

برآورد شاخص سطح برگ در جنگل‌های زاگرس شمالی با استفاده از سنجش از دور (بررسی موردی: بخشی از جنگل‌های بانه)

گلاله مرادی^۱، مهتاب پیرباوقار^{۲*}، زاهد شاکری^۳ و پرویز فاتحی^۴

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. (golale.moradi@yahoo.com)
- ۲- دانشیار، گروه جنگلداری، عضو مرکز پژوهش و توسعه جنگلداری زاگرس شمالی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. (m.bavaghar@uok.ac.ir)
- ۳- پژوهشگر گروه تعاملات اکولوژیک اجتماعی در بوم‌سازگان‌های کشاورزی، دانشگاه گوتینگن و دانشگاه کاسل، آلمان. (shakeri.zahed@gmail.com)
- ۴- استادیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. (parviz.fatehi@ut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۰۷

چکیده

در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ به برآورد شاخص سطح برگ در جنگل‌های بانه پرداخته شد. عکس‌های نیم‌کروی در ۵۸ قطعه نمونه زمینی با ابعاد ۲۰×۲۰ متر با استفاده از دوربین مجهز به عدسی چشم ماهی برداشت شدند و شاخص سطح برگ در هر قطعه نمونه محاسبه شد. پردازش‌های موردنیاز بر روی تصاویر ماهواره‌ای انجام و شاخص‌های گیاهی مختلف تهیه شد. از داده‌های شیب، جهت و ارتفاع نیز به‌عنوان داده‌های کمکی استفاده شد. ارزش‌های طیفی تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های غیرطیفی در محل قطعات نمونه استخراج شدند. بررسی همبستگی بین شاخص سطح برگ و ارزش‌های طیفی نشان داد که باند قرمز از بین باندهای اصلی و شاخص TNDVI (شاخص تبدیل شده تفاوت پوشش گیاهی نرمال) از بین تمامی باندها، بالاترین همبستگی را با شاخص سطح برگ دارند. نتایج بررسی رگرسیونی نشان داد در استفاده از باندهای اصلی، مدل حاصل از باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک با $RMSE = 22$ درصد و $R^2 = 0.753$ و در استفاده توأمان تمامی داده‌های طیفی و غیرطیفی، مدل حاصل از شاخص TNDVI و ارتفاع با $RMSE = 20$ درصد و $R^2 = 0.781$ دقت بالاتری دارند.

واژه‌های کلیدی: تصاویر سنتینل-۲، چشم ماهی، رگرسیون چندگانه، عکس‌برداری نیم‌کروی.

جنگلی وسیع توصیه نمی‌شود، اگرچه در مقیاس تک‌درخت، از این روش در اندازه‌گیری مقدار شاخص سطح برگ استفاده می‌شود (Abbasi, 2014). پایش درازمدت شاخص سطح برگ توسط روش‌های اندازه‌گیری مستقیم در عمل امکان‌پذیر نیست. روش‌های سنجش‌ازدوری می‌تواند این محدودیت‌های روش‌های مستقیم و دیگر روش‌های غیرمستقیم زمینی را جبران کند و شاخص سطح برگ در مقیاس‌های مختلف و در سطوح وسیع را برآورد کنند. پژوهش‌های زیادی در خارج از کشور برای برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام گرفته است. به‌عنوان مثال Korhonen و همکاران (2017) در پژوهشی به مقایسه دو ماهواره سنتینل-۲ و لندست ۸ در برآورد تاج‌پوشش و شاخص سطح برگ در جنگل‌های بورآل در فنلاند پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر برآوردی دارای تفاوت معنی‌داری باهم نیستند. Zhao و همکاران (2015) در پژوهشی شاخص سطح برگ را با ترکیب داده‌های دو ماهواره HJ1/CCD و Landsat8/OLI در منطقه‌ای در چین برآورد کردند. محاسبه شاخص سطح برگ از ترکیب دو تصویر نتایج قابل قبولی نسبت به تصاویر جدا از هم ارائه داد. Persson (2014) پژوهشی را برای برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای SPOT در جنگل‌های خزان‌کننده جنوب سوئد انجام دادند. نتایج نشان داد که شاخص سطح برگ و شاخص‌های پوشش گیاهی و داده باندها مادون‌قرمز نزدیک دارای رابطه خطی و همبستگی قوی (حدود ۰/۸) باهم می‌باشند. Johanson و همکاران (2003)، به تهیه نقشه شاخص سطح برگ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی IKONOS در ساحل شمالی کالیفرنیا پرداختند. در این پژوهش از شاخص NDVI برای پیش‌بینی شاخص سطح برگ استفاده شد و اندازه-

شاخص سطح برگ به‌عنوان سطح کل یک‌طرف برگ گیاهان در واحد سطح زمین تعریف می‌شود (Meyer et al., 2019) و برای توده جنگلی، نسبت مجموع سطح تمامی برگ‌های درختان موجود در توده به مساحت اشغال‌شده توسط تاج‌پوشش درختان است (Deljouei et al., Liu et al., 2015; Heiskanen, 2006). این شاخص از مهم‌ترین مشخصه‌های ساختاری اکوسیستم‌های جنگلی است که اطلاعات زیادی در ارتباط با پویایی جنگل، میزان فتوسنتز، تبخیر و تعرق، تولید خالص اولیه، ضریب تبادل انرژی و کربن بین پوشش گیاهی و جو در اختیار مدیران، برنامه‌ریزان و پژوهش‌گران قرار می‌دهد (Adl, 2007; Gonsamo, Ryu et al., 2012; Behera et al., 2010; & Chen, 2014). شاخص سطح برگ برای شناخت عملکرد تاج‌پوشش نیز مفید است؛ زیرا بسیاری از تبدلات بین زیست‌کره و جو از سطح برگ اتفاق می‌افتد؛ بنابراین این مشخصه اغلب به‌عنوان یک متغیر زیستی کلیدی در مدل‌های زیست‌شیمیایی، هیدرولوژیکی و بوم‌شناختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، شاخص سطح برگ می‌تواند نمایه‌ای از مقدار تولید و فتوسنتز درختان باشد (Breda, 2003; Liu et al., 2015). این مشخصه برای تعیین و کنترل مقدار باران‌ربایی و نور-ربایی (Light interception) نیز اهمیت دارد (Poblete-Echeverria et al., 2015). برای اندازه‌گیری مقدار شاخص سطح برگ از روش‌های زمینی و سنجش‌ازدوری استفاده می‌شود (Liu et al., 2015) که روش‌های زمینی خود به دو دسته روش‌های مستقیم و غیرمستقیم (برآوردی) دسته‌بندی می‌شوند (Olivas et al., 2013). اندازه‌گیری به روش‌های مستقیم زمان‌بر و پرهزینه است و به درختان نیز آسیب وارد می‌کند. هم‌چنین برای مناطق

