

امکان برآورد تنوع گونه‌های چوبی با استفاده از تصاویر نوری ماهواره سنتینل (مطالعه موردی: جنگل‌های مریوان)

آرمان ساعد موجشی^۱، مهتاب پیرباوقار^{۲*}، نقی شعبانیان^۲، پرویز فاتحی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان، سنندج

۲. دانشیار گروه جنگلداری و مرکز پژوهش و توسعه جنگلداری زاگرس شمالی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان، سنندج

۳. استادیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۸

چکیده

هدف پژوهش کنونی، بررسی امکان استفاده از سنجش از دور برای برآورد تنوع گونه‌های چوبی است که در پایداری اکوسیستم‌های جنگلی اهمیت بسیار زیادی دارد. برای این منظور از تصاویر نوری ماهواره سنتینل ۲ در بخشی از جنگل‌های شهرستان مریوان استفاده شد. ابتدا منطقه پژوهش به مساحت حدود ۵۰۰ هکتار از راه جنگل‌گردشی بررسی شد. ۸۹ قطعه نمونه با ابعاد ۴۰×۴۰ متر به صورت تصادفی در کل سطح منطقه برداشت و مشخصه‌های نوع و تعداد گونه در هر قطعه نمونه ثبت شد. تنوع زیستی درختی براساس شاخص‌های تنوع گونه‌ای سیمپسون و شانون وینر، غنای گونه‌ای مارکالف، یکنواختی فیشر آلفا و غالبیت سیمپسون برای هر قطعه نمونه محاسبه شد. تصاویر سنجنده سنتینل ۲ در سطح تصحیحات سیستمی دریافت شد. شاخص‌های گیاهی مناسب از باندهای اصلی تصاویر ماهواره‌ای تهیه و ارزش‌های رقومی در محل هر قطعه نمونه از هر یک از باندهای اصلی و شاخص‌های گیاهی استخراج شد. همبستگی میان باندهای اصلی و شاخص‌های گیاهی با شاخص‌های تنوع، بررسی و معادلات رگرسیونی چندمتغیره به روش گام‌به‌گام با استفاده از ۶۶ قطعه نمونه توسعه یافت. نتایج اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی با استفاده از ۲۳ قطعه نمونه نشان داد که شاخص‌های تنوع گونه‌ای سیمپسون ($RMSE_T=21/39\%$ ، $R^2=0/57$)، غالبیت سیمپسون ($RMSE_T=22/63$ ، $R^2=0/55$) و تنوع گونه‌ای شانون-وینر ($RMSE_T=23/16\%$ ، $R^2=0/50$) با دقت بیشتری از بقیه شاخص‌ها قابل برآوردند. برپایه نتایج این پژوهش می‌توان بیان داشت که تصاویر سنتینل ۲ از توانایی متوسطی در برآورد تنوع گونه‌ای در جنگل‌های زاگرس برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های زاگرس، شاخص‌های تنوع زیستی، ماهواره سنتینل ۲، معادلات رگرسیونی.

مقدمه

بیان سطوح سازمان‌یافته حیات براساس سلسله‌مراتب ژن، فرد، گونه، جامعه زیستی و اکوسیستم. جنگل‌ها از منابع مهم تنوع زیستی در جهان هستند که نظر طراحان حفاظت و جنگلداران را به خود جلب کرده‌اند. مطالعات گوناگون نشان داده که وجود عوامل تخریبی همانند بهره‌برداری‌های بی‌رویه و چرای دام سبب کاهش غنا و تنوع گونه‌ای

جنگل از مهم‌ترین منابع ژنتیکی جهان است که در آن تنوع زیستی به‌عنوان یک عامل مهم مطرح است. حفاظت از تنوع زیستی در اکوسیستم‌های جنگلی از شاخص‌های مهم مدیریت پایدار جنگل است. تنوع زیستی عبارت است از

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۸۷۳۳۶۶۴۶۰۰

رگرسیون خطی و درختی در جنگل‌های هیرکانی ایران به برآورد غنا و تنوع گونه‌ای درختان پرداختند. محققان با استفاده از روش رگرسیون درختی در برآورد شاخص‌های غنا ($R^2_{adj}=0/61$) و تنوع سیمپسون ($R^2_{adj}=0/57$) در مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی (غنا: $R^2_{adj}=0/59$ و سیمپسون $R^2_{adj}=0/46$) به ضریب تبیین بیشتری دست یافتند، ولی نتایج از دقت زیادی برخوردار نبود [۶]. Griffiths و Le (۲۰۱۶) در بررسی غنای گونه‌ای و پایش اکوسیستم با استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۷ در بریتانیا به نتایج ضعیفی اشاره کرده‌اند [۷]. Ozkan و همکاران (۲۰۱۶) برای ارزیابی تنوع گونه‌های چوبی از داده‌های ماهواره RapidEye و تصاویر سنجنده ASTER و OLI استفاده کردند [۸]. نتایج این پژوهش نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیکی مکانی بیشتر، در برآورد شاخص غنای گونه‌ای توان بیشتری دارند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج برآورد تنوع گونه‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی متفاوت در شرایط رویشگاهی مختلف، متفاوت است.

