



## انتخاب شاخص‌های فراطیفی (باریک‌باند) بهینه برای تخمین محتوای آبی گیاهان، با در نظر گرفتن شرایط متفاوت تراکم تاج پوشش گیاه و خاک پس‌زمینه

مژگان میرزایی<sup>۱</sup>، روشنگر درویش‌زاده\*<sup>۲</sup>، علیرضا شکیبیا<sup>۳</sup>، علی‌اکبر متکان<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲ و ۳. استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۴. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۸/۲۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱/۲۴

### چکیده

با گسترش سنجش از دور فراطیفی، امکان بهره‌گیری از گروه جدیدی از شاخص‌های طیفی - با عنوان شاخص‌های باریک‌باند - برای تخمین پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهان به وجود آمده است. هدف از این مطالعه، مناسب‌ترین نواحی طیفی برای تخمین محتوای آبی گیاه با استفاده از شاخص‌های گیاهی و همچنین بررسی تأثیرات تاج پوشش گیاه و خاک پس‌زمینه در انتخاب این شاخص‌هاست. اندازه‌گیری‌های تاج پوشش گیاه در آزمایشگاه سنجش از دور با استفاده از دستگاه اسپکترومتر GER ۳۷۰۰ صورت گرفت. دو گروه از شاخص‌های گیاهی، با عنوان شاخص‌های نسبتی و شاخص‌های تعدیل‌کننده تأثیر خاک برای برآورد مقدار محتوای آبی گیاه تکوین یافتند و پس از ارزیابی، مقایسه شدند. برای محاسبه شاخص‌های باریک‌باند با استفاده از داده‌های فراطیفی موجود، تمامی ترکیب‌های دوباندی ممکن برای ۵۸۴ باند در دامنه طیفی ۴۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر به‌منظور محاسبه شاخص‌های باریک‌باند و تخمین محتوای آبی گیاه، با استفاده از رگرسیون خطی مورد ارزیابی قرار گرفتند. دقت نتایج تخمین محتوای آبی گیاه با استفاده از شاخص‌ها با باندهای بهینه به‌دست آمده، با استفاده از مقادیر ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و روش Cross-validation سنجیده شد و مورد مقایسه قرار گرفت. به دلیل تنوع در نوع تراکم تاج پوشش‌های گیاهی مورد بررسی و شرایط متفاوت خاک پس‌زمینه، با تقسیم‌بندی گیاهان به دو گروه با خاک پس‌زمینه متفاوت (تیره و روشن)، و همچنین دو تاج پوشش گیاهی مترکم و تنک، این تأثیرات در انتخاب بهترین شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان از آن داشتند که دقت تمامی شاخص‌ها در داده‌های با خاک پس‌زمینه روشن و داده‌های دارای تاج پوشش مترکم، به ترتیب در قیاس با داده‌های دارای خاک پس‌زمینه تیره و تاج پوشش تنک، با دقت بالاتری همراه بودند.  $RMSE_{CV\_dark} = 0.25$ ،  $R^2_{CV\_light} = 0.89$ ،  $R^2_{CV\_dark} = 0.85$ ،  $RMSE_{CV\_thick} = 0.28$ ،  $RMSE_{CV\_thin} = 0.36$ ،  $R^2_{CV\_thick} = 0.81$ ،  $R^2_{CV\_thin} = 0.78$ ،  $RMSE_{CV\_light} = 0.29$  نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، توجه به خاک پس‌زمینه و ساختار تاج پوشش گیاهی را در انتخاب بهترین شاخص و باندهای بهینه برای شاخص‌ها، آشکار می‌سازد.

**کلیدواژه‌ها:** محتوای آبی گیاه (VWC)، سنجش از دور فراطیفی، شاخص‌های باریک‌باند.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، گروه سنجش از دور و GIS، تلفن: ۲۹۹۰۳۱۲۲

## ۱- مقدمه

میان، شاخص‌های طیفی به عنوان مدل‌های تک‌متغیره آماری، از پرکاربردترین تکنیک‌ها در تخمین ویژگی‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهان و از جمله مقدار آب آنهاست. شاخص آبی گیاه معمولاً نسبتی ساده است که از دو طول موج استفاده می‌کند: یک طول موج مربوط به ناحیه‌ای از رفتار طیفی گیاه است که مقدار جذب آب در آن حداقل است و دیگری طول موجی که مقدار جذب در آن متوسط و یا بالاست. از جمله شاخص‌های ایجادشده برای تخمین میزان آب گیاهان، می‌توان به شاخص پهن‌بند نسبتی آب اشاره کرد که Penuelas و همکارانش در سال ۱۹۹۴ آن را به کار گرفتند، و در آن بازتاب گیاه در طول موج‌های ۹۷۰ و ۹۰۰ نانومتر استفاده می‌شود.

در سه دهه گذشته شاخص‌های پهن‌بند برای تخمین محتوای آبی گیاهان بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Tucker, 1979; Penuelas, 1994; Gao, 2002; Ceccato et al., 1996) اما داده‌های سنجش از دور مبتنی بر باندهای پهن به دلیل استفاده از میانگین اطلاعات طیفی در سرتاسر باند برای تخمین ویژگی‌های گیاهی با محدودیت مواجه‌اند. همچنین شاخص‌های مبتنی بر طول موج قرمز (Red) و مادون قرمز نزدیک (NIR) همانند شاخص تفاضلی نرمال‌شده گیاه (NDVI) که برای تخمین ویژگی‌های گیاهی در سه دهه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، با محدودیت‌هایی همراه بوده‌اند از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به اشباع شاخص NDVI، به‌ویژه هنگامی که پوشش گیاهی متراکم است، اشاره کرد (Chen et al., 2005).

Tucker در سال ۱۹۹۷ با استفاده از شاخص NDVI و باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک سنجنده TM/ETM+، و همچنین سنجنده AVHRR برای تخمین VWC استفاده کرد. یکی دیگر از

تخمین دقیق پارامترهای گیاهی، همچون میزان کلروفیل و محتوای آبی گیاه<sup>۱</sup> (VWC) و شاخص سطح برگ<sup>۲</sup> (LAI)، با استفاده از سنجش از دور می‌تواند در تعیین ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاهان مفید باشد (Penuelas, 1994). محتوای آبی گیاه به عنوان شاخصی مهم در کاربردهای مختلف کشاورزی و جنگل‌داری مطرح است (Jackson et al., 2003). تا کنون با استفاده از سنجش از دور، روش‌های گوناگونی برای تخمین محتوای آبی گیاهان به کار رفته‌اند، که از آن جمله‌اند: روش‌های آماری (Chen et al., 2005; Jackson et al., 2003) و روش‌های فیزیکی (Ceccato et al., 2000; Ceccato et al., 2002; zacro-Tejada et al., 2004; suárez et al., 2008; Clevers et al., 2010). محتوای آبی گیاهان، به شکل‌های مختلف در مطالعات بسیاری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از جمله ارزیابی‌های انجام‌گرفته در این زمینه، می‌توان به محتوای آبی نسبی (Penuelas et al., 1993; Riggs et al., 1996; Penuelas et al., 1996) و ظرفیت آب برگ (Penuelas et al., 1993; Penuelas et al., 1996) و محتوای آبی به ازای وزن خشک (Gao et al., 1995) گیاه اشاره کرد. این مطالعات اغلب در مقیاس برگ انجام شده‌اند، و مطالعات چندانی در مورد بررسی رابطه بین شاخص‌های طیفی و محتوای آبی تاج پوشش گیاه موجود نیست (Ceccato et al., 2002; Dawson et al., 2002; Gamon et al., 1999; Sims et al., 1999). از این رو در تحقیق حاضر رابطه شاخص‌ها و محتوای آبی در مقیاس تاج پوشش گیاه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

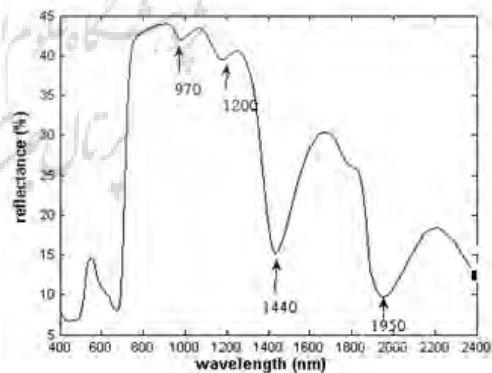
باندهای جذب آب در نواحی طیفی با مراکز ۱۲۰۰، ۹۷۰، ۱۴۵۰ و ۱۹۵۰ نانومتر واقع شده‌اند (Sims et al., 2002) (شکل ۱) که به علت تعدد این باندها در محدوده رفتار طیفی گیاه (۲۵۰۰-۴۰۰ نانومتر)، امروزه تکنیک‌های گوناگونی برای تخمین محتوای آبی گیاه به‌وجود آمده‌اند (Sims et al., 2002; Ceccato et al., 2006; Li et al., 2006; Trombetti et al., 2006; Clevers et al., 2010; Chen et al., 2005).

