



دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد شانزدهم، شماره دوم، ۱۳۸۸

www.gau.ac.ir/journals

ارزیابی حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی با استفاده از تابع حساسیت در برآورد حجم سرپای توده‌های جنگلی

جهانگیر محمدی^۱ و *شعبان شتایی^۲

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۲ دانشیار گروه جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

چکیده

یکی از مشکلات مهم بوم‌شناسان شناسایی بهترین شاخص‌ها جهت استفاده در تجزیه و تحلیل‌های کمی جنگل و پوشش‌های گیاهی می‌باشد. هدف از این تحقیق ارزیابی حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به مشخصه حجم سرپا، جهت انتخاب بهترین شاخص طیفی گیاهی برای تهیه مدل حجم سرپا و مقایسه آن با مدل حاصل شده از روش رگرسیون بهترین زیرمجموعه می‌باشد. همچنین حساسیت این شاخص‌ها نسبت به یکدیگر با استفاده از تابع حساسیت نسبی ارزیابی شد. در این مطالعه ۹۹ قطعه نمونه ۰/۳۶ هکتاری به ابعاد ۶۰×۶۰ متر به روش خوشه‌ای پیاده و اطلاعات قطر، نوع گونه و ارتفاع درختان شاهد و موقعیت مراکز قطعات نمونه برداشت شد. شاخص‌های طیفی گیاهی مورد تحقیق نیز از داده‌های سنجنده ETM+ ایجاد گردیدند. به منظور بررسی همبستگی بین مشخصه‌های طیفی و حجم، میانگین ارزش‌های رقومی (DN) قطعات نمونه برداشت شده زمینی، از ۵ شاخص استخراج و در فرآیند مدل‌سازی به کار گرفته شدند. همچنین، جهت ارزیابی حساسیت شاخص‌ها از تابع حساسیت استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که مجموعه شاخص‌های NDWI و Greenness در کل محدوده حجم سرپا، به ترتیب دارای حساسیت بیشتری در مقایسه با شاخص‌های DVI، RAI و GEMI نسبت به حجم سرپا در منطقه مورد مطالعه

* مسئول مکاتبه: shataee@yahoo.com

می‌باشند. در نتیجه این دو شاخص جهت تهیه برآورد مدل حجم سرپا با استفاده داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از روش بهترین زیر مجموعه دو شاخص DVI و NDWI به‌عنوان بهترین مجموعه شاخص‌ها در برآورد حجم سرپا معرفی شدند. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون نشان داد که مجموعه شاخص‌های NDWI و Greenness با ضریب تبیین اصلاح‌شده ۵۵/۴ درصد نسبت به دو شاخص DVI و NDWI با ضریب تبیین اصلاح‌شده ۴۳/۵ درصد بهتر توانسته‌اند حجم سرپا را برآورد نمایند. این نکته بیان‌گر این مطلب است که شاخص‌های طیفی گیاهی انتخاب شده با استفاده از تابع حساسیت نسبت به روش رگرسیونی بهترین زیرمجموعه، بهتر توانسته‌اند حجم سرپا را برآورد نمایند که افزایش ۱۲ درصدی ضریب تبیین اصلاح‌شده بیانگر همین مطلب می‌باشد. به‌طورکلی تابع حساسیت به‌دلیل بیان تغییرات در کل دامنه مشخصه‌های کمی، وابسته نبودن به واحد و شدت شاخص‌های طیفی گیاهی و انجام آزمون معنی‌دار بودن از تابع‌های مناسب برای ارزیابی حساسیت شاخص‌ها و انتخاب بهترین شاخص‌ها در تجزیه و تحلیل‌های کمی جنگل و پوشش‌های گیاهی بسیار مفید می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های طیفی گیاهی، حجم سرپا، تابع حساسیت، رگرسیون

مقدمه

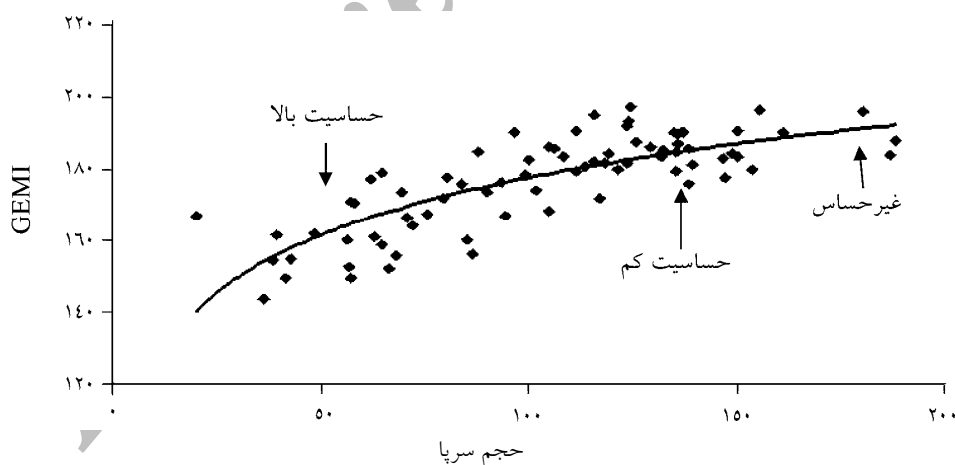
در بسیاری از تحقیقات سال‌های اخیر امکان استفاده از داده‌های طیفی ماهواره‌ای جهت برآورد مشخصه‌های کمی جنگل در بسیاری تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، شاخص‌های طیفی گیاهی از پرکاربردترین نمونه‌های عملیات حسابی روی باندهای ماهواره‌ای می‌باشند که به‌منظور محاسبه میزان پوشش گیاهی، بررسی انواع پوشش گیاهی، وضعیت سبزی‌نگی پوشش گیاهی یک منطقه طی دوره‌های زمانی مختلف به‌کار می‌روند (فاطمی و رضایی، ۲۰۰۵). شاخص‌های طیفی گیاهی زیادی برای بررسی وضعیت مشخصه‌های کمی و کیفی پوشش گیاهی تاکنون معرفی شده‌اند. از متداولترین شاخص‌های طیفی گیاهی می‌توان به شاخص نسبت‌های گیاهی (RVI)^۱، نسبت ساده (SR)^۲، شاخص تفاوت گیاهی نرمال شده (NDVI)^۳، شاخص گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI)،

- 1- Ratio Vegetation Index
- 2- Simple Ratio
- 3- Normalized Difference Vegetation Index