داده‌های مختلف سنجش‌ازدوری نیاز است که ابتدا توانایی این داده‌ها در برآورد شاخص سطح برگ مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد. از آنجاکه ماهواره سنتینل-۲ داده‌های رایگان مناسبی با اندازه تفکیک مکانی ۱۰ و ۲۰ متر از پوشش زمین ارائه می‌دهد و در مقایسه با سنجنده OLI که در بخشی از جنگل‌های مریوان برای برآورد شاخص سطح برگ مورد استفاده قرار گرفته و نتایج نویدبخش را ارائه داده بود، دارای قدرت تفکیک مکانی و همچنین باندهای طیفی بیشتر (مانند باندهای مادون قرمز نزدیک با پهنای باریک و باندهای لبه قرمز است) است؛ می‌تواند در برآورد شاخص سطح برگ به‌ویژه در جنگل‌های تنک مؤثر باشند. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با استفاده از این داده‌ها امکان برآورد شاخص سطح برگ در بخشی از جنگل-های بانه مورد بررسی قرار گیرد. از آنجاکه اطلاعات طیفی همواره تنها بخشی از رفتار یک مشخصه اکولوژیکی را می‌تواند مدل کنند؛ بنابراین استفاده از مشخصه‌های غیرطیفی کمکی در برآورد مشخصه‌های کمی در سنجش‌ازدور سابقه طولانی دارد (Redowan, 2013)؛ به همین دلیل به‌منظور بررسی امکان برآورد بهتر شاخص سطح برگ، داده‌های غیرطیفی ارتفاع، شیب و جهت دامنه نیز مورد بررسی قرار گرفتند. هدف اصلی این پژوهش برآورد شاخص سطح برگ در بخشی از جنگل‌های زاگرس شمالی با استفاده از داده‌های طیفی ماهواره سنتینل-۲ و داده‌های غیرطیفی کمکی همانند داده‌های ارتفاع، شیب و جهت است. بررسی همبستگی هریک از باندهای طیفی و شاخص-های گیاهی با شاخص سطح برگ و تعیین بهترین مدل‌های رگرسیونی برآورد کننده شاخص سطح برگ نیز از اهداف فرعی این پژوهش به‌شمار می‌روند.

گیری زمینی شاخص سطح برگ با استفاده از ابزار LAI-2000 انجام شد. نتایج نشان داد که بهترین مدل ارائه‌شده با استفاده از رگرسیون خطی به‌صورت $LAI=5.7 * NDVI - 0.25$ با ضریب تعیین 0.73 است. پژوهش‌های بسیار کمی در داخل کشور برای برآورد شاخص سطح برگ انجام شده است. Miri و همکاران (2017) در پژوهشی به برآورد شاخص سطح برگ با داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در شهرستان مریوان پرداختند. در این پژوهش اندازه‌گیری زمینی به روش غیرمستقیم (عکس‌برداری نیم‌کروی) انجام شد. نتایج تحلیل رگرسیونی نشان داد که شاخص سطح برگ و شاخص‌های پوشش گیاهی SR و NDVI به ترتیب با ضریب تعیین (R^2) 0.682 و 0.678 ، به‌عنوان بهترین روابط برای برآورد شاخص سطح برگ از تصاویر ماهواره‌ای انتخاب شدند.

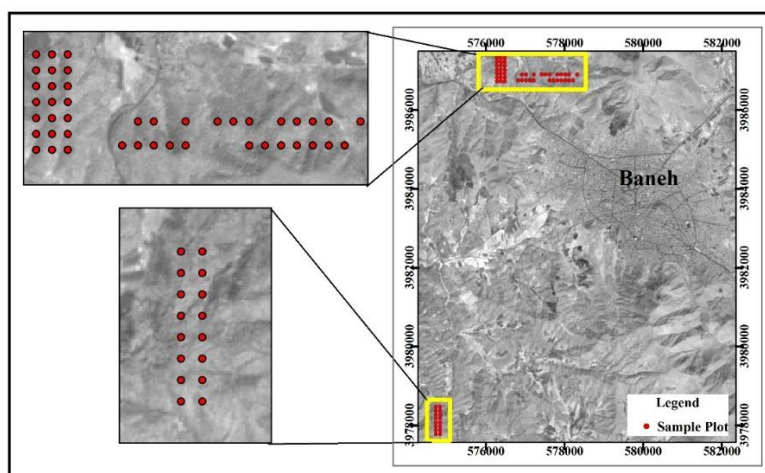
بررسی پیشینه پژوهش نشان داد که برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از سنجش‌ازدور در مناطق مختلف با دقت‌های متفاوتی انجام شده است که اندازه دقت با توجه به شرایط منطقه و نوع داده مورد استفاده متفاوت است. متأسفانه در جنگل‌های زاگرس تا به امروز پژوهش‌های اندکی در این زمینه انجام شده است (Miri et al., 2017). بیشتر این پژوهش‌ها نیز محدود به بررسی این مشخصه به روش‌های مخرب و روابط مربوط به پارامترهای درخت، توده و محیطی بوده است (Adl, 2007, Abbasi, 2014). استفاده از روش عکس‌برداری نیم-کروی نیز که در سال‌های اخیر برای برآورد شاخص سطح برگ مورد استفاده قرار گرفته است، در سطوح وسیع بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. این مطلب خود ضرورت انجام پژوهش موردنظر و بررسی امکان برآورد این شاخص به روش غیرمخرب در مناطق جنگلی را فراهم می‌آورد. برای استفاده کاربردی از

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

منطقه جنگلی مورد بررسی در بخشی از جنگل‌های شهرستان بانه قرار دارد (شکل ۱). دو منطقه جنگلی که از نظر شرایط توپوگرافی شبیه، اما از نظر تراکم تاج پوشش باهم تفاوت داشتند (با هدف جمع‌آوری دامنه بیشتری از شاخص سطح برگ) با مساحت حدود ۲۰۰ هکتار انتخاب شدند. در انتخاب مناطق این نکته در نظر گرفته شد که نشانه‌هایی از گل‌زنی در سال‌های اخیر وجود نداشته باشد. مناطق نمونه‌برداری شده دارای دامنه ارتفاعی بین ۱۴۴۷ تا ۱۸۰۰ متر است. میانگین بارش سالیانه شهرستان ۶۷۲/۵ میلی‌متر و

میانگین درجه حرارت سالیانه حدود ۱۳/۹ درجه سانتی‌گراد است. چرای بی‌رویه دام، تأمین سوخت و مصارف روستایی در جنگل، ساختار جنگل را در جنگل‌های زاگرس به‌ویژه جنگل مورد پژوهش به‌سوی فرم شاخه‌زاد سوق داده است. در جنگل مورد بررسی بیشترین درصد ترکیب درختی را سه گونه بلوط (برودار (*Quercus brantii* Lindl.))، مازودار (*Quercus libani* Oliv.) و وی‌ول (*Quercus infectoria* Oliv.) به خود اختصاص داده‌اند. منطقه بر اساس برآورد کیفی دارای تاج‌پوشش متوسط و در مناطقی کم (تاج پوشش حدود ۲۰ تا ۶۰ درصد) با پوشش علفی کف متوسط است.