1. Vegetation Water Content  
2. Leaf area index

انتظار می‌رود که تخمین VWC با استفاده از شاخص‌های باریک‌باند، که از ترکیب تمامی باندهای موجود در سرتاسر طیف بهره می‌برد، نتایج بهتری را نشان دهد. از این رو پیشرفت‌های اخیر در سنجش از دور فراطیفی امکان استفاده از بازتاب طول موج‌های بیشتری را در محدوده طیفی مرئی NIR و SWIR در قیاس با سنجنده‌های چندطیفی فراهم آورده است که برای بررسی ویژگی‌های گیاه بسیار مناسب‌اند. سنجش از دور فراطیفی با بهره‌گیری از باندهای باریک و پیوسته، رفتار بسیار حساس‌تری در برابر ویژگی‌های گیاهان دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که شاخص‌های مبتنی بر باندهای باریک با نتایجی بسیار بهتر از شاخص‌های پهن‌باند، توانسته‌اند ویژگی‌های بیوشیمیایی و بیوفیزیکی گیاه را ارزیابی کنند (Trombetti et al., 2006). با انتخاب باندهای بهینه و همچنین انتخاب شاخص‌هایی که تأثیر خاک پس‌زمینه را کاهش دهد، مطالعات متعددی در زمینه بهبود بخشیدن به شاخص‌ها انجام گرفته، که اغلب با استفاده از شاخص‌های پهن‌باند بوده‌اند.

با توجه به آنچه که ذکر شد، این تحقیق در نظر دارد که ابتدا با استفاده از داده‌های فراطیفی و شاخص‌های گیاهی به برآورد محتوای آبی گیاه پردازد و باندهای بهینه و محدوده‌های طیفی مطلوب در شاخص‌ها را، که برای تخمین محتوای آبی گیاه مناسب‌اند، شناسایی کند. سپس با استفاده از تقسیم داده‌ها به گروه‌هایی با خاک پس‌زمینه روشن و تیره، و همچنین تراکم‌های متفاوت تاج پوشش به بررسی تأثیرات این عوامل بر روی انتخاب بهترین شاخص و نیز بهترین محدوده‌های طیفی در هر یک از شاخص‌ها پردازد. این بدان خاطر است که تغییر در خاک پس‌زمینه و تراکم تاج پوشش جزو عوامل مؤثر بر انتخاب شاخص و برگزیدن باند حساس است؛ و اینها تأثیراتی هستند که با استفاده از باندهای پهن، معمولاً نمی‌توان شناسایی‌شان کرد.

محدودیت‌های شاخص NDVI برای تخمین محتوای آبی، استفاده از دو باند قرمز و مادون قرمز است که این دو باند به ترتیب در محدوده جذب قوی کلروفیل و بازتاب شدید به وسیله تاج پوشش گیاه، واقع شده‌اند. از این رو، شاخص مذکور بیشتر نشان‌دهنده مقدار کلروفیل است تا مقدار آب گیاهان (Chen et al., 2005). شاخص‌های مبتنی بر طول موج‌های بلندتر مادون قرمز از جمله مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR) برای ارزیابی محتوای آبی گیاه مناسب‌ترند (Chen et al., 2005). Gao در سال ۱۹۹۶ شاخصی را با عنوان شاخص تفاضلی نرمال شده آب (NDWI) که از طول موج‌های NIR و SWIR استفاده می‌کرد، برای پیش‌بینی VWC ارائه کرد. Hardisky و همکاران در سال ۱۹۸۳ از شاخص مشابهی با عنوان شاخص تفاضلی نرمال شده مادون قرمز (NDII)، با استفاده از داده‌های سنجنده TM ماهواره لندست برای تخمین VWC استفاده کردند. Chen و همکاران در سال ۲۰۰۵ برای تخمین VWC از طول موج‌های واقع در محدوده طیفی NIR و SWIR - که شامل دو ترکیب باندی ۸۵۸-۱۶۴۰ و ۸۵۸-۲۱۳۰ نانومتر - بود، در شاخص NDWI استفاده کردند.



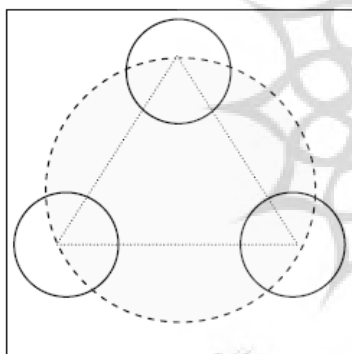
شکل ۱. بازتاب تاج پوشش گیاه و باندهای جذبی آب برای یکی از نمونه‌های گیاهی مورد استفاده در این تحقیق

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

به منظور نمونه‌برداری، چهارگونه گیاهی در شکل و اندازه‌های متفاوت برگ، انتخاب شدند. در مجموع ۲۴ گیاه (از هر گونه ۶ نمونه) در شرایط گلخانه‌ای جمع‌آوری گردید. برای ایجاد تغییرات در ویژگی‌های طیفی برگ، گیاهان به دو دسته مساوی تبدیل شدند. یک دسته در خاکی که از نظر مواد مغذی غنی بود قرار داده شد، و دسته دیگر در خاکی که از نظر مواد مورد نیاز فقیر بود. بدین ترتیب گیاهان در شرایط بدون استرس و بااسترس (از نظر مواد مغذی خاک و همچنین آب مورد نیاز برای رشد) قرار داده شدند. اندازه‌گیری‌های تاج پوشش گیاهان در آزمایشگاه کنترل‌شده سنجش از دور انجام گرفت. در محل اندازه‌گیری، دیوارها و سقف با مواد سیاه‌رنگ مات - به‌منظور جلوگیری از بازتاب‌های زائد - پوشیده شدند. هر بار یک گروه از گیاهان (۳ نمونه) در خاک قرار گرفتند. از هر گروه هشت مرتبه اندازه‌گیری طیفی صورت گرفت و برای هر گروه میانگین این اندازه‌گیری‌ها در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه اسپکترومتر ۳۷۰۰ GER صورت گرفت. محدوده طول‌موج‌های این اسپکترومتر بین ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر است که در محدوده طیفی ۱۰۵۰-۳۵۰ فاصله طول‌موج‌ها ۱/۵ نانومتر، در فاصله ۱۹۰۰-۱۰۵۰ دارای فاصله طیفی ۶/۲ نانومتر، و در ناحیه ۲۵۰۰-۱۹۰۰ دارای فواصل ۹/۵ نانومتری هستند. برای ایجاد تنوع در اندازه‌گیری‌های طیفی و تولید نمونه‌های بیشتر که حداکثر اختلاف را داشته باشند، تغییراتی در حجم تاج پوشش گیاه و خاک پس‌زمینه (متشکل از خاک روشن و تیره) داده شد. در ابتدا دو بستر متفاوت برای گیاهان فراهم گردید: یکی خاک تیره، و دیگری خاک روشن. برای ایجاد تاج پوشش گیاهی سه گیاه هم‌نوع از ۲۴ گیاه موجود به‌صورتی که در شکل ۲ نشان داده شده است یک تاج پوشش را تشکیل دادند (درواقع ۲۴ گیاه موجود،

موجب تشکیل ۸ تاج پوشش گیاهی شدند). سپس اندازه‌گیری هر تاج پوشش یک بار در خاک تیره و یک بار در خاک روشن انجام شد. برای ایجاد تغییر در حجم تاج پوشش‌ها در ۶ مرحله از حجم تاج پوشش‌ها کاسته شد؛ و برای هر تاج پوشش جدید اندازه‌گیری دوباره در دو شرایط زمینه روشن و تیره به‌دست آمد. در نهایت ۹۵ نمونه آماده شد. ۴۸ نمونه در خاک تیره بودند و ۴۷ نمونه در خاک روشن. اندازه‌گیری‌های طیفی از خاک لخت نیز در هر مرحله قبل از اندازه‌گیری‌های تاج پوشش گیاه صورت گرفت. در مجموع ۱۶ اندازه‌گیری خاک لخت به‌دست آمد که ۸ نمونه مربوط به خاک تیره و ۸ نمونه مربوط به خاک روشن است. مقدار VWC نیز با محاسبه اختلاف وزن تر و خشک تمام گیاه، تقسیم بر مساحت سطح به‌دست آمد.