TSAVI، ARVI، GEMI، MSAVI، NDWI، EVI، RAI، IPVI، DVI، مؤلفه سبزینگی حاصل از تبدیل تسلدکپ اشاره نمود. هر شاخص طیفی گیاهی دارای قابلیت‌ها و محدودیت‌هایی است. ایده‌آل‌ترین شاخص طیفی گیاهی شاخصی است که حساسیت بیشتری نسبت به مشخصه‌های کمی جنگل داشته باشد و توانایی بارزسازی مشخصه‌های کمی، را در سطح تصاویر ماهواره‌ای داشته باشد. در بیشتر مطالعه‌های انجام شده برای برآورد مشخصه‌های کمی از روش‌های رگرسیون استفاده شده است (هاباودین و همکاران، ۲۰۰۴؛ گونگ و همکاران، ۲۰۰۳). در این روش‌ها عموماً از معیارهای ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطا^۱ و میانگین مجذور مربعات خطا^{۱۱} برای بیان حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به مشخصه‌های کمی و ارزیابی نتایج برآورد مشخصه‌ها با مدل‌های رگرسیونی استفاده می‌گردد. ضریب تبیین معمولاً نسبتی از تغییرات کل مشاهدات به متغیر برآورد را بیان می‌کند (رضایی و سلطانی، ۲۰۰۳). علاوه بر آن، ضریب تبیین بین صفر تا ۱ متغیر است که یک معیار استاندارد شده محسوب می‌شود. به همین دلیل، بیشتر محققان ضریب تبیین را به سایر پارامترها ترجیح می‌دهند. با این وجود ضریب تبیین نیز تابعی از دامنه و واریانس نمونه‌هاست و تعداد پارامترهای مدل را به حساب نمی‌آورد و با افزایش تعداد پارامترهای مدل هرگز کاهش نمی‌یابد. به همین دلیل استفاده از معیار میانگین مربعات خطا و میانگین مجذور مربعات خطا پیشنهاد می‌شود (رضایی و سلطانی، ۲۰۰۳؛ آچن، ۱۹۸۲). میانگین مربعات خطا و میانگین مجذور مربعات خطا نیز با وجود دارا بودن دقت بالا، به دلیل وابسته بودن به واحد و شدت اندازه‌گیری برای مقایسه شاخص‌های طیفی گیاهی در دو شرایط مختلف مناسب نیستند. به‌طورکلی این آماره‌ها از معیارهای مناسب برای بیان حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به مشخصه‌های کمی می‌باشند. ولی این آماره‌ها توانایی کمی کردن رابطه بین شاخص‌های طیفی گیاهی و مشخصه‌های کمی را ندارند و حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی را نسبت به مشخصه‌های کمی برای کل مشخصه

-
- 4- Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
 - 5- Atmospherically Resistant Vegetation Index
 - 3- Global Environmental Monitoring Index
 - 4- Modified Soil Adjusted Vegetation Index
 - 5- Normalized Difference Water Index
 - 6- Enhanced Vegetation Index
 - 7- Reflectance Absorption Index
 - 8- Infrared Percentage Vegetation Index
 - 9- Difference Vegetation Index
 - 10- Mean Square Error
 - 11- Root Mean Square Error

به‌طورکلی در یک مقدار ثابت خلاصه می‌کنند. معمولاً حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به مشخصه‌های کمی نباید در یک عدد ثابت خلاصه شود بلکه باید بیشتر از یک عدد و تابعی از مقادیر مشخصه‌های کمی باشد. به‌عنوان مثال شکل ۱ نمودار ابر نقاط شاخص GEMI در برابر حجم سرپا را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱، حساسیت شاخص GEMI نسبت به حجم سرپا یک عدد ثابت نیست بلکه تابعی از پارامتر حجم سرپا است. هنگامی که حجم سرپا کمتر از ۱۰۰ مترمکعب در قطعه نمونه باشد، یک تغییر کوچک در حجم سرپا، تغییر بزرگی را در مقادیر شاخص GEMI ایجاد می‌کند که نشان‌دهنده حساسیت بالای شاخص GEMI نسبت به افزایش حجم سرپا می‌باشد. هنگامی که حجم سرپا بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ مترمکعب در قطعه نمونه باشد یک تغییر بزرگ در حجم سرپا، تغییر کوچکی را در شاخص GEMI باعث می‌شود که نشان‌دهنده حساسیت پایین شاخص GEMI نسبت به حجم سرپا در این دامنه حجم سرپا می‌باشد. در نهایت هنگامی که حجم سرپا بیشتر از ۱۵۰ مترمکعب در قطعه نمونه باشد نسبت تغییرات شاخص GEMI به حجم سرپا نزدیک به صفر است که نشان‌دهنده غیرحساس بودن شاخص GEMI نسبت به حجم سرپا در این دامنه می‌باشد. بنابراین، به‌کارگیری تابع حساسیت باعث افزایش دقت رابطه بین شاخص‌های طیفی گیاهی و مشخصه‌های کمی می‌شود.



شکل ۱- نمودار ابر نقاط شاخص GEMI در برابر حجم سرپا.

در زمینه ارزیابی شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به مشخصه‌های کمی برخلاف داخل کشور، در خارج از کشور مطالعاتی صورت گرفته است. بارت و گویت (۱۹۹۱) تابع REN^۱ معادله (۱) را برای ارزیابی حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به پارامترهای شاخص سطح برگ^۲ و تشعشعات فعال فتوسنتزی جذب شده^۳ ارائه دادند.

$$REN = \frac{\partial/x}{d\bar{y}/dx} \quad (1)$$

که در آن X مشخصه کمی، Y شاخص طیفی گیاهی، ∂ : RMSE برای رگرسیون $y=f(x)$ ، $\frac{d\bar{y}}{dx}$: اولین مشتق از تابع رگرسیون و ∂/x : نشان‌دهنده خطای نسبی^۴ می‌باشند. مقادیر بالای خطای معادل شده، نشان‌دهنده حساسیت کمتر یا خطای نسبی بیشتر شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به پارامترهای شاخص سطح برگ و تشعشعات فعال فتوسنتزی جذب شده می‌باشد. از عیب‌های این تابع محاسبه نکردن تغییرات تصادفی $\frac{d\bar{y}}{dx}$ در بررسی‌ها می‌باشد (جی و پیترز، ۲۰۰۷). هویت و همکاران در سال ۱۹۹۴، تابع VEN^۵ معادله (۲) برای نشان دادن خطای نسبی در شاخص‌های طیفی گیاهی ارائه دادند.