شکل ۱- منطقه مورد بررسی و پراکنش قطعات نمونه برداشت‌شده بر روی تصویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ در هفت ترانسکت

Figure 1. Study area and distribution of sample plot on the Sentinel2-MSI in seven transect

تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ مربوط به تاریخ ۳۱ شهریورماه سال ۱۳۹۵ هجری شمسی (۲۱ سپتامبر ۲۰۱۶ میلادی) استفاده شد (شکل ۱). علت انتخاب این تاریخ، از بین رفتن پوشش علفی کف و جلوگیری از اختلاط طیفی آن با بازتاب تاج درختان بود. تصاویر از سایت سازمان

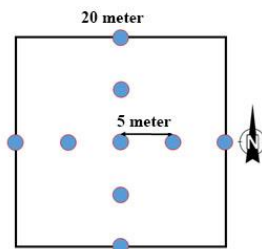
فضایی اتحادیه اروپا با مبنای WGS84 دریافت شد. در این پژوهش از باندهای ۲ (آبی)، ۳ (سبز)، ۴ (قرمز) و ۸ (مادون‌قرمز نزدیک) با اندازه تفکیک ۱۰ متری و همچنین از باندهای ۵، ۶، ۷، ۸a (باندهای لبه قرمز) و ۱۱، ۱۲ (SWIR) با اندازه تفکیک ۲۰ متری استفاده شد. باندهای ۱۰ متری سنتینل-۲ دارای پهنای باند بیشتری هستند که در مقایسه با باندهای ۲۰ متری

ترانسکت تعداد ۵۸ قطعه‌نمونه با ابعاد مربعی شکل ۲۰×۲۰ متر (حداقل اندازه قابل قبول قطعه‌نمونه برای تصاویر ۱۰ و ۲۰ متری ماهواره سنتینل-۲) در مهرماه سال ۱۳۹۵ پیاده‌سازی و برداشت شدند (شکل ۱). در هر قطعه‌نمونه برای اندازه‌گیری مقدار شاخص سطح برگ از عکس‌برداری نیم‌کروی و به‌کارگیری دوربین مجهز به عدسی چشم ماهی (Fish-eye) (روش غیرمستقیم) استفاده شد. به‌منظور پوشش تغییرات در داخل هر قطعه‌نمونه نه نقطه در فواصل پنج‌متر از یکدیگر در دو جهت شمالی-جنوبی و شرقی-غربی برداشت شد (Miri et al., 2017) (شکل ۲). ابتدا دوربین در نقطه مرکزی قطعه‌نمونه قرار گرفت و دیگر نقاط با استفاده از آزیموت و فاصله در داخل قطعه‌نمونه مکان‌یابی شدند. عکس‌برداری با دوربین چشم ماهی نصب‌شده بروی سه‌پایه (ارتفاع سه‌پایه از سطح زمین با توجه به شاخه‌زاد بودن توده‌ها برای ۷۰ سانتی‌متر تنظیم شد) انجام شد. میانگین شاخص سطح برگ ۹ عکس به‌عنوان شاخص سطح برگ برای آن قطعه‌نمونه محاسبه شد. در مجموع ۵۲۲ قطعه عکس برای تمامی قطعه‌نمونه‌ها برداشت شد. به‌منظور کاهش اثر نور مستقیم عکس‌برداری قبل از طلوع آفتاب و بعد از غروب خورشید (از غروب تا قبل از تاریکی مطلق) و یا در هوای ابری انجام شد.

واقع در محدود مادون‌قرمز منجر به کلی‌گرایی و میان‌گیری بیشتر باند طیفی خواهد شد. به بیانی دیگر مطلوب است که باندهای طیفی در کنار توان تفکیک مکانی بالا، پهنای باند باریک نیز داشته باشند؛ اما محدودیت‌های فنی این امکان را در خیلی از موارد فراهم نمی‌کند. در این پژوهش برای بررسی نقش تغییرات توان تفکیک مکانی و طیفی تمامی باندها مورد استفاده قرار گرفت. توان تفکیک رادیومتری این سنجنده ۱۲ بیت است.

تهیه داده‌های زمینی

ترانسکت‌ها با نقطه شروع انتخابی تصادفی در جهت‌های غربی- شرقی یا شمالی - جنوبی پیاده شدند. جهت ترانسکت‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شد که بیشترین طول جنگلی را پوشش دهد. نقطه ابتدایی ترانسکت به‌عنوان قطعه‌نمونه اول انتخاب و با استفاده از گیرنده سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) دستی مدل Garmin 78S مختصات آن ثبت شد. قطعه‌نمونه‌های دیگر در طول همان ترانسکت و با استفاده از قطب‌نما و متر (در فواصل ۱۰۰ متری از مرکز قطعه‌نمونه قبلی) جهت‌یابی و برداشت شدند. اگر قطعه‌نمونه‌ای در زمین‌های زراعی یا مناطق بدون پوشش جنگلی قرار می‌گرفت حذف و نقطه بعدی در راستای همان ترانسکت برداشت می‌شد. پس از شناسایی دو منطقه جنگلی واقع در شمال و جنوب غرب بانه در طول ۷



شکل ۲- نمای گرافیکی موقعیت قرارگیری دوربین چشم ماهی برای برداشت ۹ عکس در هر قطعه‌نمونه

Figure 2. Schematic presentation of a sample plot and the position of the fish eye camera to take nine photos

این رو لازم است این مقدار با استفاده از یک ضریب تصحیح اصلاح شود (رابطه ۱) (Abbasi, 2014).

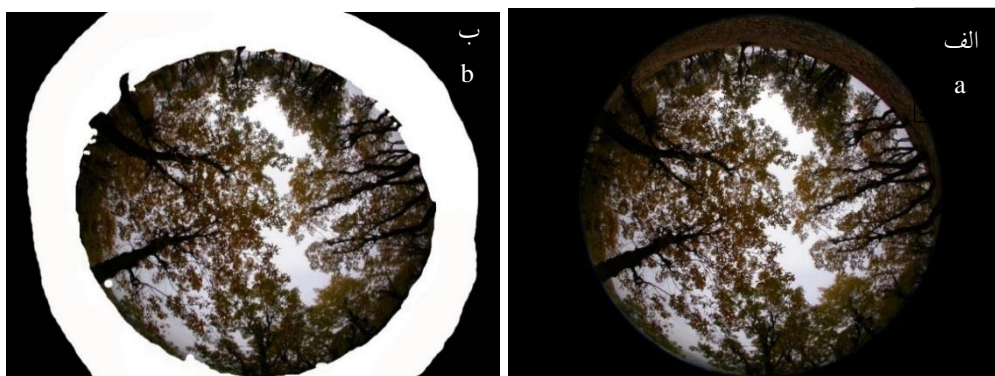
$$\text{LAI}(C) = \text{LAI}(E) + (\text{LAI}(E) \times 0.4) \quad (1)$$

در این رابطه $\text{LAI}(C)$ مقدار تصحیح شده شاخص سطح برگ و $\text{LAI}(E)$ مقدار برآوردی شاخص سطح برگ از عکس برداری نیم کروی است.