شکل ۲. موقعیت سه نمونه گیاهی و ایجاد یک تاج پوشش گیاهی برای نمونه‌برداری طیفی

## ۲-۲- پیش‌پردازش داده‌های طیفی

به‌دلیل وجود نویز بالا محدوده‌های طیفی کمتری از ۴۰۰ نانومتر و بیشتر از ۲۴۰۰ نانومتر حذف شدند. فیلتر Savitzky-Golay با اندازه پنجره ۱۷ پیکسل و چندجمله‌ای درجه دو، برای از بین بردن نویزهای احتمالی دستگاه اندازه‌گیری طیفی بر روی ماتریس بازتاب‌های طیفی اجرا شد. پردازش‌ها و تحلیل‌های انجام‌شده تماماً با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ۷/۹ انجام گرفتند.

انتخاب شاخص‌های فراطیفی (باریک‌باند) بهینه برای تخمین محتوای آبی گیاهان، با در نظر گرفتن شرایط متفاوت تراکم ...

### ۲-۳- شاخص‌های باریک‌باند طیفی

چهار شاخص گیاهی با استفاده از ۵۸۴ طول موج در این تحقیق ارزیابی شدند. شاخص‌های باریک‌باند مورد استفاده طیفی در این تحقیق، مشتمل بر شاخص‌های نسبتی و از جمله شاخص نسبتی ساده آب<sup>۱</sup> (RWI)، شاخص تفاضلی نرمال‌شده آب<sup>۲</sup> (NDWI)، و شاخص‌های تعدیل‌کننده تأثیر خاک - که شامل شاخص تبدیلی تعدیل‌کننده تأثیر خاک<sup>۳</sup> (TSAVI) و شاخص تعدیل‌کننده تأثیر خاک<sup>۴</sup> (SAVI<sub>۲</sub>) بودند - دسته‌بندی شدند. این شاخص‌ها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. شاخص‌های پهن‌باند معمولاً با استفاده از دو طول موج مشخص محاسبه می‌شوند اما در شاخص‌های فراطیفی مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از ۵۸۴ باند باریک موجود، تمامی ترکیب‌های دوتایی ممکن (شامل ۳۴۱۰۵۶ ترکیب) مورد محاسبه قرار گرفتند. شاخص‌ها یک ماتریس همبستگی ۵۸۴ در ۵۸۴ درایه ایجاد شد که به وسیله این ماتریس بیشترین مقدار همبستگی و دو طول موج مربوط و همچنین

محدوده‌های دارای همبستگی بالا به دست آمدند.

### ۲-۴- استفاده از رگرسیون خطی برای تخمین WVC

مدل‌های رگرسیونی، روش‌های تجربی معمول برای ارتباط دادن بین متغیرهای گیاهی (همانند WVC) و داده‌های به دست آمده از سنجش از دور به شمار می‌آیند. در این تحقیق برای یافتن ارتباط بین شاخص‌های گیاهی و مقدار WVC از رگرسیون خطی استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل، روش Cross Validation به کار برده شد. در روش مذکور هر یک از نمونه‌ها با استفاده از نمونه‌های دیگر تخمین زده می‌شود، به عنوان مثال، برای ۹۵ نمونه موجود، هر مرتبه مدل رگرسیون برای ۹۴ نمونه اجرا شده - و نمونه باقی مانده که در رگرسیون شرکت نداشت - تخمین زده می‌شود و خطای آن محاسبه می‌گردد. از مزایای این روش، توانایی آن در تشخیص outlier هاست، و دیگر اینکه تخمینی نارپ است (Schlerf et al., Darvishzadeh et al., 2008).

جدول ۱. شاخص‌های باریک‌باند مورد استفاده در این تحقیق R نشان‌دهنده بازتاب،  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  طول موج و  $b$  ضرایب به دست آمده از خط خاک با استفاده از دو طول موج  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  است.

نام	شاخص‌های گیاهی	معادله شاخص	مرجع
RWI	شاخص نسبتی آب	$RWI = \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}}$	(Pearson et al., 1972)
NDWI	شاخص اختلاف تفاضلی نرمال‌شده آب	$NDWI = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2}}$	(Gao, 1996)
SAVI <sub>2</sub>	دومین شاخص تعدیل‌کننده تأثیر خاک	$SAVI_2 = \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2} + (a/b)}$	(Major et al., 1990)
TSAVI	شاخص تعدیل‌یافته تعدیل‌کننده تأثیر خاک	$TSAVI = \frac{a(R_{\lambda_1} - aR_{\lambda_2} - b)}{aR_{\lambda_1} + R_{\lambda_2} - ab}$	(Baret et al., 1989)

1. Ratio water index
2. Normalized difference water index
3. Transformed soil adjusted vegetation index
4. Second-soil adjusted vegetation index

حجم تراکم تاج پوشش گیاه، تنوع زیادی در دامنه اندازه‌گیری‌ها ایجاد شد. شکل ۳ (b) مربوط به اندازه‌گیری طیفی مربوط به یک نمونه تنک گیاهی با محتوای آبی یکسان در دو خاک پس‌زمینه تیره و روشن نشان داده شده است. شکل ۳ (a) همین اندازه‌گیری را برای یک نمونه با تاج پوشش متراکم قرار داده شده دو خاک تیره و روشن نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، تغییرات بازتاب برای تاج پوشش تنک (a) بسیار واضح بود؛ اما این تغییر برای تاج پوشش متراکم (b) به دلیل عدم تأثیر خاک پس‌زمینه، تقریباً ناچیز است. از این رو، توجه به ساختار تاج پوشش گیاهی و انتخاب شاخص متناسب با تراکم تاج پوشش، و همچنین شاخصی که تأثیرات خاک پس‌زمینه را در نظر بگیرد، بسیار ضروری به نظر می‌رسد. تغییرات بازتاب در سطح برگ ناشی از ساختار برگ، غلظت مواد شیمیایی و همچنین محتوای آبی است؛ اما در سطح تاج پوشش گیاه، علاوه بر موارد مذکور، عوامل دیگری از جمله ساختار تاج پوشش و خاک پس‌زمینه نیز مؤثرند (Darvishzadeh et al., 2008).

برای به دست آوردن مقدار خطای VWC پیش‌بینی شده نسبت به مقدار واقعی آن، از روش ریشه میانگین مربعات خطای نسبی<sup>۱</sup> (nRMSE<sub>ev</sub>) به عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری دقت رگرسیون استفاده شد. RMSE با استفاده از این معادله به دست می‌آید:

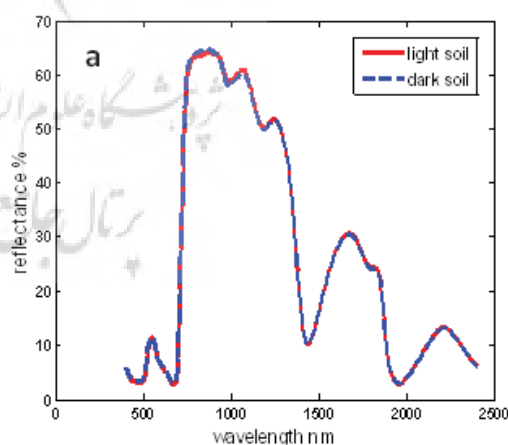
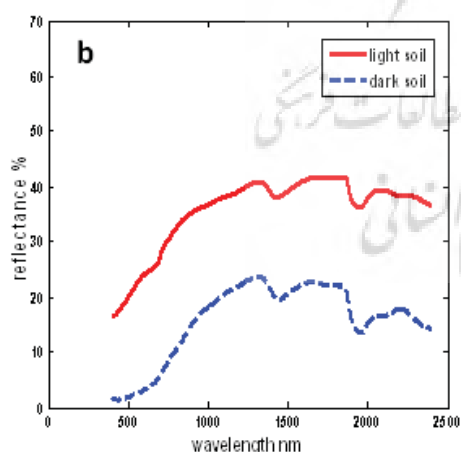
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)^2}{N}}$$

که در این فرمول Y مقدار اندازه‌گیری شده،  $\bar{Y}$  مقدار تخمین زده شده، و N تعداد نمونه‌هاست. مقدار nRMSE از تقسیم مقدار ریشه میانگین مربعات خطا بر میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده VWC به دست آمد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تغییرات در بازتاب‌های طیفی

با توجه به تنظیمات آزمایشگاهی و ایجاد تغییرات در شرایط اندازه‌گیری، از جمله وجود چهار گونه گیاهی در اندازه و شکل ظاهری متفاوت، قرار دادن گیاهان در شرایط با استرس و بدون استرس، وجود خاک پس‌زمینه روشن و تیره و همچنین ۶ مرحله تغییر در



شکل ۳. تأثیرات خاک زمینه بر روی بازتاب‌های طیفی در دو تاج پوشش تنک (a) و تاج پوشش متراکم (b)

1. Root Mean Square Error

انتخاب شاخص‌های فراطیفی (باریک‌باند) بهینه برای تخمین محتوای آبی گیاهان، با در نظر گرفتن شرایط متفاوت تراکم ...