$$VEN = \frac{\varepsilon}{d\bar{y}/dx} \quad (2)$$

که در آن X مشخصه کمی، Y شاخص گیاهی و ε خطای نسبی Y بر روی X که از اندازه‌گیری‌های زمینی و داده‌های فرضی محاسبه می‌شود. از معایب این روش این است که تابع VEN نیز مشابه تابع REN تابعی از X است و همچنین جهت کمی کردن ε به داده‌های زمینی زیادی مورد نیاز است. بکر و چاوهری (۱۹۸۸)، تابع حساسیت نسبی^۶ را ارائه دادند (معادله‌های ۳، ۴، ۵).

$$R = \left| \frac{dY}{dX} \right| \quad (3)$$

- 1- Relative Equivalent Noise
- 2- Leaf Area Index
- 3- Absorbed Photosynthetically Active Radiation
- 4- Relative Noise
- 2- Vegetation Equivalent Noise
- 6- Relative Sensitivity (Becker and Chouhury)

$$Y = (x - x_s)(x_c - x_s) \quad (۴)$$

$$Y = (y - y_s)(y_c - y_s) \quad (۵)$$

که در آنها X: مقدار عددی شاخص طیفی گیاهی، x_s و x_c به ترتیب مقادیری از شاخص طیفی گیاهی، برای مناطقی با زمینه خاک و جنگل انبوه و y_s ، y_c و y به ترتیب ارزش‌های متناظر از دیگر شاخص‌ها می‌باشند.

در این تابع نیز خطای محاسباتی $d\bar{y}/dx$ محاسبه نمی‌شود که ممکن است باعث ایجاد ارب در ارزیابی حساسیت گردد. گیتلسون (۲۰۰۴)، حساسیت نسبی^۱ با فرمولی متفاوت از بکر و چاوهری (۱۹۸۸) ارائه داد (معادله ۶).

$$S_r = \left(\frac{d\bar{y}}{dx} \right) \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \quad (۶)$$

که در آن X و Y: ارزش‌های دو شاخص طیفی گیاهی، $d\bar{y}/dx$: اولین مشتق از تابع $y=f(x)$ و Δx و Δy : دامنه مقادیر X و Y می‌باشند.

در این تابع نیز همانند تابع حساسیت نسبی بکر و چاوهری خطای محاسباتی $d\bar{y}/dx$ لحاظ نشده است که این امر ممکن است باعث ایجاد ارب در ارزیابی حساسیت گردد. جی و پترز (۲۰۰۷)، تابع حساسیت^۲ را توسعه داده و معایب توابع قبلی را نیز برطرف کرده‌اند (معادله‌های ۷، ۸، ۹).

$$s = \left(\frac{\bar{y}'}{\sigma_{\bar{y}}} \right) \left(\frac{d\bar{y}/dx}{\sigma_{\bar{y}}} \right) \quad (۷)$$

$\sigma_{\bar{y}_i}$ برای مدل‌های خطی

$$\sigma_{\bar{y}_i}' = \sqrt{\sigma_i^2 X_i' (X'X)^{-1} X} \quad (۸)$$

$\sigma_{\bar{y}_i}$ برای مدل‌های غیرخطی

$$\sigma_{\bar{y}_i}' = \sqrt{\sigma_i^2 F_i' (F'F)^{-1} F_i} \quad (۹)$$

$$\bar{y}' = f'(x) = \frac{d(\bar{y})}{d(x)} \quad (۱۰)$$

1- Relative Sensitivity (Gitelson)

2- Sensitivity Function

که در آنها X : متغیر مستقل (مشخصه‌های کمی)، y : متغیر وابسته (شاخص‌های طیفی گیاهی)،
 σ^2 : MSE، X : ماتریکس متغیرهای مستقل، X_i : i سطر از X و \hat{y}' اولین مشتق از تابع رگرسیون
 می‌باشد.

مقادیر بالا و مثبت s ، حساسیت بالای X را نسبت به y نشان می‌دهد و همچنین مقادیر منفی
 حساسیت معکوس را بیان می‌کند. آزمون معنی‌دار بودن \hat{y}' با آماره t استیودنت و یا Z انجام می‌شود
 (معادله ۱۱). در این معادله برای اطمین مشاهده دو فرض $H_0: \hat{y}'_i = 0$ و $H_1: \hat{y}'_i = 1$ وجود دارد.

$$t = \frac{\hat{y}'_i}{\sigma \hat{y}_i} \quad (11)$$

نتایج آزمون t با p -value متناظر است و مقادیر S نیز خودش بیان‌کننده t است. همچنین می‌توان
 فاصله اطمینان را نیز برای \hat{y}'_i از طریق معادله ۱۲ تعریف و مشخص نمود:

$$\hat{y}'_i \pm t \frac{\alpha}{2}, v \sigma \hat{y} \quad (12)$$

از سویی دیگر، برای ارزیابی حساسیت دو شاخص نسبت به یکدیگر می‌توان از تابع حساسیت
 نسبی^۱ (معادله ۱۳) استفاده نمود. در این تابع y به‌عنوان متغیر وابسته (یکی از شاخص‌های طیفی
 گیاهی) و X به‌عنوان متغیر مستقل (دیگر شاخص طیفی گیاهی) و مدل رگرسیونی $y=f(x)$ تعریف
 می‌شود.

$$s_{y/x} = \frac{\hat{y}'_i}{\sigma \hat{y}_i} \quad (13)$$

و معکوس X و y ، $\hat{x} = g(y)$ به‌وسیله (معادله ۱۴) تعریف می‌شود:

$$s_{x/y} = \frac{\hat{x}'_i}{\sigma \hat{x}_i} \quad (14)$$

نمودار پراکنش $s_{y/x}$ و $s_{x/y}$ در مقابل شاخص‌های طیفی گیاهی حساسیت نسبی را بیان
 می‌کند.

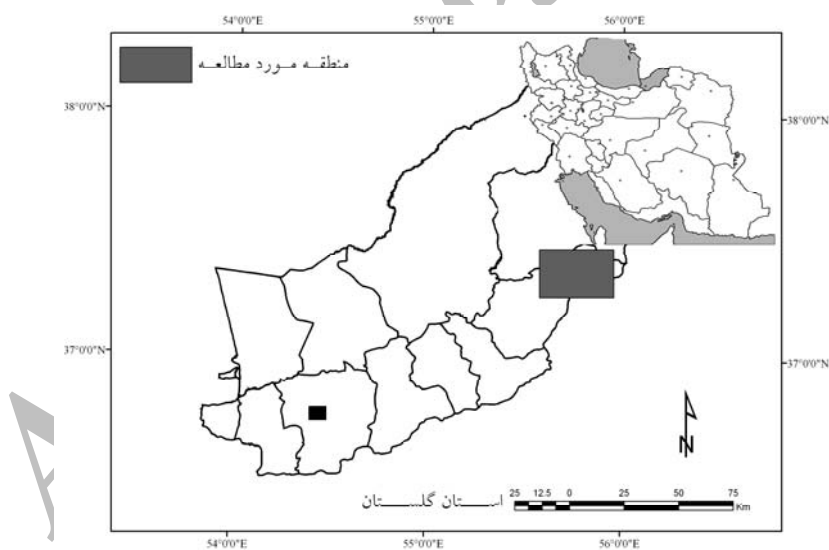
هدف از این تحقیق ارزیابی حساسیت ۵ شاخص طیفی معروف گیاهی شامل GEMI, DVI, RAI, NDWI و Greenness نسبت به مشخصه حجم سرپای جنگل به‌منظور انتخاب بهترین
 شاخص گیاهی برای تهیه مدل برآورد حجم سرپای و مقایسه آن با مدل برآورد حجم سرپای به روش