بررسی کیفیت تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ مورد استفاده در پژوهش حاضر از سایت سازمان فضایی اتحادیه اروپا در سطح تصحیحات LIC دریافت شد. برای اطمینان از هندسه تصاویر از نقشه‌های رقوم آبراهه‌ها و جاده‌های مربوط به نقشه‌های توپوگرافی رقوم ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مورد بررسی استفاده شد. همچنین بررسی عدم وجود خطاهای رادیومتری مانند پیکسل-های تکراری، با بهبود کنتراست و بزرگنمایی‌های تک باندها و ترکیبات رنگی مختلف بر روی نمایشگر رایانه انجام شد که نتایج حاکی از عدم وجود خطاهای هندسی و رادیومتری بود.

تمامی عکس‌های برداشت شده برای محاسبه مقادیر شاخص سطح برگ پردازش شدند. با توجه به ساختار شاخه‌زاد جنگل‌های مورد بررسی و ارتفاع پایین سه پایه دوربین در زمان عکس برداری قسمتی از زمین درون عکس قرار گرفته بود (شکل ۳ الف)؛ بنابراین در اولین مرحله سطح زمین ثبت شده داخل هر عکس با نرم افزار فتوشاپ حذف شدند (شکل ۳ ب). سپس عکس‌های نیم کروی ویرایش شده با استفاده از نرم افزار Gap Light Analyzer (GLA) پردازش و مقادیر شاخص سطح برگ برای عکس‌ها محاسبه شد (Miri et al., 2017, Stenberg et al, 1994). مقدار شاخص سطح برگ برای هر قطعه نمونه از میانگین شاخص سطح برگ محاسبه شده برای نه عکس موجود در هر قطعه نمونه به دست آمد. (Abbasi (2014 در پژوهشی که در جنگل‌های بانه انجام شد؛ نشان داد که مقدار شاخص سطح برگ برآورد شده توسط عکس-برداری نیم کروی کمتر از مقدار واقعی آن است؛ از



شکل ۳- الف: عکس اولیه از عکس برداری نیم کروی با دوربین چشم ماهی؛ ب: عکس ویرایش شده توسط نرم افزار فتوشاپ
Figure 3. a) Initial hemispherical photo captured by fish-eye camera; b) Process photo using photoshop

شاخص‌های پوشش گیاهی

نوردهی، کاهش اختلاط طیفی خاک پس‌زمینه و اثرات اتمسفری و همچنین افزایش اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی استفاده شد.

در این پژوهش از شاخص‌های پوشش گیاهی ارائه شده در جدول ۱ به منظور کاهش اثر عوامل ناخواسته روی پوشش گیاهی همانند کاهش اثر توپوگرافی بر

جدول ۱- شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده

Table 1. Applied vegetation indices

مرجع Reference	رابطه ریاضی Formula	نام شاخص Index name
Rouse <i>et al.</i> , 1974	$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$	NDVI
Tucker, 1979	$TNDVI = \sqrt{\frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)}} + 0.5$	TNDVI
Pinty & Verstraete, 1992	$GEMI = \frac{\mu(1-0.25\mu)-(RED-0.125)}{1-RED}$ $\mu = \frac{(NIR^2-RED^2)+1.5NIR+0.5RED}{NIR+RED+0.5}$	GEMI
Guyot <i>et al.</i> , 1988	$REIP = 700 + 40 * \left[\left(\frac{R_1+NIR}{2} - R_2 \right) / (R_3-R_2) \right]$	REIP
Huete, 1988	$SAVI = \frac{NIR-RED}{(NIR+RED+L)} \times (1+L)$ پوشش گیاهی پایین L=1، پوشش گیاهی متوسط L=0/5، پوشش گیاهی بالا L=0	SAVI
Baret and Guyot, 1991	$TSAVI = \frac{a(NIR-aRED-b)}{RED+aNIR-ab+0/08(1+a^2)}$	TSAVI
Qi <i>et al.</i> , 1994	$MSAVI = \frac{NIR-RED}{NIR-RED+L} (1+L)$ L=1-2a*NDVI*WDVI	MSAVI
Clevers, 1989	WDVI=NIR-aRED	WDVI
Tucker, 1979	DVI=NIR-RED	DVI
Richardson & Wiegand, 1977	$PVI1 = \frac{(aNIR-RED+b)}{\sqrt{a^2+1}}$	PVI1

RED: باند قرمز، NIR: باند مادون قرمز، a: شیب خط خاک و b: عرض از مبدأ خط خاک

NIR: Near-Infrared, a: Slope of soil line, b: Intercept of soil line

داده‌های غیرطیفی

تابش، کمترین ارزش یعنی ارزش صفر را به خود اختصاص داده است.

استخراج ارزش‌های طیفی و غیرطیفی در محل قطعات نمونه

پس از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تولید متغیرهای غیرطیفی، ارزش‌های متناظر قطعات نمونه از باندهای طیفی و غیرطیفی استخراج شدند.

برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از رگرسیون چندگانه خطی

برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون آماری شاپیرو-ویک (Shapiro-Wilk) استفاده شد. همچنین برای بررسی هم‌راستایی چندگانه بین متغیرهای مستقل از عامل تورم واریانس (VIF) استفاده شد. مدل‌سازی شاخص سطح برگ با استفاده از رگرسیون چندگانه به روش گام‌به‌گام انجام شد. از بین مدل‌های رگرسیونی

مقدار ارتفاع، شیب و جهت دامنه به عنوان متغیرهای غیرطیفی در برآورد شاخص سطح برگ مدنظر قرار گرفتند. مدل رقومی ارتفاع منطقه مورد بررسی با استفاده از نقشه توپوگرافی رقومی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ منطقه با ابعاد پیکسل ۱۰ متری تهیه شد. نقشه شیب و جهت دامنه از مدل رقومی ارتفاع تهیه شدند. با استفاده از رابطه ۲ آزمون دامنه به مقدار تابش دریافتی تبدیل شد (Beers *et al.*, 1966).

رابطه (۲)

$$R = \cos(45-A) + 1$$

در این رابطه R: مقدار تابش دریافتی و A: آزمون به درجه است. نقشه حاصل از رابطه ۱ شامل مقادیری بین صفر و دو است که در آن دامنه شمال شرقی که دارای کمترین مقدار تابش است، دارای ارزش دو و دامنه جنوب غربی با بیشترین مقدار

آماره‌های توصیفی داده‌های زمینی شاخص سطح برگ آماره‌های توصیفی مقادیر برآوردی از شاخص سطح برگ در منطقه مورد بررسی توسط عکس برداری نیم-کروی در ۵۸ قطعه نمونه برداشت شده، محاسبه شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که میانگین شاخص سطح برگ برآورد شده توسط عکس برداری نیم‌کروی در قطعات نمونه زمینی، برابر با ۰/۸۸۷ و انحراف معیار ۰/۴۰۲ است.

تحلیل همبستگی

نتایج همبستگی پیرسون بین داده‌های زمینی شاخص سطح برگ، ارزش‌های طیفی باندهای اصلی و شاخص‌های پوشش گیاهی داده‌های ماهواره‌ای نشان داد که بیشترین همبستگی شاخص سطح برگ از میان باندهای اصلی با باند قرمز (باند ۴) ($R = -0.786$) و باند ۵ که یکی از باندهای لبه قرمز (Red-edge) در ماهواره سنتینل-۲ است (-0.716) و از بین شاخص‌های گیاهی با شاخص TNDVI ($R = 0.873$) و NDVI ($R = 0.870$) در سطح اطمینان ۹۹ درصد است (جدول ۲).