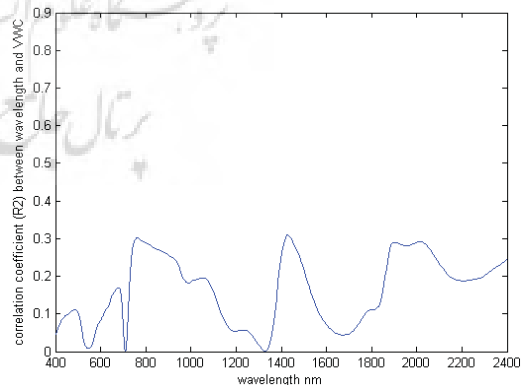
با توجه به شکل، بیشترین مقادیر همبستگی در باندهایی با مراکز ۷۵۰، ۱۴۴۰ و ۱۹۵۰ مشاهده شد؛ اگرچه میزان این همبستگی مقادیر بالایی را نشان نمی‌دهد ( $R^2 < 0.3$ ). نواحی ۱۴۴۰ و ۱۹۵۰، بیشترین جذب به‌وسیله آب گیاهان را دارند و درواقع باندهای جذبی قوی آب به‌شمار می‌آیند. طول موج ۷۵۰ نانومتر، همبستگی بالایی را با میزان آب گیاهان نشان داده است، در منطقه جذب کلروفیل قرار دارد.

همبستگی بین تمامی تک‌باندها و WVC برای گروه‌های خاک پس‌زمینه تیره و روشن و همچنین گروه‌های شامل تاج پوشش متراکم و تنک نیز به صورت جداگانه به‌دست آمدند. مقادیر این همبستگی در شکل ۵ (b: متراکم / تنک و a: تیره / روشن) نمایش داده شده است. مقایسه میزان همبستگی برای دو نمونه با تاج پوشش متراکم و تنک در شکل ۵ (b)، نشان می‌دهد که میزان همبستگی تقریباً در تمامی باندها در نمونه‌های با تاج پوشش متراکم بسیار بیشتر از همبستگی در نمونه‌های دارای تاج پوشش تنک است. محدوده طیفی بین ۷۲۵ و ۱۱۴۰ نانومتر در نمونه‌های متراکم دارای همبستگی بالا ( $R^2 > 0.7$ ) هستند که در مقایسه با تاج پوشش تنک همبستگی بالاتری دارند (مقدار همبستگی در تاج پوشش تنک کمتر از ۰/۱ در این ناحیه است). منشأ این اختلاف، از بین رفتن تأثیرات خاک پس‌زمینه در تاج پوشش متراکم است که باعث افزایش همبستگی تک‌باندها در این ناحیه طیفی در تاج پوشش متراکم شده است. در نمونه‌های متعلق به خاک تیره، که در شکل ۵ (a) نشان داده شده است، بیشترین مقدار در محدوده طیفی ۷۴۰ و ۱۹۵۰ نانومتر مشاهده می‌شود. مقدار  $R^2$  در این دو ناحیه حدود ۰/۵۳ است. در خاک روشن مقادیر بالای همبستگی در نواحی طیفی ۴۹۰، ۶۸۰، ۱۴۲۰ و ۱۹۵۰ نانومتر به‌دست آمد. باندهای ۴۹۰، ۶۸۰ و ۷۴۰ نانومتر هیچ یک در نواحی جذبی آب قرار ندارند، اما دیگر باندها در ناحیه جذبی آب واقع‌اند.

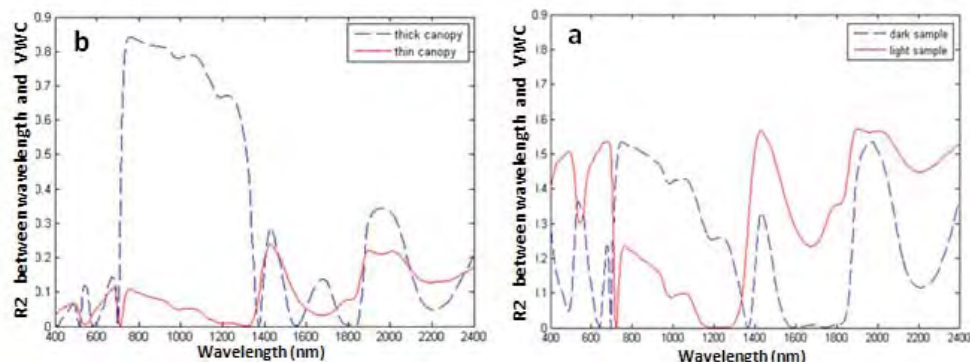
از این رو، برای در نظر گرفتن این تغییرات و انتخاب شاخص مناسب، نمونه‌ها به چند زیرگروه - که شامل گروه خاک پس‌زمینه تیره و روشن و نمونه‌های متشکل از تاج پوشش متراکم و تنک است - تقسیم شدند. تمامی شاخص‌ها برای کل مجموعه و گروه‌های پیش‌گفته اجرا شدند؛ اما از آنجا که داده‌های فراطیفی موجود، که با استفاده از دستگاه اسپکترومتر در آزمایشگاه سنجش از دور به‌دست آمدند، دربرگیرنده محدوده‌های جذب بخار اتمسفر نیز هستند و اغلب سنجنده‌ها در این محدوده‌ها، به دلیل وجود تأثیرات اتمسفری محدوده‌های طیفی ۱۴۵۰-۱۳۵۰، ۱۹۵۰-۱۸۵۰ و ۲۱۵۰-۲۱۵۰ نانومتر، حذف شدند و شاخص‌ها با استفاده از این بازتاب‌ها برای گروه داده‌های شامل هر ۹۵ نمونه به اجرا درآمدند.

### ۲-۳- رابطه باندهای منفرد فراطیفی و WVC

پیش از محاسبه بهترین ترکیبات طیفی دوتایی برای هر یک از شاخص‌ها و تخمین WVC با استفاده از رگرسیون و شاخص‌ها به عنوان متغیر مستقل، میزان همبستگی بازتاب‌ها در ۵۸۴ باند باریک طیفی، و مقدار WVC به‌طور جداگانه با مقدار WVC بررسی شد (شکل ۴).