Ganivet و همکاران (۲۰۱۹) در کنار برشمردن مزایای تصاویر ماهواره‌ای سنتینل مانند رایگان بودن، حجم پردازش کمتر (در مقایسه با داده‌های لایدار یا پهپاد) و عرض برداشت وسیع، استفاده از این داده‌ها را در نقشه‌سازی مکانی تنوع گونه‌ای توصیه کرده‌اند [۹]. Kampouri و همکاران (۲۰۱۸) شاخص تنوع گونه‌ای سیمپسون را با استفاده از داده‌های طیفی دوزمانه فصل تابستان و زمستان (به دلیل حضور گونه‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در منطقه) سنتینل ۲ و داده‌های غیرطیفی کمکی (مانند ارتفاع و شیب) با دقت قابل قبولی در بخشی از جنگل‌های به نسبت تنک یونان برآورد کردند [۱۰]. Hoffmann و همکاران (۲۰۱۸) ترکیب داده‌های لایدار و سنتینل را برای برآورد تنوع گونه‌ای به کار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که ۸۵ درصد تغییرات تنوع گونه‌ای توسط داده‌های مورد استفاده

جنگل شده است [۱]. مدیریت جنگل در افزایش یا کاهش تنوع گونه‌ای نقش اساسی دارد.

Turner (۲۰۱۴) روش‌های برآورد تنوع زیستی با استفاده از سنجش از دور را به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرده است. در روش غیرمستقیم، محصولات تصاویر سنجش از دوری همانند شاخص‌های گیاهی در ترکیب با دیگر عوامل مؤثر بر تنوع زیستی همانند عوامل اقلیمی در مدل‌سازی تنوع زیستی استفاده می‌شوند. در روش مستقیم تغییرات انرژی دریافت‌شده توسط سنجنده به‌عنوان نمایه‌ای از تغییرات گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که روش مستقیم در مطالعات سنجش از دوری، بیشتر استفاده می‌شود [۲]. سنجش از دور در مطالعه تنوع زیستی به سه شکل تنوع گونه‌ای، تنوع ساختاری و تنوع عملکردی کاربرد دارد. تنوع گونه‌ای به بررسی تنوع گونه‌های درختی می‌پردازد، تنوع ساختاری بیانگر تنوع آرایش و پراکنش در ساختار جنگل است و در نهایت، تنوع عملکردی به تنوع در عملکردهای اکولوژیکی و فرایندی جنگل می‌پردازد [۳]. Skidmore و همکاران (۲۰۱۵) در کنار توصیه به استفاده از داده‌های سنجش از دور در برآورد تنوع زیستی، ۱۰ متغیر اصلی قابل استخراج از داده‌های ماهواره‌ای را برای مطالعه تنوع زیستی معرفی کرده‌اند. اولین و مهم‌ترین متغیر در این پژوهش، مقدار حضور گونه‌ها یا تنوع گونه‌ای است [۴].

«تنوع گونه‌ای» از سطوح مهم تنوع زیستی در جنگل است که در پایداری اکوسیستم‌های جنگلی اهمیت بسیار زیادی دارد، بنابراین پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام گرفته است. پرما و شتایی (۲۰۱۰) در برآورد تنوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای با استفاده از شاخص شانون وینر و داده‌های سنجنده ETM^+ در جنگل‌های فلاجیه استان کرمانشاه به قابلیت به نسبت ضعیف داده‌های این سنجنده (۰/۳۳ $R^2_{adj}=$ اشاره کرده‌اند [۵]. محمدی و همکاران (۲۰۱۱) نیز با استفاده از داده‌های سنجنده ETM^+ و به‌کارگیری روش‌های

بودند. ظهور سنجنده‌های پیشرفته‌تر ایجاب می‌کند که توانایی این سنجنده‌ها نیز آزمایش شود. در این پژوهش تلاش شده است که با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل ۲^۱، امکان برآورد تنوع زیستی گونه‌ای در جنگل‌های به‌نسبت تنک زاگرس بررسی شود. با توجه ویژگی‌های مکانی و طیفی ماهواره سنتینل ۲^۲، امکان دستیابی به نتایج دقیق‌تر نسبت به دیگر پژوهش‌های انجام‌گرفته در منطقه، باید آزمون شود. نتایج چنین پژوهش‌هایی می‌تواند پاسخی به امکان برآورد تنوع زیستی و داده‌های ماهواره‌ای مناسب باشد.