1- Relative Sensitivity Function

رگرسیون بهترین زیرمجموعه^۱ در قسمتی از طرح جنگل‌داری لوه در استان گلستان می‌باشد. همچنین حساسیت این شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به یکدیگر با استفاده از تابع حساسیت نسبی نیز ارزیابی می‌شود. این تابع می‌تواند در انتخاب بهترین شاخص‌ها در تجزیه و تحلیل‌های کمی جنگل و پوشش‌های گیاهی بسیار مفید واقع شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه در طرح جنگل‌داری لوه در حوزه آبخیز ۹۴ اداره کل منابع طبیعی استان گلستان و در ۲۴ کیلومتری شرق شهرستان گالیکش و در غرب جنگل‌های پارک ملی گلستان با طول جغرافیایی $55^{\circ}33'$ تا $55^{\circ}47'$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ}14'$ تا $37^{\circ}24'$ شمالی واقع می‌باشد (شکل ۲). جنگل‌های منطقه از آغاز بهره‌برداری به شیوه جنگل‌شناسی پناهی (تدریجی-گروهی) اداره می‌شد ولی در سال‌های اخیر (۱۳۸۲) با انجام طرح تجدید نظر ۱۰ ساله پنجم جنگل‌های منطقه به شیوه تک‌گزینی اداره می‌شوند.



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان گلستان و ایران.

داده‌های تحقیق: جمع‌آوری داده‌های زمینی مورد نیاز جهت مدل‌سازی مشخصه حجم سرپا توده‌های جنگلی منطقه از طریق نمونه‌برداری به روش خوشه‌ای صورت گرفت، به طوری که هر خوشه دارای ۹ قطعه نمونه به فواصل ۲۰۰ متر و فاصله مرکز هر خوشه تا مرکز خوشه بعدی ۱ کیلومتر در نظر گرفته شد. در این تحقیق از داده‌های سنجنده ETM^+ ماهواره لندست به شماره گذر ۱۶۲ و ردیف ۳۴ مربوط به تاریخ ۷ ژولای ۲۰۰۲ استفاده شده است. اندازه تفکیک مکانی در باندهای چندطیفی معادل ۳۰ متر و در باند پانکروماتیک معادل ۱۵ متر می‌باشد. با توجه به دقت هندسی و قدرت تفکیک مکانی داده‌های سنجنده ETM^+ و همچنین عناصر مورد اندازه‌گیری در قطعات نمونه، قطعات نمونه به شکل مربع و مساحت ۳۶۰۰ مترمربع (۲×۲ پیکسل) در نظر گرفته شدند. پس از تعیین نقطه شروع براساس نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه شبکه مورد نظر بر روی زمین پیاده گردید. سپس با تعیین محل تقاطع شبکه، قطعات نمونه به صورت ۶۰×۶۰ متر بر روی زمین به طور دقیق پیاده شدند. پس از ثبت موقعیت مرکز قطعه نمونه در حافظه GPS و فرم‌های آماربرداری، مشخصات ارتفاع درختان شاهد، نوع گونه و قطر کلیه درختانی که قطر آنها در ارتفاع برابر سینه بیش از ۷/۵ سانتی‌متر بود ثبت و اندازه‌گیری شد. در نهایت در کل منطقه ۹۹ قطعه نمونه مورد آماربرداری قرار گرفتند.

پیش‌پردازش و پردازش تصاویر: با توجه به این که تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قبلاً توسط سازمان نقشه‌برداری کشور و با استفاده از مدل رقومی زمین و نقاط کنترل زمینی ضمن رفع خطای جابجایی ناشی از پستی و بلندی تصحیح هندسی شده بودند، در این تحقیق فقط صحت هندسی این داده‌ها با استفاده از لایه وکتوری جاده‌ها و نقاط دقیقی که توسط GPS برداشت شده بودند، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و مشخص گردید که داده‌ها دارای صحت هندسی قابل قبولی می‌باشند. برای کاهش اثر اتمسفر بر روی تصاویر از مدل Cost استفاده گردید (ماهینی و ترنر، ۲۰۰۷). در این تحقیق ۵ شاخص طیفی گیاهی مرتبط با مشخصه حجم شامل RAI, NDWI, GEMI, DVI و Greenness با استفاده از تصاویر تصحیح شده ایجاد گردیدند (جدول ۱). به منظور بررسی همبستگی بین مشخصه‌های طیفی و حجم میانگین ارزش‌های رقومی (DN) ۴ پیکسل در برگیرنده هر ۹۹ قطعه نمونه برداشت شده زمینی، از ۵ شاخص استخراج و در فرایند مدل‌سازی به کار گرفته شدند.

1- Global Positioning System

جدول ۱- پنج شاخص طیفی گیاهی تهیه شده DVI, GEMI, NDWI, RAI, Greenness.

شاخص‌های طیفی گیاهی	فرمول
شاخص انعکاس طیفی جذب شده	$(ETM4)/(ETM3+ETM5)$ (ناصری، ۲۰۰۳)
شاخص تفاوت نمناکی نرمال شده	$(ETM4-ETM5)/(ETM4+ETM5)$ (گائو، ۱۹۹۶)
شاخص نظارت زیست محیطی	$\varepsilon(1-RED) - ((RED - 0.125)/(1-RED)) - \varepsilon(1-0.25)$ (لو و همکاران، ۲۰۰۴)
جهانی	$\varepsilon(2(NIR^2 - RED^2) + 1/5NIR + 0/5RED)/(NIR + RED + 0/5)$
شاخص گیاهی تفاضل	TM4-ETM3 (کلورس، ۱۹۸۸)
سبزی‌نگی	مؤلفه سبزی‌نگی حاصل از تبدیل تسلدکپ