شکل ۴. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) به‌دست آمده میان تک‌باندهای طیفی و WVC، با استفاده از تمامی نمونه‌ها



شکل ۵. مقایسه ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>) بین تک‌باند‌ها و VWC در نمونه‌های با خاک پس‌زمینه تیره و روشن (a) و تاج پوشش گیاهی متراکم و تنک (b)

مقادیر R<sup>2</sup> و RMSE برای تمامی این شاخص‌ها با باندهای متفاوت به دست آمد. از آنجا که مقادیر R<sup>2</sup> و RMSE بسیار نزدیک به هم بودند، بر روی RMSE تست ANOVA انجام گرفت؛ و چون این تست برای مقادیر به دست آمده معنادار نبود (P > 0.05)، برای هر یک از شاخص‌ها، دوباندی که با استفاده از آنها در رگرسیون بالاترین مقدار R<sup>2</sup> و پایین‌ترین مقدار RMSE به دست آمد، انتخاب شدند. در شکل ۶ مقادیر همبستگی بین شاخص‌ها برای هر یک از دو باند طیفی موجود و VWC به صورت پلات دوبعدی نشان داده شده است. بر اساس مقادیر R<sup>2</sup>، که در این پلات نشان داده شده است، ترکیبات باندی بهینه را برای هر یک از شاخص‌ها که بیشترین مقدار همبستگی را با VWC دارند، می‌توان شناسایی کرد. در این شکل نواحی طیفی دارای همبستگی بالا با VWC، با رنگ تیره‌تر کاملاً مشخص‌اند. بدین ترتیب، علاوه بر تشخیص باندهای باریک طیفی (λ) که دارای همبستگی بالا با VWC هستند، می‌توان محدوده‌های طیفی (Δλ) را نیز برای هر یک از شاخص‌ها شناسایی کرد. این محدوده‌ها با همبستگی بالا می‌توانند برای تصاویر به دست آمده از سنجنده‌های چندطیفی، که باندهایی پهن‌تر از داده‌های فراطیفی دارند، مورد استفاده قرار بگیرند؛ و حتی می‌توان برای طراحی باندهای

### ۳-۳- شاخص‌های باریک‌باند و ارتباط آنها با مقدار VWC

چهار شاخص باریک‌باند و همبستگی آنها با محتوای آب تاج پوشش گیاه با استفاده از این داده‌ها محاسبه شدند: ۱. داده‌های تمامی ۹۵ نمونه (برای تمامی بازتاب‌ها و بازتاب‌های بدون طول‌موج‌های جذب بخار آب اتمسفر)؛ ۲. داده‌های نمونه‌های قرارگرفته در خاک دارای پس‌زمینه تیره (۴۸ نمونه) و روشن (۴۷ نمونه) به طور جداگانه؛ و ۳. نمونه‌های دارای تاج پوشش گیاهی متراکم (۳۷ نمونه) و تاج پوشش گیاهی تنک (۵۸ نمونه) به طور جداگانه.

ترکیبات باندی بهینه برای هر ۴ شاخص در هر یک از گروه‌های مذکور به دست آمدند. برای انتخاب بهترین ترکیب باندی برای هر چهار شاخص ذکرشده، ابتدا ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>) میان شاخص‌های ایجادشده (برای هر یک از ترکیبات دوتایی متشکل از دو باند طیفی متفاوت) و مقدار آب اندازه‌گیری شده گیاه (VWC)، محاسبه شد. پس از محاسبه ماتریس همبستگی مقادیر بالای R<sup>2</sup> انتخاب شدند (0.80/، 0.75/). شاخص‌های مربوط به این باندها تشکیل گردیدند و به طور مجزا در رگرسیون قرار داده شدند و

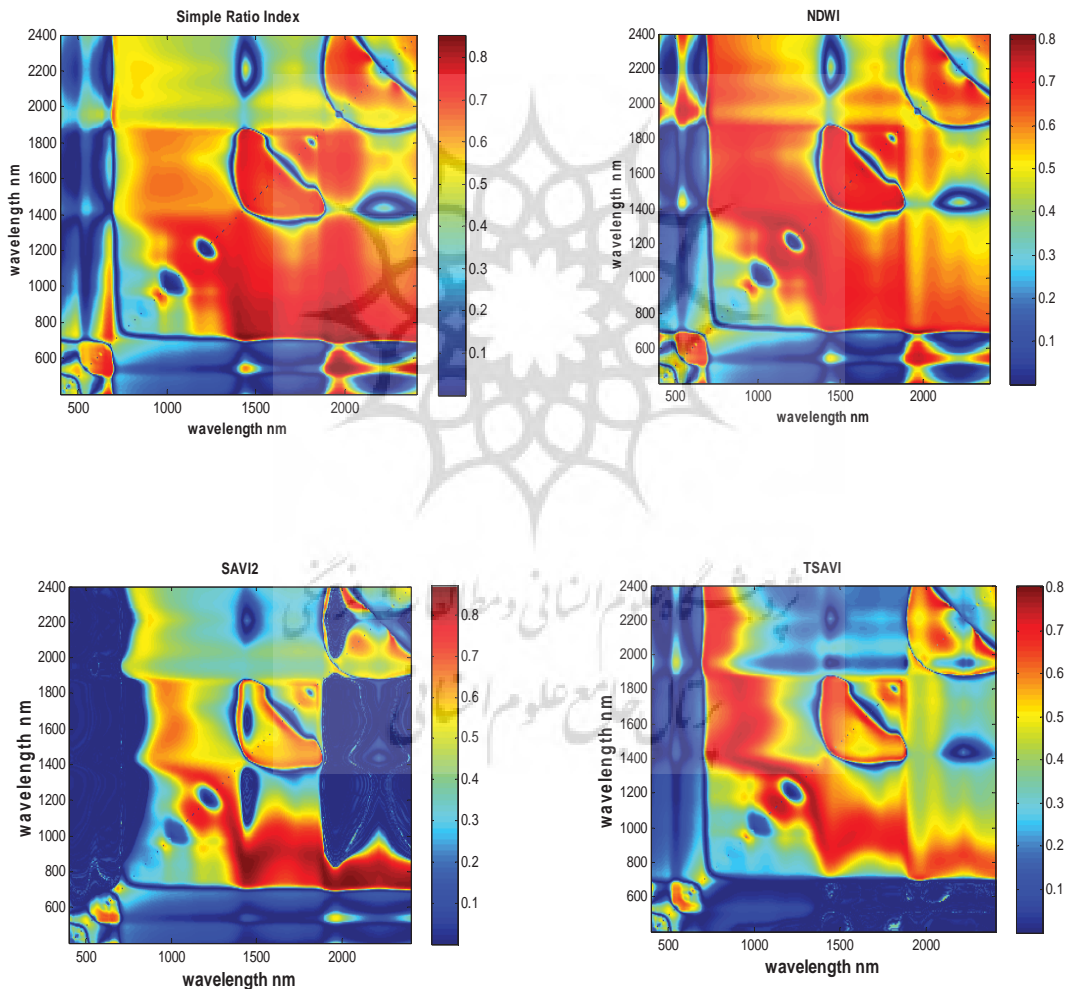


انتخاب شاخص‌های فراطیفی (باریک‌باند) بهینه برای تخمین محتوای آبی گیاهان، با در نظر گرفتن شرایط متفاوت تراکم ...

همین خاطر برای ارزیابی محتوای آبی گیاهان، مناسباند (Maki et al., 2004).

ضرایب همبستگی و موقعیت بهترین باندهای تشکیل‌دهنده شاخص‌های طیفی برای تمامی نمونه‌ها (شامل تمامی بازتاب‌ها و بازتاب‌های بدون نواحی حذف) و همچنین نمونه‌های دربرگیرنده نوع خاک پس‌زمینه و سرانجام حجم تاج پوشش در جدول ۳ نشان داده شده است.

سنجندها به منظور اهداف خاص (مثلاً طراحی یک باند برای تشخیص استرس آبی گیاهان) از آنها استفاده کرد. همان‌طور که Colombo و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیق خود اشاره کرده‌اند و در شکل ۶ (RWI و SAVI۲) نیز مشخص است، باندهای جذبی آب در محدوده‌های SWIR بیشتر پاسخگوی محتوای آبی گیاه در مقایسه با باندهای واقع در محدوده NIR هستند و با تقسیم باندهای این محدوده (SWIR) به مقادیر بازتاب نواحی NIR، تأثیرات ساختار و حجم گیاه از بین می‌رود و به



شکل ۶. نمایش دوبعدی میزان همبستگی ( $R^2$ ) بین VWC و شاخص‌های باریک‌باند به‌دست‌آمده، که برای تمامی نمونه‌ها (۹۵ نمونه) محاسبه شده است.

آب اتمسفر، نشان داد که شرایط اتمسفری بر روی انتخاب باند بهینه در این دو شاخص، تأثیر فراوان می‌نهد (جدول ۲).

در دو گروه داده با خاک پس‌زمینه تیره و روشن، هر چهار شاخص به‌دست‌آمده دارای ضریب همبستگی بالایی با مقدار VWC بودند (جدول ۳). اما ضریب همبستگی در داده‌های دارای خاک پس‌زمینه روشن، بالاتر از خاک پس‌زمینه تیره بود. نتایج موجود در جدول ۳ نشان می‌دهد که با تغییر تأثیرات پس‌زمینه، هم باندهای بهینه برای شاخص‌ها تغییر می‌کند و هم میزان همبستگی بین شاخص و VWC؛ و در نظر گرفتن این تأثیرات در شناسایی باندهای بهینه ضروری است.