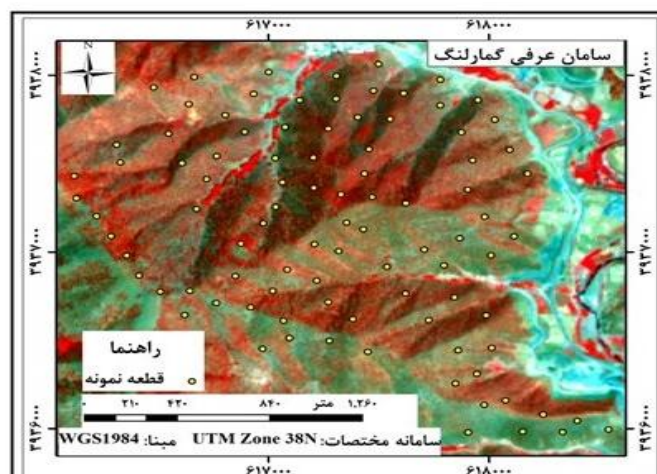
مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق

سامان عرفی گمارلنگ در حوزه آبخیز چناره در ۱۵ کیلومتری شهرستان مریوان در غرب کشور و در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی واقع شده است. این پژوهش در مساحتی حدود ۵۰۰ هکتار از جنگل‌های این سامان عرفی انجام گرفت (شکل ۱). بهره‌برداری‌های مختلف از توده‌های جنگلی سامان عرفی گمارلنگ، سبب ایجاد فرم رویشی شاخه‌زاد و شاخه-دانه‌زاد شده است. مهم‌ترین گونه‌های درختی این منطقه، وی‌ول (*Quercus libani Oliv.*)، مازودار (*Quercus infectoria Oliv.*) و برودار (*Quercus brantii Lindl.*) هستند که ۹۰ درصد پایه‌های آنها شاخه‌زادند و پایه‌های دانه‌زاد بیشتر از گونه‌های گلابی وحشی (*Pyrus syriaca*)، بنه (*Pistacia atlantica*)، زالزالک (*Crataegus spp.*) و کیکم (*Acer cinerascens* L.) هستند. تراکم تاج‌پوشش منطقه در پلات‌های مورد بررسی بین ۲۰ تا ۶۰ درصد بود و پوشش علفی کف جنگل در زمان اخذ تصویر و نمونه‌برداری (تیرماه ۱۳۹۵) در مرحله پایانی فنولوژی قرار داشت (زرد و خشک).

قابل بیان است [۱۱]. Arekhi و همکاران (۲۰۱۷) از داده‌های چندزمانه لندست ۸ برای برآورد تنوع گونه‌ای استفاده کردند. این پژوهش در بخشی از جنگل‌های معتدله غرب ترکیه با تنوع گونه‌ای به‌نسبت زیاد (حضور ۲۹ گونه متفاوت سوزنی‌برگ و پهن‌برگ) با استفاده از تصاویر چندزمانه لندست ۸ مربوط به ماه‌های می، ژوئن، جولای، سپتامبر، اکتبر و نوامبر سال ۲۰۱۳ انجام گرفت. به دلیل وجود گونه‌های خزان‌کننده و همیشه‌سبز و همچنین تعیین بهترین تاریخ تصویر برای رسیدن به هدف، از تصاویر چندزمانه استفاده شد. ارتباط شاخص‌های تنوع‌گونه‌ای در ماه‌های مختلف با داده‌های مربوط به آن زمان‌ها به صورت جداگانه بررسی آماری شد. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص NDVI حاصل از تصاویر مربوط به ماه ژوئن دارای بیشترین دقت و تصاویر مربوط به ماه اکتبر و نوامبر دارای کمترین دقت در برآورد تنوع گونه‌ای هستند. با توجه به نتایج به‌نسبت ضعیف ($R^2 = 0.36$)، نویسندگان پیشنهاد استفاده از داده‌های سنتینل را برای مطالعات پیش رو مطرح کردند [۱۲].

جنگل‌های زاگرس از جمله مناطق مهم و باارزش کشور ایران است که در سطح حدود ۶ میلیون هکتار آن، بالغ بر ۱۹۰ گونه درختی و درختچه‌ای وجود دارد. پایش تنوع گونه‌ای این جنگل‌ها برای حفاظت، ارزیابی پوشش گیاهی و اتخاذ راهکارهای مناسب مدیریتی ضروری است. از آنجا که برآورد تنوع گونه‌های جنگلی در یک مقیاس وسیع از طریق کارهای میدانی در شرایط جنگل‌های کوهستانی بسیار زمان‌بر و پرهزینه است، فناوری سنجنش از دور به کمک تصاویر ماهواره‌ای رقومی، چندزمانه، چندطیفی و بهنگام می‌تواند به‌طور چشمگیری در برآورد تنوع زیستی گونه‌های چوبی کمک کند و اطلاعات وسیعی را از وضعیت جنگل‌ها در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان قرار دهد [۱۳]. پژوهش‌های گذشته استفاده از داده‌های سری لندست را در جنگل‌های زاگرس لحاظ کرده و نتایج به‌نسبت کمی را کسب کرده



شکل ۱. منطقه تحقیق و موقعیت نقاط نمونه برداری در تصویر رنگی سنتینل (RGB 8A,4,3)

تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ مربوط به تاریخ ۲۰۱۶/۰۷/۰۳ (۱۳ تیر ۱۳۹۵) با چهار باند طیفی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک (اندازه تفکیک مکانی ۱۰ متر)، شش باند طیفی در محدوده مادون قرمز کوتاه و لبه قرمز (قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر) و سه باند طیفی با اندازه تفکیک مکانی ۶۰ متر استفاده شد. این تصاویر از سایت سازمان فضایی اروپا (www.scihub.copernicus.eu) با مبنای WGS1984 دریافت شد.