ارزیابی حساسیت شاخص‌ها و انتخاب حساس‌ترین شاخص‌ها نسبت به حجم سرپا: در این مطالعه برای ارزیابی حساسیت ۵ شاخص طیفی گیاهی شامل RAI, NDWI, GEMI, DVI و Greenness نسبت به مشخصه حجم سرپا از تابع حساسیت جی و پترز استفاده شد. این تابع دارای مزایایی مانند بیان تغییرات حساسیت در کل دامنه مشخصه کمی جنگل، انجام آزمون معنی‌دار بودن و وابسته نبودن به واحد و شدت شاخص‌های طیفی گیاهی است و نسبت به دیگر تابع‌ها دارای ارجحیت می‌باشد. در این تابع، حجم سرپا به‌عنوان متغیر مستقل X و شاخص‌های طیفی گیاهی به‌عنوان متغیر وابسته Y در نظر گرفته می‌شوند و تابع برازش $y=f(x)$ می‌باشد. در این تابع برای مدل‌های خطی، خطای برآوردی با استفاده از $\sigma_{\bar{y}}$ (معادله ۸) محاسبه گردید که به دلیل پیچیده بودن محاسبات از نرم‌افزار SAS 9.1 استفاده شد. با گرفتن اولین مشتق از مدل رگرسیونی با استفاده از معادله ۱۰ و قرار دادن آنها در معادله ۷ مقادیر S محاسبه می‌گردد که بیانگر حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به مشخصه‌های کمی می‌باشد. جهت بررسی معنی‌دار بودن حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی از آماره t معادله ۱۱ استفاده شد. همچنین، جهت ارزیابی حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به یکدیگر از معادله‌های ۱۳ و ۱۴ و نمودار پراکنش آنها در مقابل شاخص طیفی گیاهی استفاده شد. پس از برازش بهترین مدل خطی بین شاخص‌های طیفی گیاهی و حجم سرپا، حساسیت ۵ شاخص طیفی گیاهی نسبت به مشخصه حجم سرپا با استفاده از معادله ۷ مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی روابط رگرسیونی بین مشخصه‌های حجم سرپا و ارزش‌های طیفی متناظر در شاخص‌های طیفی گیاهی: در این تحقیق با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره، چگونگی رابطه بین

متغیرهای برآورد کننده (ارزش‌های طیفی) و متغیر برآورد (حجم سرپا) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور برازش مدل‌های رگرسیونی، پارامتر اندازه‌گیری شده حجم سرپا به‌عنوان متغیر وابسته و ارزش‌های طیفی شاخص‌های طیفی به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. از طریق تحلیل رگرسیون به روش بهترین زیر مجموعه، ارتباط بین حجم و ارزش‌های طیفی مورد بررسی قرار گرفت و اقدام به شناسایی بهترین مدل رگرسیونی گردید. در رگرسیون بهترین زیرمجموعه تمامی مدل‌های رگرسیونی ممکن و مربوط به متغیرهای مستقل بررسی می‌شوند و طبق معیارهای ضریب تبیین، ضریب تبیین اصلاح‌شده، آماره C_p و میانگین مربعات خطا بهترین مدل رگرسیونی انتخاب می‌گردد. در نهایت مدلی انتخاب می‌شود که بیشترین ضریب تبیین، ضریب تبیین اصلاح‌شده، و کمترین C_p و میانگین مجذور خطا را دارا باشد (مصادقی، ۲۰۰۴). در این روش بهترین مدل با بهترین شاخص‌های طیفی گیاهی که بهتر توانسته است حجم سرپای جنگل را برآورد نماید مشخص و شاخص‌های طیفی گیاهی به‌عنوان بهترین شاخص معرفی می‌گردند.

برآورد حجم سرپا با استفاده از مجموعه شاخص انتخابی به‌وسیله تابع حساسیت: پس از انتخاب بهترین و حساس‌ترین شاخص‌های طیفی گیاهی در مقایسه با دیگر شاخص‌ها نسبت به حجم سرپا، این شاخص‌ها جهت تهیه مدل حجم سرپا با استفاده از رگرسیون چندمتغیره خطی مورد استفاده قرار گرفتند.

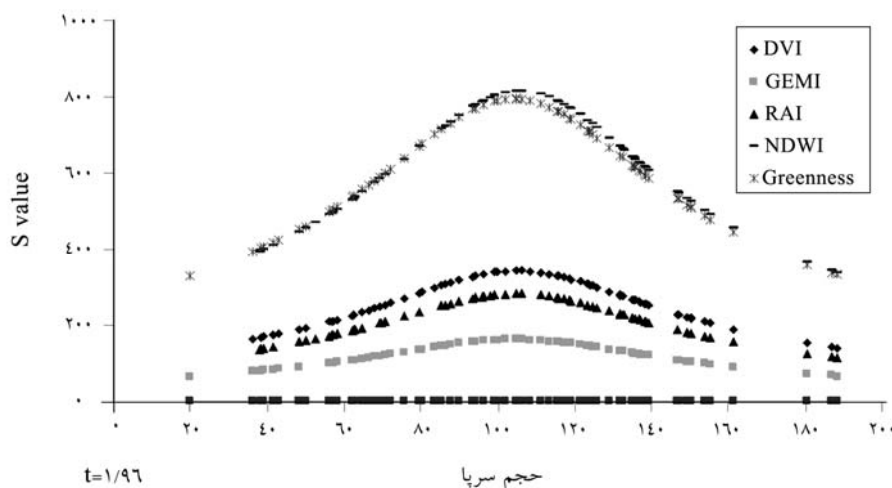
نتایج

تحلیل حساسیت ۵ شاخص طیفی گیاهی با استفاده از تابع حساسیت جهت انتخاب حساس‌ترین شاخص‌ها: نتایج حاصل از بهترین مدل‌های خطی برازش شده برای شاخص‌های طیفی گیاهی و حجم سرپا در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- مدل خطی برازش شده برای شاخص‌های DVI، GEMI، NDWI، RAI و Greenness و حجم سرپا.