باندهای بهینه به‌دست‌آمده برای دو شاخص RWI و NDWI قبل و بعد از حذف نواحی طیفی واقع در محدوده جذب اتمسفر تقریباً مشابه‌اند و از این رو می‌توان نتایج به‌دست‌آمده برای این دو شاخص را برای تصاویر ماهواره‌ای، که اغلب در محدوده‌های جذب اتمسفر تصویربرداری نمی‌کنند، تعمیم داد؛ زیرا هنگام حذف نواحی جذب اتمسفر تغییر چندانی در محدوده‌های طیفی ایجاد نشد (در حد چند نانومتر)، اما باندهای به‌دست‌آمده در دو شاخص SAVI2 و TSAVI قبل و بعد از حذف باندهای جذب اتمسفر، کاملاً متفاوت بودند. در واقع، مقایسه نتایجی که با در نظر گرفتن اندازه‌گیری‌های طیفی که شامل باندهای جذب بخار اتمسفر بودند (با استفاده از دستگاه‌های اسپکترومتر بر روی زمین) با نتایج حاصل از حذف بخار

جدول ۲. موقعیت باندها و مقدار  $R^2$  به‌دست‌آمده بین VWC و بهترین شاخص باریک‌باند، با استفاده از تمامی نمونه‌ها

VI	مجموعه کل نمونه‌ها، شامل تمامی باندهای طیفی			مجموعه کل نمونه‌ها، شامل بازتاب‌های طیفی فاقد محدوده‌های طیفی جذب اتمسفر		
	$R^2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$R^2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
RWI	۰/۸۵	۷۲۰	۱۴۱۸	۰/۸۴	۷۲۳	۱۴۶۴
NDWI	۰/۸۱	۶۷۹	۱۹۶۵	۰/۸۱	۶۹۷	۱۹۶۵
SAVI2	۰/۸۶	۸۲۵	۱۴۴۳	۰/۸۵	۷۳۹	۲۰۳۰
TSAVI	۰/۸۰	۲۱۳۵	۲۲۳۷	۰/۷۷	۱۳۳۸	۱۱۳۲

جدول ۳. موقعیت باندها و مقدار  $R^2$  به‌دست‌آمده بین VWC و بهترین شاخص باریک‌باند، با استفاده از داده‌ها با تاج پوشش متراکم و تنک و خاک پس‌زمینه روشن و تیره

VI	داده‌ها با تاج پوشش متراکم			داده‌ها با تاج پوشش متراکم			داده‌ها با خاک پس‌زمینه روشن			داده‌ها با خاک پس‌زمینه تیره		
	$R^2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$R^2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$R^2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$R^2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
RWI	۰/۸۴	۲۲۷۳	۲۱۲۵	۰/۷۸	۱۲۱۱	۱۳۲۱	۰/۹۱	۱۸۵۸	۱۴۴۱	۰/۸۶	۷۱۶	۱۹۶۵
NDWI	۰/۸۳	۲۲۷۳	۲۱۲۵	۰/۷۷	۱۲۱۱	۱۳۲۱	۰/۹۱	۱۹۴۳	۵۹۸	۰/۸۵	۲۱۹۵	۲۱۶۵
SAVI2	۰/۹۱	۷۳۳	۱۴۴۱	۰/۷۸	۱۰۹۶	۱۳۵۲	۰/۸۸	۱۴۵۶	۱۴۴۱	۰/۸۵	۵۲۹	۱۹۶۵
TSAVI	۰/۸۵	۲۰۰۹	۷۱۳	۰/۷۸	۱۳۲۱	۱۲۲۹	۰/۸۸	۱۴۵۶	۱۴۴۱	۰/۸۲	۲۲۲۵	۲۱۴۵

انتخاب شاخص‌های فراطیفی (باریک‌باند) بهینه برای تخمین محتوای آبی گیاهان، با در نظر گرفتن شرایط متفاوت تراکم ...

- که باند جذبی قوی است - قرار دارند. از دیگر نتایج حاصل از تغییرات حجم تاج پوشش، می‌توان به ضریب همبستگی بالاتر بین شاخص‌ها و WVC در تاج پوشش متراکم در قیاس با تاج پوشش تنک اشاره کرد که این افزایش همبستگی به دلیل از بین رفتن تأثیرات خاک پس‌زمینه در تاج پوشش‌های متراکم است و دیگر اینکه شاخص SAVI2 بیشترین همبستگی را با مقدار WVC در هر دو گروه نشان داد؛ اگرچه در تاج پوشش تنک مقدار همبستگی در تمامی شاخص‌ها تقریباً یکسان بودند.

#### ۳-۴- تخمین Cross validate شده WVC، با استفاده از شاخص‌های به‌دست‌آمده در رگرسیون خطی

دقت روش‌هایی که WVC به‌وسیله آنها تخمین زده شد، با روش cross validation مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی‌ها برای هر سه گروه از نمونه‌ها در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. دقت تخمین برای داده‌ها شامل تمامی ۹۵ نمونه در دو شاخص RWI و SAVI2، از دو شاخص دیگر با اختلاف‌اند که بالاتر بود (جدول ۴).

Sim و Gamon در مطالعه‌شان در سال ۲۰۰۲، مشخص ساختند که در تاج پوشش‌های متراکم طول‌موج‌هایی که جذب‌شان به‌وسیله آب در گیاه ضعیف است، در مقایسه با باندهایی که جذب‌شان متوسط تا زیاد است، آب گیاه را بهتر نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، در واقع اینها حساسیت بیشتری به میزان آب در گیاه دارند، چرا که باندهایی که جذب‌شان به‌وسیله آب قوی است، در سطح تاج پوشش گیاه جذب می‌شوند و به داخل تاج پوشش گیاه نفوذ نمی‌کنند. این در حالی است که باندهایی با جذب متوسط و ضعیف به داخل تاج پوشش گیاه نفوذ می‌کنند و نماینده محتوای آبی کل تاج پوشش‌اند. نتایج حاصل از نمونه‌های با تاج پوشش متراکم و تنک (جدول ۳) نشان داد که محدوده مادون قرمز به مرکز باند جذبی آب ۲۲۵۰ نانومتر به محتوای آبی در تاج پوشش‌های متراکم‌تر، حساس‌تر از دیگر باندهای جذب آب بود. طول‌موج ۲۲۵۰ باند جذبی ضعیف به‌وسیله آب است (Sims et al., 2002) و همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، باندهای بهینه به‌دست‌آمده در تاج پوشش متراکم برای دو شاخص RWI و NDWI در محدوده این باند واقع شده‌اند و در تاج پوشش تنک، اغلب باندهای انتخابی در محدوده باند جذبی ۱۲۵۰

جدول ۴. مقادیر R<sup>2</sup> و RMSE به‌دست‌آمده با روش Cross validation برای تخمین WVC با استفاده از تمامی نمونه‌ها

VI	مجموعه کل نمونه‌ها، شامل تمامی باندهای طیفی		مجموعه کل نمونه‌ها، شامل بازتاب‌های طیفی فاقد محدوده‌های طیفی جذب اتمسفر	
	R <sup>2</sup> <sub>cv</sub>	RMSE <sub>cv</sub>	متغیر وابسته	R <sup>2</sup> <sub>cv</sub>
RWI*	۰/۸۴	۰/۳۶	RWI*	۰/۸۳
NDWI*	۰/۷۹	۰/۴۱	NDWI*	۰/۷۹
SAVI2*	۰/۸۵	۰/۳۵	SAVI2*	۰/۸۵
TSAVI*	۰/۷۸	۰/۴۲	TSAVI*	۰/۷۵