قطعات نمونه

ابتدا پنج منطقه انتخاب شدند که در ظاهر دارای تنوع گونه‌ای و تراکم متفاوت بودند. سپس در هر منطقه به‌طور تصادفی چند قطعه نمونه پیاده شد. در مجموع ۸۹ قطعه نمونه مربع شکل به ابعاد ۴۰×۴۰ متر در مهر ماه سال ۱۳۹۵ برداشت شد (شکل ۱). در هر قطعه نمونه، نوع گونه و تعداد گونه‌های چوبی (درخت و درختچه) شمارش و یادداشت شدند.

پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها

محاسبه شاخص‌های تنوع زیستی برای هر قطعه نمونه

شاخص‌های تنوع زیستی شامل شاخص یکنواختی^۱، شاخص

1. Evenness index

غنای گونه‌ای^۲ و شاخص تنوع گونه‌ای^۳ در این پژوهش بررسی شد. شاخص فیشر آلفا^۴ از جمله شاخص‌های یکنواختی، شاخص مارگالف^۵ از جمله شاخص‌های غنای گونه‌ای و شاخص‌های شانون-وینر^۶ و سیمپسون^۷ از جمله شاخص‌های تنوع گونه‌ای اند [۱۴]. در همه این شاخص‌ها مقادیر بیشتر نشان‌دهنده تنوع بیشتر است.

بررسی کیفیت تصاویر ماهواره‌ای و پیش‌پردازش اولیه

تصاویر سنجنده MSI سنتینل ۲ در سطح تصحیحات L1C (تصحیح رادیومتری و هندسی با حذف اثر توپوگرافی) دریافت شدند. دقت هندسی تصاویر با استفاده از نقشه رقومی جاده و آبراه‌های منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ کنترل شد.

پردازش و بارسازی تصاویر ماهواره‌ای

شاخص‌های گیاهی استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجا که در مناطق جنگلی کم‌تراکم، ترکیب پیچیده نوع خاک و پوشش‌های تنک گیاهی، امکان استخراج اطلاعات قابل اعتماد را کاهش می‌دهد، از شاخص‌های گیاهی که قادرند اثرهای خاک زمینه را نیز

2. Species richness
3. Diversity index
4. Fisher-alpha
5. Margalef
6. Shannon-Wiener
7. Simpson

یکی از مزایای مهم تصاویر سنتینل ۲، وجود سه بانده طیفی با پهنای باندی کم در محدوده لبه قرمز است. در کنار استفاده از این باندها به تنهایی در تحلیل رگرسیونی، شاخص‌های گیاهی که براساس باندهای لبه قرمز توسعه داده شده‌اند و در مطالعات گذشته پیشنهاد شده بودند نیز در این بررسی استفاده شد (شاخص‌های ۶ تا ۹ از جدول ۱).

کاهش دهند استفاده شد، همانند SAVI و TSAVI2 که در مطالعات گذشته پیشنهاد داده شده بود [۱۵]. به منظور محاسبه شیب خط خاک و عرض از مبدأ مورد نیاز در معادله خط خاک از ارزش‌های باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک ۱۵ پلات که در محل خاک بدون پوشش برداشت شده بود، استفاده شد.

جدول ۱. شاخص‌های گیاهی استفاده شده در این پژوهش برای ماهواره سنتینل ۲

منبع	فرمول	شاخص
Birth and Mc Vey (1968)	$SR = \frac{B8}{B4}$	^۱ SR
Rouse <i>et al</i> (1974)	$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$	^۲ NDVI
Huete (1988)	$SAVI = \frac{B8 - B4}{(B8 + B4 + L)} \times (1 + L)$ پوشش گیاهی کم L=1 پوشش گیاهی متوسط L=0.5 پوشش گیاهی زیاد L=0	^۳ SAVI
Baret and Guyot (1991)	$TSAVI2 = \frac{a(B8 - aB4 - b)}{B4 + aB8 - ab + 0.08(1 + a^2)}$	^۴ TSAVI2
Clever (1988)	$WDVI = B8 - aB4$	^۵ WDVI
Dash and Curran (2004)	$MTCI = \frac{B6 - B5}{B5 + B4}$	^۶ MTCI
Frampton <i>et al</i> (2013)	$S2REP = 700 + 35 * \left(\frac{\frac{B7 + B4}{2} - B5}{B6 + B5} \right)$	^۷ S2REP
Merzlyak <i>et al</i> (1999)	$PSRI = \frac{B4 - B3}{B6}$	^۸ PSRI
Frampton <i>et al</i> (2013)	$IRECI = \frac{(B7 - B4)}{B8/B6}$	^۹ IRECI

