remote sensing". *science*, 1985. 228(4704): p. 1147-1153.
- [15] P.J. Curran, J.A. Kupiec and G.M. Smith, "Remote sensing the biochemical composition of a slash pine canopy. *Geoscience and Remote Sensing*", *IEEE Transactions on*, 1997. 35(2): p. 415-420.
- [16] R. Colombo et al., "Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of

imaging in SWIR and histogram analysis". *Scientific reports*, 2015. 5(1): p. 1-11.

- [31] F. Rasheed, S. Delagrang, and F. Lorenzetti, "Detection of plant water stress using leaf spectral responses in three poplar hybrids prior to the onset of physiological effects". *International Journal of Remote Sensing*, 2020. 41(14): p. 5127-5146.



COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)