به دست آمده، مناسب‌ترین مدل‌ها بر اساس ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین تعدیل شده (R^2_{adj}) و مقدار RMSE انتخاب شدند و در مرحله بعد مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. برای اعتبارسنجی از روش اعتبارسنجی متقابل یا Cross-Validation استفاده شد و مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۳) و ضریب آکائیک (AIC) (رابطه ۴) برای هر مدل محاسبه شد. مدلی که دارای پایین‌ترین مقدار این ضرایب باشد به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود (Bahmani and Ramezani, 2015).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{LAI}_i - LAI_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$AIC = n \ln \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{LAI}_i - LAI_i)^2}{n} \right] + 2K \quad \text{رابطه (۴)}$$

در روابط ۳ و ۴، RMSE: جذر میانگین مربعات خطا، AIC: ضریب آکائیک، \widehat{LAI}_i : مقدار شاخص سطح برگ برآورد شده از مدل‌ها، LAI_i : مقدار واقعی زمینی اندازه‌گیری شده، n : تعداد قطعه نمونه‌ها، K : تعداد متغیرهای ورودی مدل هستند.

نتایج

جدول ۲- نتایج همبستگی پیرسون بین شاخص سطح برگ، ارزش‌های طیفی باندهای اصلی و شاخص‌های پوشش گیاهی

Table 2. Pearson correlation coefficients between LAI, and spectral values of original spectral bands and vegetation indices

ضرایب همبستگی پیرسون	متغیر	ضرایب همبستگی پیرسون	متغیر
Pearson correlation coefficients	Variable	Pearson correlation coefficients	Variable
0.870**	NDVI	-0.767**	Band2
0.873**	TNDVI	0.751**	Band3
0.838**	GEMI	-0.786**	Band4
-0.280*	REIP	-0.716**	Band5
0.865**	SAVI	-0.299*	Band6
0.720**	TSAVI	-0.074 ^{ns}	Band7
0.857**	MSAVI	0.025 ^{ns}	Band8
0.726**	WDVI	-0.023 ^{ns}	Band8a
0.837**	DVI	-0.576**	Band11
0.861**	PVII	-0.680**	Band12

***, **, * and ns: Statistical significance at 1 percent level, 5 percent level and non significant, respectively

***, **, * and ns: Statistical significance at 1 percent level, 5 percent level and non significant, respectively

تحلیل رگرسیون چندگانه
 تحلیل رگرسیون چندگانه خطی به روش گام‌به‌گام میان شاخص سطح برگ زمینی و متغیرهای طیفی باندهای اصلی و شاخص‌های پوشش گیاهی و غیرطیفی (ارتفاع، شیب و جهت) انجام شد. در گام اول شاخص سطح برگ به‌عنوان متغیر وابسته و تمام متغیرهای طیفی باندهای اصلی به‌عنوان متغیر مستقل استفاده شدند. نتایج نشان داد که مدل تشریح شده در جدول ۳ با مقادیر ضریب تعیین ۰/۷۶۱، ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۷۵۳ و اشتباه معیار برآورد ۰/۱۹۹ مناسب‌ترین مدل است. از بین تمام باندهای طیفی استفاده شده در تحلیل رگرسیونی، باندهای ۴ (طول موج قرمز) و ۸ (مادون قرمز نزدیک) وارد مدل نهایی شده‌اند. نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای برآورد شاخص سطح برگ نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی حاصل از باندهای اصلی در سطح ۹۹ درصد ($P=0/01$) معنی دار است.

جدول ۳- ضرایب مدل رگرسیون چندگانه میان شاخص سطح برگ و باندهای اصلی و آزمون معنی دار بودن آنها

Table3. Multiple regression coefficient of original spectral bands and their statistical significance test

مدل Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده Standardized Coefficients Beta	t	معنی- داری Sig	تورم واریانس VIF	ضریب تعیین R^2	ضریب تعیین تعدیل شده R^2_{adj}	اشتباه معیار برآورد Std.Error of the Estimate
	Unstandardized Coefficients Std.Error	B							
عدد ثابت Constant	0.293	0.711	-	2.426	0.019	-			
باند ۴ Band4	0.000	-0.001	-0.966	13.251	0.000	1.225	0.761	0.753	0.199
باند ۸ Band8	0.000	0.001	0.419	5.748	0.000	1.225			

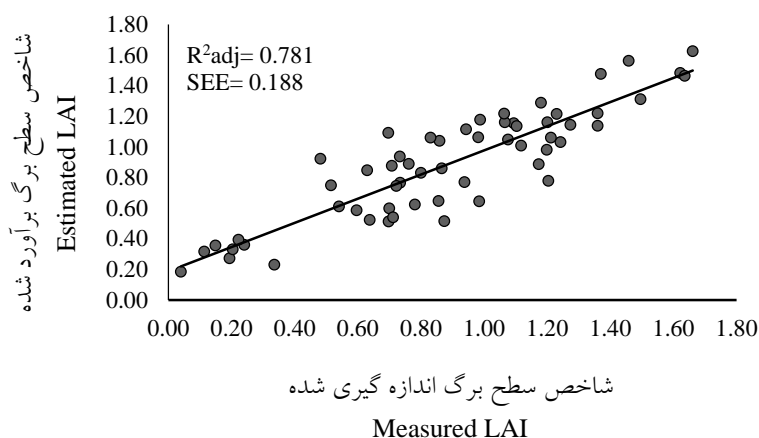
در گام بعدی از باندهای اصلی و شاخص‌های گیاهی برای برآورد شاخص سطح برگ استفاده شد. در این گام بهترین مدل با استفاده از ورود شاخص TNDVI با ضریب تعیین ۰/۷۶۳، ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۷۵۹ و اشتباه معیار برآورد ۰/۱۹۷ به دست آمد که به دلیل خلاصه‌تر کردن نتایج، جدول‌ها ارائه نشد. در گام سوم، باندهای اصلی، شاخص‌های پوشش گیاهی و متغیرهای غیرطیفی ارتفاع، شیب و جهت به‌عنوان متغیر مستقل در برآورد شاخص سطح برگ زمینی استفاده شد. نتایج که در جدول ۴ ارائه شده است، نشان از بهبود نسبی مدل داد (ضریب تعیین ۰/۷۸۸، ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۷۸۱ و اشتباه معیار برآورد ۰/۱۸۸). از بین تمام متغیرهای طیفی و غیرطیفی استفاده شده در تحلیل، شاخص پوشش گیاهی TNDVI و متغیر غیرطیفی ارتفاع معنی دار شناخته و وارد مدل نهایی شدند. مقدار عامل تورم واریانس برای دو متغیر TNDVI و ارتفاع در مدل به دست آمده برابر ۱/۰۵۹ است که نشان از عدم هم خطی بین متغیرها است (جدول ۴). شکل ۴ نمودار ابر نقاط مقادیر شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده زمینی توسط عکس برداری نیم‌کروی در برابر مقادیر شاخص سطح برگ برآورد شده توسط مدل رگرسیونی چندگانه را نشان می‌دهد.