a: شیب خط خاک و b: عرض از مبدأ خط خاک

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها^{۱۰}

تحلیل رگرسیونی

در این پژوهش از رگرسیون چندمتغیره به روش گام به گام^{۱۰} استفاده شد. از ۸۹ قطعه نمونه برداشت شده، ۶۶ قطعه نمونه برای برآورد مدل رگرسیونی و ۲۳ قطعه نمونه برای اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی استفاده شدند.

نرمال بودن شاخص‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد و از عامل تورم واریانس برای بررسی مقدار هم خطی استفاده شد. برای ارزیابی و انتخاب مدل مناسب از ضریب تبیین تعدیل شده (R^2_{adj})، میانگین مربع خطای برآورد (RMSE) و درصد آن ($RMSE_r$) (رابطه‌های ۱ و ۲) و همچنین مقدار اریبی (Bias) و درصد اریبی ($Bias_r$) (رابطه‌های ۳ و ۴) استفاده شد [۱۶]. نرمال بودن خطای باقی مانده‌ها نیز با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\hat{y} - y)^2}{n}} \quad (1)$$

1. Simple Ratio
2. Normalized Difference Vegetation Index
3. Soil-Adjusted Vegetation Index
4. Transformed Soil Adjusted Vegetation Index2
5. Weighted Difference Vegetation Index
6. MERIS Terrestrial Chlorophyll Index
7. Sentinel-2 Red-Edge Position
8. plant senescence reflectance index
9. Inverted Red-Edge Chlorophyll Index
10. Stepwise

شاخص‌های تنوع گونه‌ای سیمپسون ($R^2=0/57$)
 (RMSE=0/11, $R^2=0/55$)، غالبیت سیمپسون
 و شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر ($R^2=0/50$)
 (RMSE=0/23) با دقت بیشتری انجام گرفت (جدول ۳).
 شاخص‌های حاصل از لبه‌قرمز (PSRI و S2REP, MTCI) با
 شاخص‌های تنوع زیستی دارای ضریب همبستگی بین 0/5 تا
 0/6 بودند، اما بهترین مدل‌های رگرسیونی با ترکیب دیگر
 باندها حاصل شد. بررسی نرمال بودن خطای باقی‌مانده‌ها نیز
 نشان داد که در همه مدل‌ها پراکنش خطای باقی‌مانده‌ها دارای
 توزیع نرمال است ($p > 0/05$).

با توجه به اینکه منطقه تحقیق دارای پوشش درختی
 کم و جنگل تنک است، استفاده از شاخص‌های گیاهی
 برای به حداقل رساندن انعکاس پس‌زمینه ضروری به‌نظر
 می‌رسد [۱۵]. نتایج نیز بیانگر تأثیر معنی‌دار شاخص‌های
 WDVI و Ratio در برآوردهاست (جدول ۲).

$$RMSE_r = \frac{RMSE}{Y} \times 100 \quad (2)$$

$$Bias = \frac{\sum (y' - y)}{n} \quad (3)$$

$$Bias_r = \frac{Bias}{Y} \quad (4)$$

\hat{y} = مقدار تنوع برآوردشده در هر قطعه نمونه براساس
 مدل رگرسیونی

Y = مقدار اندازه‌گیری‌شده در محل قطعات نمونه

Y = میانگین حسابی اندازه‌گیری‌شده در قطعات نمونه

n = تعداد قطعات نمونه

نتایج و بحث

نتایج برآورد شاخص‌های تنوع زیستی با استفاده از

تصاویر ماهواره سنتینل ۲

نتایج تحلیل رگرسیون شاخص‌های تنوع با استفاده از ماهواره
 سنتینل ۲ در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که برآورد

جدول ۲. نتایج مدل رگرسیون چندمتغیره خطی برای برآورد تنوع زیستی

RMSE _r	RMSE	Adjusted R ²	R ²	VIF	Sig.	t	ضرایب متغیرها	مدل رگرسیونی	شاخص تنوع زیستی
				-	0/001	3/443	0/811	Constant	
22/63	0/11	0/53	0/55	5/086	0/003	-3/050	-17/219	b3	غالبیت
				6/168	0/000	6/424	14/928	b5	سیمپسون
				1/510	0/000	-6/627	-11/377	b9	
				-	0/009	2/705	1/076	Constant	
23/16	0/23	0/47	0/50	1/774	0/000	6/319	18/291	WDVI	تنوع گونه‌ای
				5/933	0/000	-5/431	-25/656	b5	شانون
				7/559	0/000	4/545	64/831	b3	
				-	0/283	1/084	0/257	Constant	
21/39	0/11	0/54	0/57	2/669	0/000	6/691	15/063	b9	تنوع گونه‌ای
				6/217	0/000	-6/736	-15/502	b5	سیمپسون
				4/530	0/000	-3/358	-0/106	SR	
				-	0/255	-1/148	-0/851	Constant	
22/78	0/38	0/20	0/23	1/09	0/000	-3/875	-0/484	b8A	یکنواختی فیشر
				1/09	0/004	2/998	14/295	b9	
				-	0/035	-1/736	-1/258	Constant	
30/96	0/28	0/24	0/26	1/09	0/000	-4/133	-0/392	b8A	غنای گونه‌ای
				1/09	0/010	3/428	12/39	b9	مارگالف