R ^۲ (adj)	مدل خطی برازش شده	شاخص‌های طیفی گیاهی
۰/۶۴۰۵	$DVI = -0/17521 + 193/80117 \times Volume$	شاخص گیاهی تفاضل (DVI)
۰/۶۱۶۲	$GEMI = 0/26595 + 148/91522 \times Volume$	شاخص نظارت زیست‌محیطی جهانی (GEMI)
۰/۵۰۵۵	$NDWI = -0/4884 + 170/59352 \times Volume$	شاخص تفاوت نمناکی نرمال شده (NDWI)
۰/۶۰۱۰	$Greenness = -0/07886 + 223/73172 \times Volume$	سبزیگی (Greenness)
۰/۴۲۳۹	$RAI = -0/05035 + 72/84065 \times Volume$	شاخص انعکاس طیفی جذب شده (RAI)

بر اساس اولین مشتق از رگرسیون \bar{y} و انحراف از معیار تابع رگرسیون σ_y ، تابع حساسیت S برای ۵ شاخص طیفی گیاهی تهیه گردید (شکل ۳). در این تحقیق آماره $t=1/96$ با درجه آزادی ۸۰ و $\alpha=0.05$ به عنوان عدد بحرانی شناخته شد. یعنی شاخص‌هایی که مقادیر S آنها بیشتر از این عدد بحرانی باشد دارای حساسیت معنی‌داری نسبت به حجم سرپا می‌باشند در این مطالعه نیز مقادیر S ۵ شاخص طیفی گیاهی بالاتر از عدد بحرانی بود. در نتیجه، حساسیت این شاخص‌ها نسبت به مشخصه حجم سرپا معنی‌دار می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت ۵ شاخص ذکر شده نسبت به مشخصه حجم سرپا نشان داد که در توده‌هایی با حجم سرپا کمتر از ۸۰ متر مکعب در قطعه نمونه، شاخص Greenness نسبت به شاخص‌های NDWI، DVI، RAI و GEMI به ترتیب حساسیت بیشتری نسبت به حجم سرپا دارند و در توده‌های با حجم سرپای بیشتر از ۸۰ متر مکعب در قطعه نمونه شاخص NDWI نسبت به شاخص‌های Greenness، DVI، RAI و GEMI به ترتیب حساسیت بیشتری نسبت به حجم سرپا دارند. به‌طور کلی دو شاخص NDWI و Greenness در کل محدوده حجم سرپا، به دلیل مقادیر S بالاتر نسبت به دیگر شاخص‌ها به ترتیب دارای حساسیت بیشتری نسبت به شاخص‌های DVI، RAI و GEMI نسبت به حجم سرپا در منطقه مطالعه نشان دادند (شکل ۳).



شکل ۳- تحلیل حساسیت شاخص‌های طیفی و حجم سرپا و منحنی تابع حساسیت (S) برای ۵ شاخص طیفی.

برآورد حجم سرپا با استفاده از دو شاخص انتخاب شده به وسیله تابع حساسیت: نتایج حاصل از تحلیل حساسیت شاخص‌های گیاهی نسبت به مشخصه حجم سرپا نشان داد که دو شاخص طیفی گیاهی NDWI و Greenness به ترتیب دارای حساسیت بیشتری نسبت به شاخص‌های DVI، RAI و GEMI نسبت به حجم سرپا در منطقه مطالعه مورد دارند و این دو شاخص جهت تهیه مدل حجم سرپا با استفاده رگرسیون چندمتغیره خطی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون نشان داد که ترکیب خطی NDWI و Greenness به عنوان متغیر مستقل با ضریب تبیین ۵۵/۴ درصد توانست حجم سرپا را برآورد نماید (جدول ۳).

جدول ۳- نتایج تحلیل رگرسیون جهت برآورد حجم سرپا با استفاده از شاخص‌های طیفی گیاهی انتخاب شده از تابع حساسیت.

پارامترهای مدل	$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n$				
	B_0	B_1X_1	B_2X_2	R^2	$R^2(\text{adj})$
حجم سرپا (مترمکعب در قطعه نمونه)	۱۱۷۳/۳۳	-۵/۵۳۸(Greenness)	۰/۷۴۹ (NDWI)	۵۶/۵	۵۵/۴

با توجه به جدول تحلیل واریانس (جدول ۴) و معنی‌دار بودن رگرسیون در سطح احتمال ۹۹ درصد چنین نتیجه‌گیری می‌شود که بین حجم سرپا و شاخص‌های NDWI و Greenness همبستگی بالایی وجود دارد.

جدول ۴- تحلیل واریانس حجم سرپا با استفاده از شاخص‌های طیفی گیاهی انتخاب شده توسط تابع حساسیت.

سطح معنی‌داری	آماره F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	
۰/۰۰۰۱	۵۲/۵۶۵	۲۷۲۵۷/۰۵	۵۴۵۱۴/۱	۲	رگرسیون
		۵۱۸/۵۴۱	۴۲۰۰۱/۸۲۶	۸۱	باقی‌مانده‌ها
			۹۶۵۱۵/۹۲۶	۸۳	کل

برآورد حجم سرپا با استفاده از رگرسیون بهترین زیر مجموعه: همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده کل تعداد مدل‌های به‌دست آمده از تحلیل رگرسیون بهترین زیرمجموعه ۹ مورد است که از بین آنها مدل با متغیر مستقل DVI و NDWI که دارای بیشترین ضریب تبیین اصلاح‌شده و کمترین میانگین مربعات خطا و آماره cp است، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب گردید (جدول ۵).

جدول ۵- مقادیر محاسبه شده R^2 ، $R^2(\text{adj})$ ، MSE و آماره cp برای کلیه مدل‌های رگرسیونی حجم سرپا.

cp	آماره	MSE	$R^2(\text{adj})$	R^2	متغیرهای مستقل			
۰/۱	۲۵/۴۲	۴۳/۴	۴۴/۱	DVI				
۱/۳	۲۵/۶۱	۴۲/۶	۴۳/۲	NDWI				
۰/۹	۲۵/۴	۴۳/۵	۴۴/۷	DVI	NDWI			
۱/۵	۲۵/۵	۴۳/۱	۴۴/۴	DVI	Greenness			
۲/۱	۲۵/۴۴	۴۳/۳	۴۵/۲	DVI	Greenness	NDWI		
۲/۴	۲۵/۴۷	۴۳/۲	۴۵/۱	DVI	RAI	NDWI		
۴/۱	۲۵/۵۸	۴۲/۷	۴۵/۳	DVI	RAI	NDWI	GEMI	
۴/۱	۲۵/۵۹	۴۲/۷	۴۵/۲	DVI	Greenness	NDWI	GEMI	
۶	۲۵/۷۲	۴۲/۱	۴۵/۳	DVI	Greenness	NDWI	GEMI	RAI

نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون نشان داد که ترکیب خطی DVI و NDWI به عنوان متغیر مستقل با ضریب تبیین ۴۳/۵ درصد بهتر توانست حجم سرپا را برآورد نماید (جدول ۶).

جدول ۶- نتایج تحلیل رگرسیون چندگانه جهت برآورد حجم سرپا با استفاده رگرسیون بهترین زیرمجموعه.