در گام بعدی از باندهای اصلی و شاخص‌های گیاهی برای برآورد شاخص سطح برگ استفاده شد. در این گام بهترین مدل با استفاده از ورود شاخص TNDVI با ضریب تعیین ۰/۷۶۳، ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۷۵۹ و اشتباه معیار برآورد ۰/۱۹۷ به دست آمد که به دلیل خلاصه‌تر کردن نتایج، جدول‌ها ارائه نشد. در گام سوم، باندهای اصلی، شاخص‌های پوشش گیاهی و متغیرهای غیرطیفی ارتفاع، شیب و جهت به‌عنوان متغیر مستقل در برآورد شاخص سطح برگ زمینی استفاده شد. نتایج که در جدول ۴ ارائه شده است، نشان از بهبود نسبی مدل داد (ضریب تعیین ۰/۷۸۸، ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۷۸۱ و اشتباه معیار

جدول ۴- ضرایب مدل رگرسیون چندگانه میان شاخص سطح برگ و متغیرهای طیفی و غیرطیفی و آزمون معنی دار بودن آنها

Table3. Multiple regression coefficient between LAI, spectral and non-spectral variables, and their statistical significance test

استنباه معیار برآورد Std.Error of the Estimate	ضریب تعیین تعدیل شده R^2_{adj}	ضریب تعیین R^2	تورم واریانس VIF	معنی- داری Sig	t	ضرایب		مدل Model	
						استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		
						Standardized Coefficients Beta	Unstandardized Coefficients Std.Error B		
0.188	0.781	0.788	-	0.000	-8.624	-	0.483	-4.166	عدد ثابت Constant
			1.059	0.000	14.290	0.912	0.470	6.715	TNDVI
			1.059	0.013	-2.581	-0.165	0.000	0.0001	DEM



شکل ۴- مقادیر شاخص سطح برگ اندازه گیری شده در برابر مقادیر شاخص سطح برگ برآورد شده

Figure 4. Measured LAI against estimated LAI

بحث

برآورد و ارزیابی شاخص سطح برگ به عنوان یکی از مهم ترین مشخصه های ساختاری اکوسیستم های جنگلی، اطلاعات زیادی در ارتباط با پویایی جنگل، میزان فتوسنتز، تبخیر و تعرق، تولید خالص اولیه، ضریب تبادل انرژی و کربن بین پوشش گیاهی و جو در اختیار مدیران، برنامه ریزان و پژوهشگران قرار می دهد. اگرچه اندازه گیری مستقیم شاخص سطح برگ دقیق ترین روش است اما در مقایسه با روش های برآوردی (سنجش از دور و عکس برداری نیم کروی) دارای محدودیت های اساسی است. این روش ماهیتاً یک روش تخریبی است و در سطح تک درخت و در یک زمان ثابت قابل انجام است. اگر نیاز به تکرار

اعتبارسنجی مناسب ترین مدل های رگرسیونی چندگانه پس از انتخاب مناسب ترین مدل های رگرسیونی چندگانه به دست آمده بین شاخص سطح برگ و متغیرهای طیفی و غیرطیفی، مدل ها با استفاده از اعتبارسنجی متقابل مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مدل حاصل از شاخص سطح برگ با باندهای اصلی، مقادیر RMSE و ضریب آکائیک به ترتیب ۰/۱۹۴ و ۱۷/۲۸۲- محاسبه شدند، همچنین مقادیر حاصل از اعتبارسنجی از مدل رگرسیونی چندگانه شاخص سطح برگ با متغیرهای طیفی شاخص های پوشش گیاهی و متغیرهای غیرطیفی، به ترتیب ۰/۱۸۳ و ۲۴/۲۰۵- به دست آمد (جدول ۵).

اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های متفاوت به منظور بررسی تغییرات زمانی شاخص سطح برگ باشد، به‌ویژه در سطوح بزرگ‌تر همانند توده جنگلی، امکان استفاده از اندازه‌گیری مستقیم غیرممکن خواهد بود؛ بنابراین با توجه به محدودیت‌های اندازه‌گیری شاخص سطح

برگ در روش‌های مستقیم از نظر زمان، مقیاس و هزینه، فنون سنجش‌ازدور به محققان این امکان را می‌دهد که این مشخصه مهم اکولوژیکی را در هر مقیاس و زمانی با هزینه اندک برآورد و پایش کنند.

جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی حاصل از مناسب‌ترین مدل‌های به‌دست‌آمده از رگرسیون چندگانه

Table 4. The results of validation procedure of the best multiple regression models

مدل رگرسیونی چندگانه					
AIC	r RMSE	RMSE	R ² _{adj}	R ²	
-17.28	22%	0.194	0.753	0.761	LAI= -0.001B4+0.001B8+0.711
-19.58	22%	0.196	0.759	0.763	LAI=6.428TNDVI- 4.836
-24.21	20%	0.183	0.781	0.788	LAI=6.715TNDVI+ 0.0001DEM- 4.166

سطح برگ دارد. دلیل این امر این است که در محدوده طیف مرئی، گیاهان سبز به دلیل جذب کلروفیلی بالا در محدوده طول‌موج قرمز، مقدار انعکاس بسیار پایینی در این طول‌موج دارند. این نتیجه با نتیجه Miri و همکاران (2017) مطابقت دارد. باند ۵ که یکی از باندهای لبه قرمز (Red-edge) در ماهواره سنتینل-۲ است نیز همبستگی بالایی با شاخص سطح برگ دارد (۰/۷۱۶-). لبه قرمز حساسیت بالایی به تغییرات مقدار کلروفیل برگ گیاهان دارد و یکی از مهم‌ترین محدوده‌های طیفی است که در تشخیص و تفکیک-پذیری گیاهان کاربرد وسیعی دارد (Sibanda et al., 2015). برخلاف انتظار همبستگی میان باند مادون‌قرمز نزدیک و شاخص سطح برگ پایین بود. در بررسی Miri و همکاران (2017) در جنگل‌های مریوان نیز کمترین همبستگی برای باند مادون‌قرمز نزدیک گزارش شده است. به نظر می‌رسد بر اساس مبانی سنجش‌ازدور نقش پدیده جذب کلروفیلی بر مقدار بازتاب در چنین مناطقی بیشتر از نقش ساختار سلولی در مادون‌قرمز نزدیک است.

نتایج تحلیل همبستگی بین شاخص سطح برگ زمینی حاصل از تصاویر نیم‌کروی و باندهای اصلی سنتینل-۲ نشان می‌دهد که شاخص سطح برگ با باندهای مرئی و طول‌موج کوتاه (SWIR) دارای همبستگی منفی است. منفی‌بودن همبستگی در اینجا به این مفهوم است که با افزایش مقادیر شاخص سطح برگ مقدار بازتاب در باندهای مختلف کاهش می‌یابد که طبق نظر Nemani و همکاران (1993) این همبستگی منفی به دلایلی همانند محتوای رطوبتی، جذب اتمسفری، اثر سایه و گیاهان زیراشکوب می‌توان توجیه کرد. مطالعات Miri و همکاران (2017)، Stenberg و همکاران (2008)، Soudani و همکاران (2006)، Lee و همکاران (2004) و Eklundh و همکاران (2001) تأییدی بر نتیجه این پژوهش است. لازم به ذکر است که Miri و همکاران (2017) نقش گردوغبار انباشته‌شده بر روی برگ درختان را مؤثر دانسته‌اند.