معنی‌داری در مدل‌های نهایی وارد شده‌اند. باند طیفی سبز (باند ۳) در محدوده مرئی طیف الکترومغناطیسی هم حساسیت زیادی به تغییرات کلروفیل دارد که نتایج این پژوهش هم نشان داد که از این طول موج می‌توان در مطالعات تنوع گونه‌ای استفاده کرد. همه پژوهش‌های ذکر شده به اهمیت محدوده طیفی لبه‌قرمز تأکید دارند؛ محدوده‌ای که نبود آن در ماهواره‌های چندطیفی مانند لندست، قابلیت آنها را در مطالعات گیاهی محدود کرده است. نتایج ارزیابی اعتبار مدل‌های رگرسیونی نیز با استفاده از داده‌های شاهد در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی صحت مدل‌های رگرسیون برای برآورد تنوع زیستی

Bias _r	Bias	RMSE _r	RMSE	شاخص تنوع زیستی
۱/۲۰	۰/۰۰۶	۱۳/۸۰	۰/۱۶	غالبیت سیمپسون
-۵/۱۴	-۰/۰۵۳	۳۵/۲۳	۰/۳۶	تنوع گونه‌ای شانون
-۳/۱۸	-۰/۰۱۶	۲۸/۱۲	۰/۱۴	تنوع گونه‌ای سیمپسون
-۶/۹۴	-۰/۰۸	۳۱/۸۴	۰/۳۹	یکنواختی فیشر
-۵۸/۴۸	-۰/۵۶	۶۵/۷۴	۰/۶۴	غنای گونه‌ای مارگالف

با توجه به اینکه در دستورالعمل تهیه طرح‌های جنگلداری چندمنظوره جنگل‌های خارج از شمال سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور [۲۰]، مقدار خطای حداکثر ۲۰ درصد در آماربرداری زمینی قابل قبول است، نتایج برآوردها در این پژوهش با استفاده از رگرسیون چندمتغیره دارای دقت متوسطی است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی با استفاده از دیگر روش‌های آماری مانند روش‌های آماری ناپارامتری، امکان افزایش صحت برآوردها، بررسی شود.

Rocchini و همکاران (۲۰۱۸) بیان می‌کنند که براساس نظریه تغییرات طیفی، هرچه ناهمبندی تغییرات طیفی زیادتر باشد، به همان نسبت آشیان اکولوژیک وسیع‌تری برای زندگی ارگانیسم‌ها وجود دارد و تنوع زیستی آن اکوسیستم بیشتر است [۲۱]. با در نظر گرفتن این نکته می‌توان انتظار داشت که در پژوهش‌های با گستره وسیع، بتوان به نتایج قابل

با توجه به تراکم کم جنگل‌های بررسی شده، داده‌های سنتینل ۲ به دلیل توان تفکیک مکانی مناسب (۱۰ متر و ۲۰ متری)، دارای پتانسیل متوسطی در برآورد شاخص‌های تنوع زیستی هستند. پرما و شتایی (۲۰۱۰) در برآورد تنوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای در جنگل‌های زاگرس با استفاده از شاخص شانون وینر به قابلیت ضعیف تصاویر سنجنده ETM+ اشاره داشتند ($R^2 = 0/33$) [۵]. در پژوهش حاضر، شاخص شانون وینر با دقت بیشتری قابل برآورد است ($R^2 = 0/50$). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تصاویری با توان تفکیک مکانی زیاد، توانایی بیشتری در برآورد تنوع گونه‌ای دارند [۸]. Fricker و همکاران (۲۰۱۵) نیز بیان کردند که داده‌های ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی زیاد می‌تواند تا حد زیادی تغییرات غنای گونه‌ای را برآورد کنند [۱۷]. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که در ماهواره سنتینل ۲، باندهای طیفی که در محدوده لبه‌قرمز و مادون قرمز نزدیک قرار گرفته‌اند (همانند باندهای ۵، ۹ و ۸-A) به‌طور معنی‌داری در مدل‌ها وارد شده‌اند. تغییرات ساختار سلولی برگ، عامل تعیین‌کننده مقدار انعکاس گیاه سبز در محدوده طیفی مادون قرمز نزدیک است. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان کرد که چون گونه‌های گیاهی متفاوت، ساختار درون‌سلولی متفاوتی دارند، این محدوده طیفی که قادر به ثبت این اطلاعات است در تشخیص تنوع گونه‌ای مؤثر واقع شده است [۱۸]. در منحنی رفتار طیفی گیاه سبز، محدوده‌ای از طول موج که مقدار انعکاس یکباره و ناگهان افزایش می‌یابد، اصطلاحاً لبه‌قرمز (Red-edge) نامیده می‌شود. لبه‌قرمز به شدت به تغییرات مقدار کلروفیل برگ حساس است و از مهم‌ترین محدوده‌های طیفی است که در تشخیص و تفکیک‌پذیری گیاهان کاربرد وسیعی دارد [۱۹]. ویژگی شاخص ماهواره سنتینل ۲ در مقایسه با تصاویر ماهواره لندست، دارا بودن سه باند طیفی با پهنای باند باریک در محدوده لبه‌قرمز است که به‌صورت