\* P < ۰/۰۰۱

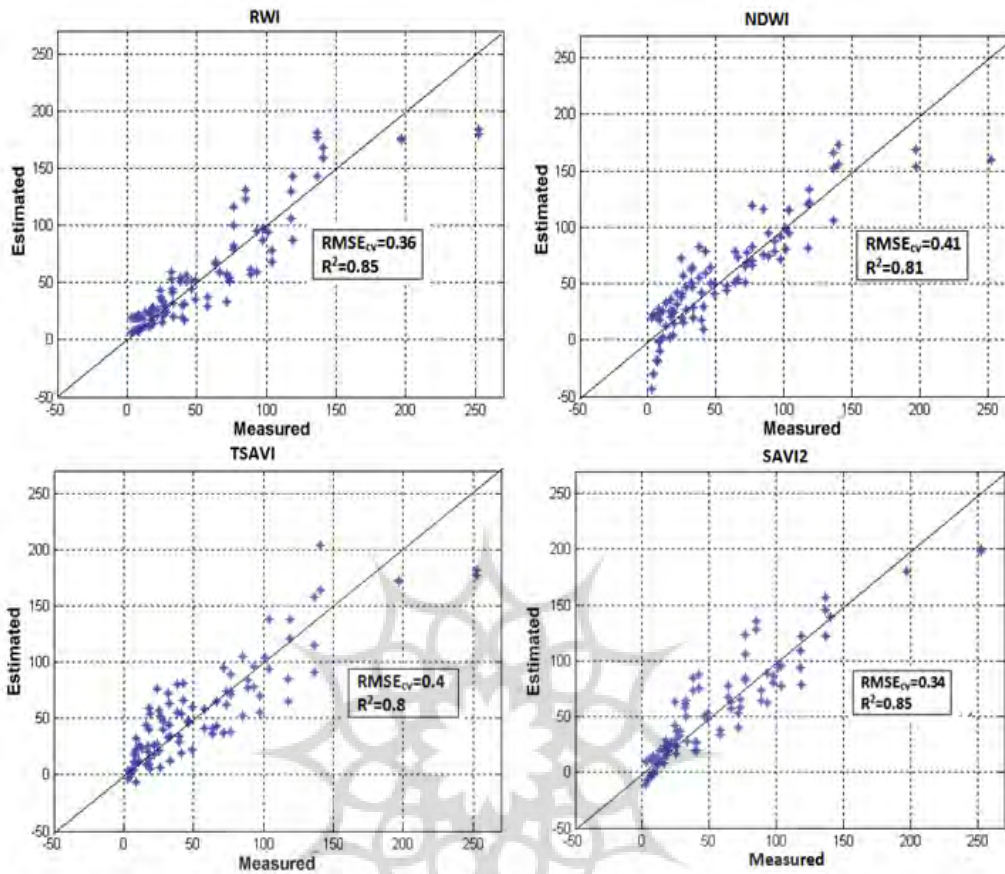
هنگامی باشد که مقادیر آب افزایش می‌یابد؛ اگرچه تنها دو نمونه به تنهایی برای نتیجه‌گیری در مورد اشباع شدن یک شاخص کافی نیست و برای تصمیم در این باره، به نمونه‌های بیشتری نیاز است. شاخص SAVI۲ در این دو نمونه اشباع نشد. مشکل اشباع دقت تخمین را کاهش می‌دهد و این مشکل در شاخص‌های دو باندی در برابر پارامترهای گیاهی معمولاً به‌وجود می‌آید (Thenkabail et al., 2000). این مشکل بدین صورت است که در گیاهان متراکم مقدار پوشش برگ‌ها به ۱۰۰ درصد می‌رسد و پارامترهای گیاهی مانند LAI و VWC همچنان با افزایش تراکم تاج پوشش، فزونی می‌گیرند. اما هنگامی که تراکم تاج پوشش به ۱۰۰ درصد می‌رسد، مقدار بازتاب در باند جذبی کاهش مختصری خواهد داشت. اما در مقابل، میزان بازتاب در طول موج انعکاسی همچنان افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، افزایش اندکی در شاخص‌های نسبتی که به صورت کسر هستند، به دلیل کاهش اندک در مخرج کسر - یعنی باند جذبی - ایجاد می‌شود. در نتیجه افزایش در مقدار VWC (به دلیل افزایش تراکم تاج پوشش)، منجر به افزایش اندک در شاخص می‌شود. به همین دلیل شاخص‌ها در تاج پوشش‌های متراکم توان پیش‌بینی درست پارامتر را ندارند (Trombetti et al., 2006).

جدول ۵ نیز نتایج حاصل از تخمین VWC را با استفاده از داده‌های دارای خاک پس‌زمینه متفاوت و همچنین تراکم تاج‌پوشش مختلف، نشان می‌دهد. هر چهار شاخص باریک‌باند بهینه در نمونه‌های خاک روشن، تخمین‌گرهای بهتری از شاخص‌های به‌دست‌آمده با استفاده از خاک تیره بودند. مقادیر  $RMSE_{CV}$  برای نمونه‌های با خاک پس‌زمینه روشن بین ۰/۲۹ تا ۰/۳۴ تغییر می‌کند؛ در حالی که برای خاک تیره این مقدار بین ۰/۳۵ تا ۰/۴۰ است. بهترین شاخص در خاک روشن و تیره، شاخص RWI با مقدار  $R^2_{CV}$  به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۸۵ بود (جدول ۵). شکل ۷ رابطه بین مقادیر برآوردشده VWC با استفاده از رگرسیون خطی، و شاخص‌ها و مقدار اندازه‌گیری شده آنها را نشان می‌دهد. در شکل نیز می‌توان دید که تمامی شاخص‌های باریک‌باند توانایی زیادی در تخمین VWC گیاهان دارند و تقریباً دقت چهار شاخص مذکور یکسان است؛ اما دو شاخص SAVI۲ و WI با اختلافی اندک در قیاس با دو شاخص دیگر، مقدار VWC را بهتر تخمین زده‌اند. در سه شاخص RWI و NDWI و TSAVI آشکارا دیده می‌شود دو نمونه‌ای که دارای محتوای آبی بیشتری از دیگر نمونه‌ها هستند، خطای بیشتری هم از دیگر نمونه‌ها با محتوای آبی کمتر دارند، این خود می‌تواند نشان‌دهنده اشباع شدن شاخص در

جدول ۵. مقادیر  $R^2$  و  $RMSE$  به‌دست‌آمده با روش Cross validation برای تخمین VWC. با استفاده از نمونه‌های دارای تاج پوشش گیاهی متراکم و تنک، و همچنین نمونه‌های دارای خاک پس‌زمینه روشن و تیره

VI	داده‌ها با تاج پوشش متراکم			داده‌ها با تاج پوشش تنک			داده‌ها با خاک پس‌زمینه روشن			داده‌ها با خاک پس‌زمینه تیره		
	$R^2_{CV}$	$nRMSE_{CV}$	p-value	$R^2_{CV}$	$nRMSE_{CV}$	p-value	$R^2_{CV}$	$nRMSE_{CV}$	p-value	$R^2_{CV}$	$nRMSE_{CV}$	p-value
RWI	۰/۸۱	۰/۲۸	.	۰/۷۸	۰/۳۶	<۰/۰۰۱	۰/۸۹	۰/۲۹	.	۰/۸۵	۰/۳۵	<۰/۰۰۵
NDWI	۰/۸۱	۰/۲۸	.	۰/۷۷	۰/۳۶	<۰/۰۰۱	۰/۸۸	۰/۳۰	.	۰/۸۲	۰/۳۷	.
SAVI2	۰/۹۰	۰/۲۰	<۰/۰۰۱	۰/۷۸	۰/۳۵	.	۰/۸۵	۰/۳۳	.	۰/۸۱	۰/۳۹	.
TSAVI	۰/۷۸	۰/۳۲	.	۰/۷۶	۰/۳۶	<۰/۰۰۱	۰/۸۵	۰/۳۴	<۰/۰۰۱	۰/۷۹	۰/۴۱	<۰/۰۰۱

انتخاب شاخص‌های فراطیفی (باریک‌باند) بهینه برای تخمین محتوای آبی گیاهان، با در نظر گرفتن شرایط متفاوت تراکم ...