همچنین بررسی نتایج همبستگی نشان می‌دهد که از بین کلیه باندها، باند ۴ (طول‌موج قرمز) با مقدار همبستگی ۰/۷۸۶- بالاترین همبستگی را با شاخص

شاخص پوشش گیاهی TNDVI و مدل رقومی ارتفاع از بین تمام متغیرهای مورد بررسی وارد مدل شدند. همان‌گونه که ذکر شد طول موج قرمز به شدت تحت تأثیر مقدار تغییرات شاخص سطح برگ قرار می‌گیرد. Eklundh و همکاران (2001) نیز به پاسخ قوی طول موج‌های قرمز و مادون قرمز میانی و پاسخ به-نسبت ضعیف طول موج مادون قرمز نزدیک به تغییرات شاخص سطح برگ اشاره داشته‌اند.

شاخص TNDVI که شاخص تبدیل شده NDVI است، یکی از شاخص‌های بسیار مفید در مطالعات پوشش گیاهی است. محدوده TNDVI بیشتر از صفر است و در عمل تفاوت فنی بین NDVI و TNDVI وجود ندارد. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد نشان‌دهنده مقدار شاخص سطح برگ بیشتر است. نتایج این پژوهش با نتایج Onojeghuo and Blackburn (2016) که به رابطه مثبت و قوی شاخص سطح برگ با شاخص‌های NDVI و TNDVI اشاره کرده‌اند، مطابقت دارد. در این پژوهش متغیر ارتفاع هرچند با تأثیر کم، اما موجب افزایش دقت نتایج مدل شده است. نمونه‌هایی که در منطقه‌ای با ارتفاع بیشتر قرار داشتند در محدوده جنگل‌هایی بودند که مدت بیشتری از بهره‌برداری انسان به صورت گلازنی از آن‌ها گذشته بود و شاید این موضوع را بتوان یکی از دلایل وارد شدن این متغیر دانست. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در سنجش‌ازدور داده‌های کمکی غیرطیفی همانند ارتفاع منجر به افزایش دقت نتایج شده‌اند (Redowan, 2013).

هرچند با توجه به اینکه مدل سوم که حاصل تحلیل متغیرهای طیفی و غیرطیفی است با توجه به مقدار بالاتر ضریب تعیین و مقدار پایین‌تر مقدار RMSE و ضریب آکائیک، بهترین مدل است؛ اما مدل اول که حاصل تحلیل باندهای اصلی است و همچنین

نتایج بررسی همبستگی بین شاخص سطح برگ با شاخص‌های پوشش گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ نشان می‌دهد که شاخص سطح برگ با شاخص‌های NDVI، TNDVI، GEMI، SAVI، MSAVI، WdVI، DVI و PVI دارای همبستگی بالا و مثبت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد است. نتایج حاضر با پژوهش‌های Miri و همکاران (2017)، (Boken and Persson, 2014)، (Fan, Chandra, 2012) و همکاران (2008) و Stenberg و همکاران (2008) هم‌خوانی دارد. شاخص‌های SAVI و MSAVI از شاخص‌های خط خاک هستند و معمولاً در مناطق جنگلی کم تراکم با کاهش اثرات خاک پس‌زمینه سبب بهبود نتایج می‌شوند. (Mohammadi Garousi, 2016) در رابطه با پایش سلامت جنگل‌های بلوط زاگرس بیان کرده‌اند که استفاده از شاخص SAVI سبب بهبود نتایج شده است. از بین شاخص‌های مورداستفاده در این پژوهش شاخص پوشش گیاهی TNDVI بالاترین مقدار همبستگی ($r=0.873$) را با شاخص سطح برگ زمینی دارد؛ این نتیجه را می‌توان بارزسازی بالای این شاخص برای پوشش گیاهی دانست.

در مدل‌سازی رگرسیون چندگانه شاخص سطح برگ زمینی و باندهای اصلی، باند ۴ (قرمز) و ۸ (مادون قرمز نزدیک) بهترین مدل رگرسیونی چندگانه را ارائه دادند. باند مادون قرمز با اینکه به‌تنهایی همبستگی بسیار پایینی با شاخص سطح برگ داشت وارد مدل شد؛ زیرا ورود چنین متغیرهایی که متغیر سرکوبگر نامیده می‌شوند همراه با یک متغیر مستقل با همبستگی بالا (طول موج قرمز) موجب می‌شود واریانس غیرقابل توضیح در متغیر مستقل باقی‌مانده از بین برود (Thompson and Levine, 1997). در مدل‌سازی با استفاده از متغیرهای طیفی و غیرطیفی،

درصد)، شاخص سطح برگ را در این منطقه برآورد نماید. قطعاً استفاده از نمونه‌های بیشتر در سطح بزرگ‌تر و انجام پژوهش در دیگر مناطق زاگرس و همچنین بررسی استفاده از تصحیحات دقیق اتمسفری و دیگر روش‌ها همانند رگرسیون غیرخطی و یا ناپارامتریک می‌تواند امکان برآورد این شاخص مهم اکولوژیکی را با اطمینان بیشتر در سطح منطقه فراهم سازد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند از مرکز پژوهش و توسعه جنگلداری زاگرس شمالی به‌منظور فراهم‌آوردن امکانات لازم برای انجام برداشت‌های میدانی این پژوهش، سپاس‌گزاری نمایند.

References

- Abbasi, L., 2014. Leaf area index of Lebanon-Gall oak stands (*Quercus libani*, Q. infectoria) in different years after pollarding in Baneh forests. MSc thesis. University of Kurdistan. Sanandaj, Iran, 77p. (In Persian)
- Adl, H.R., 2007. Estimation of leaf biomass and leaf area index of two major species in Yasuj forests, *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 15(4): 417-426. (In Persian)
- Bahmani, O. & B. Ramezani, 2015. Evaluation of the Performance of Pedotransfer Functions for Estimating Soil Moisture Retention Curve with SWRC Model. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(4):773-785. (In Persian)
- Beers, T.V., P.E. Derss & L.C. Wesel, 1966. Aspect transformation in site productivity research. *Journal of Forestry*, 80: 493-498.
- Behera, S.K., P. Srivastava, U.V. Pathre & R. Tuli, 2010. An indirect method of estimating leaf area index in *Jatropha curcas* L. using LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 307-311.
- Boken, V.K. & S. Chandra, 2012. Estimating leaf area index for an arid region using

مدل دوم که حاصل تحلیل باندهای اصلی و شاخص‌های گیاهی است نیز با توجه به مقدار ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل‌شده مناسب و RMSE تقریباً پایین می‌تواند به‌عنوان مدل برآوردی شاخص سطح برگ استفاده شود. مدل ارائه‌شده برای برآورد شاخص سطح برگ در این پژوهش از دقت بالاتری نسبت به مدل ارائه‌شده توسط Miri و همکاران (2017) برخوردار است و از آنجایی که جنگل‌های مورد بررسی در این پژوهش دارای تراکم پوشش کمتری هستند، افزایش دقت برآورد شاخص سطح برگ را می‌توان به‌دلیل استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ با توان تفکیک مکانی و ویژگی‌های طیفی بالاتر دانست.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، تصویر ماهواره سنتینل-۲ و استفاده از مدل‌های رگرسیونی چندگانه توانست با دقت قابل‌قبول (خطای حدود ۲۰

spectral data. *African Crop Science Journal*, 20(4): 215-223.