آماربرداری زمینی در جنگل‌های زاگرس [۲۰]، می‌توان بیان داشت که مدل‌سازی شاخص‌های غالبیت سیمپسون، تنوع گونه‌ای شانون وینر و تنوع گونه‌ای سیمپسون با دقت متوسط در حدود ۲۰ درصد امکان‌پذیر است. با توجه به نتایج متوسط پژوهش حاضر می‌توان توصیه کرد که این گونه پژوهش‌ها برای سطوح کوچک مناسب نیستند و شاید در سطوح وسیع کاربرد داشته باشند. بیشتر بودن توان تفکیک مکانی تصاویر ماهواره سنتینل ۲ نسبت به ماهواره لندست و همچنین وجود باندهای طیفی در محدوده لبه‌قرمز، نتایج بهتری نسبت به پژوهش‌های انجام‌گرفته در جنگل‌های زاگرس ارائه داده است.

قبول‌تری برای برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای دست یافت. از آنجا که Schneider و همکاران (۲۰۱۶) تنوع عملکردی و ساختاری را با استفاده از ترکیب داده‌های لایدار و فراطیفی با دقت زیادی در سطوح کوچک برآورد کردند [۲۲]، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده این دو شاخص تنوع نیز بررسی شوند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر امکان برآورد شاخص‌های تنوع زیستی سیمپسون، شانون وینر، مارگالف، فیشرفا و شاخص غالبیت سیمپسون با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ بررسی شد. با پذیرش مقدار خطای ۲۰ درصد در

References

- [1]. Carlsson, M. (1999). A method for integrated planning of timber production and biodiversity: a case study. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(8): 1183-1191.
- [2]. Turner, W. (2014). Sensing biodiversity. *Science*, 346(6207): 301-302.
- [3]. Lausch, A., Bannehr, L., Beckmann, M., Boehm, C., Feilhauer, H., Hacker, J.M., Heurich, M., Jung, A., Klenke, R., Neumann, C., and Pause, M. (2016). Linking earth observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: local to ecosystem perspectives. *Ecological indicators*, 70: 317-339.
- [4]. Skidmore, A. K., and Pettorelli, N. (2015). Agree on biodiversity metrics to track from space: ecologists and space agencies must forge a global monitoring strategy. *Nature*, 523(7561): 403-406.
- [5]. Parma, R., and Shataee, Sh. (2010). Capability study on mapping the diversity and canopy cover density in Zagros forests using ETM+ images (case study Ghalajeh forests, Kermanshah province), *Iranian Journal of Forest*, 2(3): 231-242.
- [6]. Mohammadi, J., Shataee, Sh., and Babanezhad, M. (2011). Estimation of forest stand volume, tree density and biodiversity using Landsat ETM+ Data, comparison of linear and regression tree analyses. *Procedia Environmental Science*, 7: 299-304.
- [7]. Griffiths, Gh., and Lee, J. (2000). Landscape pattern and species richness; regional scale analysis from remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 21(13-14): 2685-2704.
- [8]. Ozkan, U. Y., Ozdemir, I., Saglam, S., Yesil, A., and Demirel, T. (2016). Evaluating the Woody Species Diversity by Means of Remotely Sensed Spectral and Texture Measures in the Urban Forests. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(5): 687-697.
- [9]. Ganivet, E., and Bloomberg, M., (2019). Towards rapid assessments of tree species diversity and structure in fragmented tropical forests: A review of perspectives offered by remotely-sensed and field-based data. *Forest Ecology and Management*, 432: 40-53.
- [10]. Kampouri, M., Kolokoussis, P., Argialas, D., and Karathanassi, V. (2018). Mapping of forest tree distribution and estimation of forest biodiversity using Sentinel-2 imagery in the University Research Forest Taxiarchis in Chalkidiki, Greece. *Geocarto International*, 33: 1-13.
- [11]. Hoffmann, S., Schmitt, T. M., Chiarucci, A., Iri, S. D. H., Vetaas O. R., Tanase, M. A., Mermoz, S., Bouvet, A., and Beierkuhnlein, C. (2018). Remote sensing of beta β -diversity: evidence from plant communities in a semi-natural system. *Applied Vegetation Science*, 22(1): 13-26.