$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n$ پارامترهای مدل				R^2	$R^2(\text{adj})$
B	B_1X_1	B_2X_2			
حجم سرپا (مترمکعب در قطعه نمونه)	۱۶۰۷	-۶/۱۳ (DVI)	-۲/۴۵ (NDWI)	۴۴/۷	۴۳/۵

با توجه به جدول تحلیل واریانس (جدول ۷) و معنی دار بودن رگرسیون در سطح احتمال ۹۹ درصد چنین نتیجه گیری می شود که بین حجم سرپا و شاخص های NDWI و DVI همبستگی بالایی وجود دارد.

جدول ۷- تحلیل واریانس حجم سرپا با استفاده از رگرسیون بهترین زیرمجموعه.

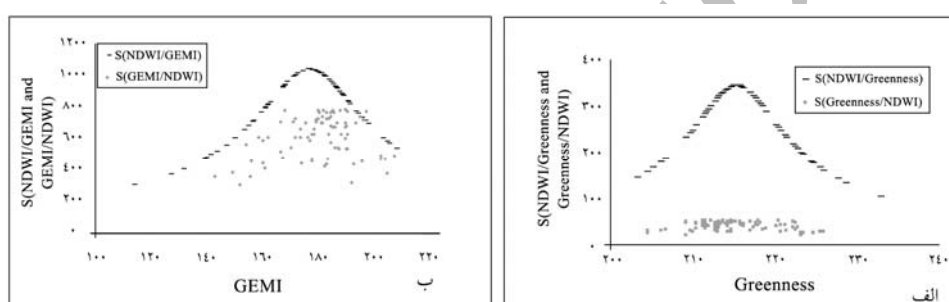
درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	سطح معنی داری
رگرسیون	۴۵۴۶۷	۲۲۷۳۴	۳۵/۲۳	۰/۰۰۰۱
باقی مانده ها	۵۶۱۴۶	۶۴۵		
کل	۱۰۱۶۱۳			

تحلیل حساسیت شاخص طیفی گیاهی نسبت به یکدیگر با استفاده از تابع حساسیت نسبی: برای بررسی حساسیت شاخص ها نسبت به یکدیگر در زمانی که مشخصه کمی در دسترس نباشد از تابع حساسیت نسبی معادله های ۱۴ و ۱۵ استفاده شد. بهترین مدل خطی برازش شده برای شاخص های طیفی گیاهی در جدول ۸ ارایه شده اند.

جدول ۸- مدل خطی برازش شده برای شاخص های NDWI، GEMI و Greenness.

$R^2(\text{adj})$	مدل خطی برازش شده
۰/۶۲۶۲	$NDWI = ۰/۴۴۸۱۸ + ۶۸/۲۹۴۳۹ \times Greenness$
۰/۶۲۷۴	$Greenness = ۱/۲۱۱۶۹ + ۱۵/۴۵۵۸۸ \times NDWI$
۰/۶۶۶۵	$NDWI = -۰/۱۲۱۱۱ + ۱۸۶/۲۶۴۳۸ \times GEMI$
۰/۵۹۱۸	$GEMI = -۳/۳۴۷۹۸ + ۷۳۱/۴۹۱۵۱ \times NDWI$

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت دو شاخص طیفی گیاهی NDWI و Greenness نسبت به یکدیگر نشان داد که در کل دامنه شاخص Greenness، NDWI نسبت به Greenness حساسیت بیشتری دارد (شکل ۴-الف). همچنین نتایج حاصل از تحلیل حساسیت دو شاخص طیفی گیاهی NDWI و GEMI نسبت به یکدیگر نشان داد که در کل دامنه شاخص GEMI، NDWI نسبت به GEMI حساسیت بیشتری دارد (شکل ۴-ب).



شکل ۴- تحلیل حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به یکدیگر با استفاده از تابع حساسیت نسبی برای (الف) دو شاخص طیفی گیاهی NDWI و Greenness و (ب) دو شاخص طیفی گیاهی NDWI و GEMI.

بحث و نتیجه‌گیری

تاکنون شاخص‌های طیفی گیاهی زیادی برای بررسی وضعیت مشخصه‌های کمی و کیفی پوشش گیاهی معرفی گردیده است. اما انتخاب بهترین شاخص‌ها در تجزیه و تحلیل‌های کمی جنگل و پوشش‌های گیاهی یکی از مشکلات مهم کاربران می‌باشد. به‌طورکلی آماره‌های ضریب تبیین، میانگین مربعات خطا و میانگین مجذور مربعات خطا توانایی کمی کردن جزئیات رابطه بین شاخص‌های طیفی گیاهی و مشخصه‌های کمی را ندارند و حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی را نسبت به مشخصه‌های کمی در یک مقدار ثابت خلاصه می‌کنند. روشن است که حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به مشخصه‌های کمی باید تابعی از مشخصه‌های کمی باشد. تابع حساسیت (اولین مشتق از تابع رگرسیون تقسیم بر انحراف معیار متغیر وابسته پیش‌بینی شده) به‌دلیل بیان تغییرات در کل دامنه مشخصه‌های کمی، وابسته نبودن به واحد و شدت شاخص‌های طیفی گیاهی و انجام آزمون معنی‌دار بودن از تابع‌های مناسب برای ارزیابی حساسیت شاخص‌ها و انتخاب بهترین شاخص‌ها در تجزیه و