شکل ۷. تخمین میزان VWC، با استفاده از روش Cross-validation، به وسیله بهترین شاخص‌های باریک‌باند به دست آمده (۹۵ نمونه و تمامی باندهای طیفی)

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پس‌زمینه و نوع تاج پوشش و همچنین برای شاخص‌های مختلف تغییر می‌کند. باندهای انتخابی جذب آب اغلب در محدوده طول موج‌های ۱۲۵۰، ۱۹۵۰، ۱۴۵۰ و ۲۲۵۰ بودند. باند جذبی ۹۷۰، که در بسیاری از مطالعات به عنوان باند حساس به میزان آب انتخاب شده بود، در هیچ یک از شاخص‌ها در شرایط مختلف به عنوان باند بهینه انتخاب نشد. در تاج پوشش‌های متراکم، باندهای بهینه بیشتر در محدوده باند جذبی ضعیف ۲۲۵۰ و برای تاج پوشش‌های تنک در محدوده ۱۲۵۰ نانومتر دیده شدند. نتایج همچنین نشان‌دهنده افزایش همبستگی تمامی شاخص‌ها در نمونه‌های دارای خاک پس‌زمینه روشن بودند. این

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در این تحقیق باندهای بهینه برای تخمین محتوای آبی گیاه در شرایط متفاوت به دست آمدند. نتایج نشان از آن داشتند که عوامل بسیاری وجود دارند که می‌توانند بر روی دقت هر شاخص برای تخمین پارامتر گیاهی و از آن میان محتوای آبی تأثیرگذار باشند. از جمله این عوامل می‌توان به حجم تاج پوشش گیاه، خاک پس‌زمینه و حتی شرایط سلامت گیاه اشاره کرد. از این رو، انتخاب شاخص مناسب برای تخمین پارامترهای گیاهی بسیار سخت است و عوامل متعددی بر انتخاب آنها تأثیر می‌نهند. همچنین باند بهینه با تغییر در خاک

- Chen, D., Huang, J., & Jackso, T.J., 2005, **Vegetation Water Content Estimation for Corn and Soybeans Using Spectral Indices Derived from MODIS Near- and Short-wave Infrared Bands.**
- Clevers, J., Kooistra, L., & Schaepma, M., 2010, **Estimating Canopy Water Content Using Hyperspectral Remote Sensing Data,** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 12, 119–125.
- Colombo, R., Meroni, M., Busetto, L., Rossini, M., Giardino, C., & Panigada, C., 2008, **Estimation of Leaf and Canopy Water Content in Poplar Plantations by Means of Hyperspectral Indices and Inverse Modeling,** 112, 1820–1834.
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Atzberger, C. & Wieren, S.V., 2008, **Estimation of Vegetation LAI from Hyperspectral Reflectance Data: Effects of Soil Type and Plant Architecture,** 10, 358-373.
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., Atzberger, C., Corsi, F. & Cho, M., 2008, **LAI and Chlorophyll Estimation for a Heterogeneous Grassland Using Hyperspectral Measurements,** 63.
- Dawson, T., Curran, P., North, P., & Plummer, S., 1999, **The Propagation of Foliar Biochemical Absorption Features in Forest Canopy Reflectance: A Theoretical Analysis,** 67, 147-159.
- نتایج، نشان از اهمیتِ اطلاعاتِ جانبی در مورد گیاه، شرایط خاک پس‌زمینه و همچنین ساختار تاج پوشش گیاه، برای انتخاب شاخص مناسب داشتند. به طور کلی نتایج حاصل از شاخص‌های باریک‌باند با استفاده از داده‌های فراطیفی، این امکان را فراهم آورد که بتوان تغییرات جزئی در باندهای بهینه را - که بر اثر تغییر در عواملی مانند خاک پس‌زمینه و تراکم حجم تاج پوشش ایجاد شدند - مشاهده کرد. این تغییرات به هنگام استفاده از باندهای پهن‌باند سنجنده‌های چندطیفی اغلب مشاهده‌پذیر نیستند، چرا که این تغییرات در محدوده یک باند رخ می‌دهند و به همین خاطر تمایزپذیر نیستند.
- ۵- منابع**
- Baret, F., Guyot, G., & Major, D., 1989, **TSAV: A Vegetation Index which Minimizes Soil Brightness Effect on LAI and APAR Estimation,** 12th Canadian Symposium on Remote Sensing.
- Ceccato, P., Flasse, S., & Gre'goire, J., 2002, **Designing a Spectral Index to Estimate Vegetation Water Content from Remote Sensing Data :part 2,** 82, 198-207.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., & Gregoire, J.M., 2000, **Detecting Vegetation Leaf Water Content Using Reflectance in the Optical Domain,** Remote Sensing of Environment 77, (2001), 22– 33.
- Ceccato, P., Gobron, N., Flasse, S., Pinty, B. & Tarantola, S., 2002, **Designing a Spectral Index to Estimate Vegetation Water Content from Remote Sensing Data: Part 1 Theoretical approach,** Remote Sensing of Environment 82, 188–197.

- Gamon, J., Qiu, H., Roberts, D., Ustin, S., Fuentes, D., Rahman, A. et al., 1999, **Water Expressions from Hyperspectral Reflectance: Implications for Ecosystem Flux Modeling.**
- Gao, B. C., & Goetz, 1995, **Retrieval of Equivalent Water Thickness and Information Related to Biochemical Components of Vegetation Canopies from AVIRIS Data**, 52, 155-162.
- Gao, B.C., 1996, **NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space**, *Remote Sensing of Environment*, 58, 257– 266.
- Jackson, T.J., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson, M., Walthall, C. et al., 2003, **Vegetation Water Content Mapping using Landsat Data Derived Normalized Difference Water Index for Corn and Soybeans**, *Remote Sensing of Environment*, 92, 475–482.
- Li, L., Cheng, Y.B., Ustin, S., Hu, X.T., & Riano, D., 2006, **Retrieval of Vegetation Equivalent Water Thickness from Reflectance Using Genetic Algorithm (GA)-Partial Least Squares (PLS) Regression.**
- Major, D., Baret, F., & Guyot, G., 1990, **A Ratio Vegetation Index Adjusted for Soil Brightness**, 11 (5), 727-740.
- Maki, M., Ishihara, M., & Tamura, M., 2004, **Estimation of Water Status to Monitor the Risk of Forest Fires by Using Remotely Sensed Data**, 90, 441-450.
- Pearson, R., & Miller, L., 1972, **Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of Productivity of the Short-grass Prairie**, Pawnee national Grassland , colorado. 8th International Symposium of Remote Sensing of Environment 14, 1-3.
- Peñuelas, J., Filella, I., Serrano, L., & Save., 1996, **Cell Wall Elasticity and Water Index (R970 nm/R900 nm) in Wheat under Different Nitrogen Availabilities**, 17, 373-382.
- Peñuelas, J.J., 1994, **Reflectance Indices Associated with Physiological Changes in Nitrogen- and Water-limited**, *Remote Sensing of Environ.*
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C. & Serrano, L., 1993, **The Reflectance at the 950– 970 nm Region as an Indicator of Plant Water Status**, 14, 1887–1905.
- Riggs, G.A., & Running, S.W., 1991, **Detection of Canopy Water Stress in Conifers Using the Airborne Imaging Spectrometer**, 35, 51– 68.
- Schlerf, M., Atzberger, C., & Hill, J., 2005, **Remote Sensing of Forest Biophysical Variables Using HyMap Imaging Spectrometer Data.**
- Sims, D.A., & Gamon, J.A., 2002, **Estimation of Vegetation Water Content and Photosynthetic Tissue Area from Spectral Reflectance: A Comparison of Indices based on Liquid Water and Chlorophyll Absorption Features**, *Remote Sensing of Environment* 84 (2003), 526–537.

- Suárez, L., Zarco-Tejada, P., & Berni, J., 2008, **Modelling PRI for Water Stress Detection Using Radiative Transfer Models**, Remote Sensing of Environment 113 (2009), 730-744.
- Thenkabail, P., Smith, R., & De Pauw, E., 2000, **Hyperspectral Vegetation and Their Relationships with Agricultural crop Characteristics**, 71 (2), 158-182.
- Trombetti, M., Riaño, D., Rubio, M., Cheng, Y., & Ustin, S., 2006, **Multi-temporal Vegetation Canopy Water Content Retrieval and Interpretation Using Artificial Neural Networks for the Continental USA**.
- Trombetti, M., Riaño, D., Rubio, M., Cheng, Y., & Ustin, S., 2006, **Multi-temporal Vegetation Canopy Water Content Retrieval and Interpretation Using Artificial Neural Networks for the Continental USA**.
- Tucker, C. J., 1979, **Monitoring Vegetation Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation**, Remote Sensing of Environment, 8, 127-150.
- Zarco-Tejada, P., Millerb, J., Moralesc, A., Berjo'na, A., & Agu'era, J., 2004, **Hyperspectral Indices and Model Simulation for Chlorophyll Estimation in Open-canopy Tree Crops**, Remote Sensing of Environment 90, 463-476.