- [12]. Arekhi, M., Yılmaz, O. Y., Yılmaz, H., and Akyüz, Y. F. (2017). Can tree species diversity be assessed with Landsat data in a temperate forest?. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(11): 586-596.
- [13]. Rocchini, D., Boyd, D.S., Feret, J.B., Foody, G. M., He, K. S., Lausch, A., Nagendra, H., Wegmann, M., and Pettorelli, N., (2016). Satellite remote sensing to monitor species diversity: potential and pitfalls. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2(1): 25-36.
- [14]. Mesdaghi, A. (2005). Biodiversity (classification, value, evaluation with obvious and different examples). Moje Sabz Publications, Tehran.
- [15]. Anderson, G. L., and Hanson, J. D. (1992). Evaluating hand-held radiometer derived vegetation indices for estimating above ground biomass. *Geocarto International*, 7(1): 71-78.
- [16]. Chahoki, M. A. Z. (2011). Data analysis in natural resources research by SPSS. Academic Center of Education and Research-Tehran Branch, Tehran.
- [17]. Fricker, G., Wolf, J., Saatchi, S., and Gillespie, T.W. (2015). Predicting spatial variations of tree species richness in tropical forests from high-resolution remote sensing. *Ecological Applications*, 25(7): 1776-1789.
- [18]. Shoko C., and Mutanga, O. (2017). Examining the strength of the newly-launched Sentinel 2 MSI sensor in detecting and discriminating subtle differences between C3 and C4 grass species. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 129: 32-40.
- [19]. Sibanda, M. , Mutanga, O., and Rouget, M. (2015). Examining the potential of Sentinel-2 MSI spectral resolution in quantifying above ground biomass across different fertilizer treatments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 110: 55-65.
- [20]. Anonymous. (2003). Manual of forestry plan preparation for out of north forests, Forest, Range and Watershed management organization.
- [21]. Rocchini, D., Luque, S., Pettorelli, N., Bastin, L., Doktor, D., Faedi, N., and Godinho, S. (2018). Measuring β -diversity by remote sensing: A challenge for biodiversity monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(8): 1787-1798.
- [22]. Schneider, F. D., Morsdorf, F., Schmid, B., Petchey, O. L., Hueni, A., Schimel, D. S., and Schaepman, M. E. (2016). Mapping functional diversity from remotely sensed morphological and physiological forest traits. *Nature Communication*, 8(1): 1-12.

Possibility of estimating the woody species diversity using Sentinel optical imagery (Case study: Marivan forests)

A. Saed Mocheshei; M.Sc. Graduate, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, I.R. Iran

M. Pir Bavaghar*; Assoc. Prof., Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, The Center for Research and Development of Northern Zagros Forestry, University of Kurdistan, Sanandaj, I.R. Iran

N. Shabaniyan; Assoc. Prof., Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, The Center for Research and Development of Northern Zagros Forestry, University of Kurdistan, Sanandaj, I.R. Iran

P. Fatehi; Assist. Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

(Received: 23 October 2018, Accepted: 28 April 2019)

ABSTRACT

This study aims at investigating the possibility of using remote sensing to estimate the woody species diversity which plays an important role in the sustainability of forest ecosystems. For this purpose, Sentinel-2 imagery data was used over a part of the Marivan forests, Iran. The study site with an area of about 500 ha was investigated through field observation. 89 field-plots with a size of 40 m × 40 m were selected over the whole area. Within each plot, tree species and number of each species were recorded. Different woody species diversity indices i.e. Simpson, Shannon-Wiener, Margalef, Fisher-alpha, and Dominance were calculated for each sample plot. Satellite imagery of sentinel-2 level 1C product was provided. Different vegetation indices were generated from the original bands of satellite imagery, and the digital values were extracted from spectral bands, and vegetation indices based on the field sample plots. In the next step, the correlation between extracted digital values (i.e. spectral data) and species diversity indices was investigated for 66 sample plots, and stepwise multiple regression was applied. The validation procedure based on 23 sample plots showed that the Sentinel-2 data predict Simpson index ($R^2 = 0.57$, $RMSE_r = 21.39\%$), Dominant index ($R^2 = 0.55$, $RMSE_r = 22.63\%$) and Shannon-Wiener index ($R^2 = 0.50$, $RMSE_r = 23.16\%$) were more accurate than other species diversity indices. Based on the results of this study, it could be concluded that Sentinel-2 images have a moderate ability to estimate species diversity in Zagros forests.

Keywords: Biodiversity indices, Regression models, Sentinel-2 satellite, Zagros forests.

* Corresponding Author, Email: m.bavaghar@uok.ac.ir, Tel: +988733664600