تحلیل‌های کمی جنگل و پوشش‌های گیاهی است و بسیار مفید می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت ۵ شاخص طیفی گیاهی نسبت به مشخصه حجم سرپا با استفاده از تابع حساسیت نشان داد که حساسیت این شاخص‌ها نسبت به مشخصه حجم سرپا معنی‌دار می‌باشد و همچنین نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که در توده‌های جوان، تنک و با حجم کمتر از ۸۰ مترمکعب در قطعات نمونه (۲۰۰ مترمکعب در هکتار)، شاخص Greenness نسبت به شاخص NDWI حساسیت بیشتری نسبت به حجم سرپا دارد و در توده‌های مسن، انبوه و با حجم سرپای بیشتر از ۸۰ مترمکعب در قطعه نمونه (۲۰۰ مترمکعب در هکتار) شاخص NDWI نسبت به شاخص Greenness حساسیت بیشتری نسبت به حجم سرپا دارد و در نهایت دو شاخص NDWI و Greenness در کل محدوده حجم سرپا، به ترتیب دارای حساسیت بیشتری نسبت به شاخص‌های DVI، RAI و GEMI در برآورد حجم سرپا در منطقه مطالعه مورد دارند. از این‌رو، این دو شاخص جهت برآورد حجم سرپا با استفاده داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. به‌رغم این‌که رگرسیون بهترین زیرمجموعه تمامی مدل‌های رگرسیونی ممکن و مربوط به متغیرهای مستقل را بررسی و جهت انتخاب بهترین مدل علاوه بر معیارهای ضریب تبیین و ضریب تبیین اصلاح‌شده، معیارهای میانگین مجذور خطا و آماره C_p مالو را نیز گزارش می‌کند، اما نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون نشان داد که دو شاخص NDWI و Greenness با ضریب تبیین اصلاح‌شده ۵۵/۴ درصد نسبت به دو شاخص DVI و NDWI با ضریب تبیین اصلاح‌شده ۴۳/۵ درصد در منطقه مورد مطالعه بهتر توانسته‌اند حجم سرپا را برآورد نمایند که بیانگر این مطلب است که شاخص‌های طیفی گیاهی انتخاب شده با استفاده از تابع حساسیت بهتر توانسته‌اند حجم سرپا را برآورد نمایند. افزایش ۱۲ درصدی ضریب تبیین اصلاح‌شده بیانگر همین مطلب می‌باشد و همچنین ضریب تبیین حاصل شده در این مطالعه در مقایسه با مطالعات هال و همکاران (۲۰۰۶) ($R^2_{adj}=0.3$) بالاتر می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نسبت به یکدیگر (زمانی که مشخصه کمی در دسترس نباشد) نشان داد که شاخص NDWI نسبت به شاخص‌های GEMI و Greenness در منطقه مورد مطالعه دارای حساسیت بیشتری می‌باشد و حساسیت نسبی نیز برای ارزیابی مستقیم دو شاخص طیفی گیاهی مفید است. به‌طورکلی، تابع حساسیت به‌دلیل بیان تغییرات در کل دامنه مشخصه‌های کمی، وابسته نبودن به واحد و شدت شاخص‌های طیفی گیاهی و انجام آزمون معنی‌دار بودن از تابع‌های مناسب برای ارزیابی حساسیت شاخص‌ها و انتخاب بهترین شاخص‌ها در تجزیه و تحلیل‌های کمی جنگل و

پوشش‌های گیاهی محسوب می‌شود. همچنین، ارزیابی حساسیت شاخص‌های طیفی گیاهی نیاز به بررسی گسترده‌تر در مناطقی با شرایط اقلیمی، بوم‌شناختی و متغیرهای محیطی متفاوت و با دیگر مشخصه‌های کمی و زیست-فیزیکی می‌باشد.

منابع

1. Achen, C.H. 1982. Interpreting and using regression. Sage university paper series on quantitative application in the social sciences 07-001. Beverly Hills: Sage Press, 85 p.
2. Baret, F., and Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35: 161-173.
3. Becker, F., and Choudhury, B.J. 1988. Relative sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) and microwave polarization difference index (MPDI) for vegetation and desertification monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 24: 297-311.
4. Clevers, J.G.P.W. 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 25: 1. 53-70
5. Fatemi, S.B., and Rezaei, Y. 2005. Principles of remote sensing, Azadeh Press, 257p.
6. 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.
7. Gitelson, A.A. 2004. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161: 165-173.
8. Gong, P., Pu, R., Biging, G.S., and Larrieu, M.R. 2003. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyper spectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 1355-1362.
9. Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., and Strachan, I.B. 2004. Hyper spectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90: 337-352.
10. Hall, R.J., Skakun, R.S., Arsenault, E.J., and Case, B.S. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management*, 225: 378-390.
11. Huete, A., Justice, C., and Liu, H. 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, 49: 224-234.

12. Ji, L., and Peters, A.J. 2007. Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function. *Remote Sensing of Environment*, 106: 59-65.
13. Lu, D., Mausel, P., Broondizio, E., and Moran, E. 2004. Relationships between forests stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, 198: 149-167.
14. Mahiny, A.S., and Turner, B.J. 2007. A comparison of four common atmospheric correction methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Ssensing*, 73: 6. 361-368.
15. Mesdaghi, M. 2004. Regression methods for Research in Agricultural and Natural Resources. University of Emam Reza, Mashhad, 290p. (In Persian).
16. Naseri, F. 2003. Classification of forest types and estimation of their quantitative parameters in arid and semi-arid regions using satellite data (case study: National Park of Khabr-Kerman Province. Ph.D. thesis, university of Tehran, Faculty of natural resources, 202p. (In Persian).
17. Rezaei, A., and Soltani, A. 2003. An introduction to applied regression analysis University of Esfahan Industrial Press, 294p. (In Persian).



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Wood & Forest Science and Technology, Vol. 16(2), 2009
www.gau.ac.ir/journals

Sensitivity Evaluation of Spectral Vegetation Indices Using Sensitivity Functions for Stand Volume Estimation

J. Mohammadi¹ and *Sh. Shataee²

¹Former M.Sc. Student of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ²Associate Prof., Dept. of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Abstract

Identification of the best vegetation indices (VIs) for use in quantitative analyzes of vegetation is one of the important issues for ecologists. The objective of this study was sensitivity evaluation of vegetation indices to a stand volume for identification of the best vegetation index (VI) in stand volume estimation using a statistical sensitivity method. Also, another objective of this study was to compare results of stand volume estimation using sensitivity function and the best subset regression. We also evaluated sensitivity of VI relative to another VI using relative sensitivity function. In this study, 99 plots 60m×60m each were used with systematic cluster sampling method. In each plot, data on tree species, diameter at breast height, stand height and geographic coordinates of each plot center were recorded. The vegetation indices were created using Landsat ETM+ data. In order to analyze the relationship between stand volume and vegetation indices, average digital number of pixels within 2×2 pixels window were extracted from vegetation indices. The result of the sensitivity function showed that NDWI and Greenness had high sensitivity compared to DVI, RAI and GEMI in stand volume estimation, respectively. Therefore, NDWI and Greenness were selected for estimating stand volume using satellite data. Also, the result of the best subset regression analyses showed that DVI and NDWI were best for estimation of the stand volume. The regression model with NDWI and Greenness could better predict stand volume (adjusted $R^2=55.4\%$) compared to DVI and NDWI (adjusted $R^2=43.5\%$). This is a 12% increase in adjusted R^2 . The results showed that relative sensitivity of NDWI to GEMI and Greenness is high. Generally, the sensitivity function expresses the change in sensitivity of a VI through the range of allometric characteristics, it is irrelevant of the unit or magnitude of vegetation indices and it tests the significance of the sensitivity with t-or-z statistic is useful for evaluation of sensitivity analysis of vegetation indices and identifying the best vegetation indices in quantitative and qualitative assessment of forested area.

Keywords: Spectral vegetation indices, Stand volume, Sensitivity function, Regression

* Corresponding Author; Email: shataee@yahoo.com