- Breda, J., 2003. Ground based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392): 2403-2417.
- Deljouei, A., S.M.M. Sadeghi & E. Abdi, 2016. Comparing leaf area index at different distances from constructed forest roads edge in Hyrcanian forest (Case study: a hornbeam-beech forest in Kheyroud, Mazandaran). *Forest Research and Development*, 2 (2): 169-180. (In Persian)
- Eklundh, L., L. Harrie & A. Kuusk, 2001. Investigating relationships between Landsat ETM plus sensor data and leaf area index in a boreal conifer forest, *Remote Sensing of Environment*, 78(3): 239-251.
- Fan, L., Y. Gao, H. Bruck & C. Bernhofer, 2009. Investigating the relationship between NDVI and LAI in semiarid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 95: 151-156.
- Gonsamo, A. & M. Chen, 2014. Continuous observation of leaf area index at Fluxnet-Canada sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180-190: 168-174.

- Heiskanen, J., 2006. Remote sensing of mountain Birch Forest biomass and leaf area index using Aster data. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 1135-1158.
- Korhonen, L., S. Hadi, P. Packalen & M. Rautiainen, 2017. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 195: 259-274.
- Lee, K.S., W.B. Cohen, R.E. Kennedy, T.K. Maieringer & S.T. Gower, 2004. Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment*, 91: 508-520.
- Liu, Z., J.M. Chen, G. Jin & Y. Qi, 2015. Estimating seasonal variations of leaf area index using litterfall collection and optical methods in four mixed evergreen-deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209-210: 36-48.
- Meyer, L. H., M. Heurich, B. Beudert, J. Premier & D. Pflugmacher, 2019. Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 data for estimation of leaf area index in temperate forests, *Remote Sensing*, 11(10): 1-16.
- Miri, N., A.A. Darvishsefat, N. Zargham & Z. Shakeri, 2017. Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 data. *Iranian Journal of Forest*, 9(1): 29-42. (In Persian)
- Mohammadi Garousi, A., 2016. Detection of Oak Stands Dieback Using Remote Sensing (Case study: parts of the forests of Lorestan Province). MSc thesis. University of Kurdistan. Sanandaj, Iran. 68p. (In Persian)
- Nemani, R.R., L. Pierce, S. Running & L. Band, 1993. Forest ecosystem processes at the watershed scale: Sensitivity to remotely-sensed leaf area index estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 2519-2534.
- Olivas, P. C., S. F. Oberbauer, D. B. Clark, D. A. Clark, M. G. Ryan, J. J. O'Brien & H. Ordóñez (2013). Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology*, 177: 110-116.
- Onojeghuo, A.O. & G.A. Blackburn, 2016. Understanding the multiseasonal spectral and biophysical characteristics of reedbed habitats in the UK. *Geo-spatial Information Science*, 19(4): 233-244.
- Persson, S., 2014. Estimating leaf area index from satellite data in deciduous forests of Southern Sweden. MS Thesis. Lund University. Lund, Sweden, 35p.
- Poblete-Echeverria, C., S. Fuentes, S. Ortega-Farias, J. Gonzalez-Talice & J.A. Yuri, 2015. Digital cover photography for estimating leaf area index (LAI) in Apple trees using variable light extinction coefficient. *Sensors*, 15: 2860-2872.
- Redowan, M., 2013. Tree Diversity Detection with Mid-Resolution Images and Environmental Data in a Neural Network. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(3):567-76.
- Ryu, Y., J. Verfaillie, C. Macfarlane, H. Kobayashi, O. Sonnentag, R. Vargas, S. Ma & D.D. Baldocchi, 2012. Continuous observation of tree leaf area index at ecosystem scale using upward-pointing digital cameras. *Remote Sensing of Environment*, 126: 116-125.
- Sibanda, M., O. Muntanga & M. Rouget, 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.
- Soudani, K., C. François, G.L. Maire, V.L. Dantec & E. Dufrêne, 2006. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sensing of Environment*, 102: 161-175.
- Stenberg, P., M. Rautiainen, T. Manninen, P. Voipio & H. Smolander, 2004. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish Pine and Spruce Stands. *Silva Fennica*, 38(1): 1-14.
- Thompson, F. T. & U. Levine, 1997. Examples of easily explainable suppressor variables in multiple regression research. *Multiple Linear Regression Viewpoints*, 24(1): 11-13.
- Zhao, J., J. Lh, Q. Liu, W. Fan, B. Zhong, S. Wu, L. Yang, Y. Zeng, B. Xu & G. Yin, 2015. Leaf area index retrieval combining HJ1/CCD and Landsat8/OLI Data in the Heihe River Basin, China. *Remote Sensing*, 7: 6862-6885.

Leaf area index estimation in the northern Zagros forests using remote sensing (Case study: a part of Baneh forests)

G. Moradi¹, M. Pir Bavaghar^{*2}, Z. Shakeri³ and P. Fatehi⁴

1- M.Sc. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, I. R. Iran. (golale.moradi@yahoo.com)

2- Associate Professor, Department of Forestry, Academic Member of Center for Research & Development of Northern Zagros Forests, University of Kurdistan, Sanandaj, I. R. Iran. (m.bavaghar@uok.ac.ir)

3- Researcher, Social-Ecological interactions in Agricultural Systems, University of Goettingen and University of Kassel, Germany. (shakeri.zahed@gmail.com)

4- Assistant Professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran. (parviz.fatehi@ut.ac.ir)

Received: 26.04.2020

Accepted: 13.06.2020

Abstract

In this study, the leaf area index was estimated using Sentinel-2 satellite imagery over a small part of the Baneh forests. A digital camera with a fish eye lens was used to collect the hemispherical photographs in 58 field reference plots with a size of 20m × 20m. The required digital image processing procedures were applied on the remote sensing data, and various vegetation indices were also calculated. Elevation, slope, and aspect maps were also used as an ancillary data. Spectral and non-spectral values were extracted from satellite imageries and ancillary data in each sample plot. Our results showed that the Red band and TNDVI (Transformed Normalized Difference Vegetation Index) have the highest correlation with LAI. The results of the regression analysis showed that considering only original spectral band as independent variable, a model based on the red and the near-infrared bands achieved the highest accuracy ($R^2=0.753$, RMSE= 22%). Considering a combination of original spectral bands, vegetation indices and non-spectral variables, a model based on TNDVI and DEM produced the highest accuracy ($R^2=0.781$, RMSE= 20%).

Keywords: Fish eye, Hemispherical photography, Multiple Regression analysis, Sentinel-2 imagery.

* Corresponding author

Tel: +988733660067