

برآورد شاخص سطح برگ در جنگل‌های زاگرس با داده‌های ماهواره لندست ۸

ناصح میری^۱، علی‌اصغر درویش‌صفت^{۲*}، نصرت‌اله ضرغام^۳ و زاهد شاکری^۴

^۱ کارشناس ارشد جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

^۲ استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

^۳ دانشیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

^۴ استادیار گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان، سنندج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۸/۲)

چکیده

هدف تحقیق حاضر، بررسی قابلیت داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ به منظور برآورد شاخص سطح برگ در بخشی از جنگل‌های زاگرس در شهرستان میروان است. برای بررسی روابط بین شاخص سطح برگ و ارزش‌های طیفی داده‌های OLI، ۶۰ قطعه نمونه زمینی به روش نمونه‌برداری انتخابی با ابعاد ۴۵×۴۵ متر برداشت شده و برای تعیین مقادیر شاخص سطح برگ در هر قطعه نمونه، عکس‌برداری نیم‌کروی اجرا شد. پردازش‌های مناسب تصویر شامل شاخص‌های پوشش گیاهی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی، تبدیل تسلدکپ و ادغام انجام گرفت و تصاویر ایجادشده همراه با مجموعه باندهای اصلی تجزیه و تحلیل شد. با تعیین موقعیت قطعات نمونه بر روی تصویر ماهواره‌ای ارزش‌های طیفی مربوط به باندهای اصلی و فرعی استخراج شد. براساس بررسی همبستگی و برخلاف انتظار، همبستگی منفی بین شاخص سطح برگ که بیانگر مقدار سبزیگی نیز است با بازتاب‌ها در باند مادون قرمز مشاهده شد. رابطه میان این ارزش‌های طیفی و شاخص سطح برگ با استفاده از ۷۵ درصد نمونه‌ها و روش‌های تحلیل رگرسیون ساده و چندگانه به روش گام‌به‌گام تعیین شد. نتایج مدل‌سازی‌ها و اعتبارسنجی آنها با ۱۵ قطعه نمونه شاهد نشان داد که مدل‌های خطی در این زمینه از کارایی لازم برخوردارند. مدل خطی ساده حاصل از مشخصه شاخص سطح برگ و شاخص گیاهی SR و مدل رگرسیون چندگانه با مجموعه سه باند NDVI، SR و SAVI به‌عنوان بهترین روابط برای برآورد شاخص سطح برگ از تصاویر ماهواره‌ای انتخاب شدند. نتایج این امیدواری را ایجاد می‌کند که با مطالعات تکمیلی در زمینه تعیین دقیق مقدار کم برآورد این شاخص به روش عکس‌برداری نیم‌کروی و بررسی قابلیت دیگر داده‌های سنجنش از دور و روش‌های تجزیه و تحلیل، بتوان شاخص سطح برگ را در چنین مناطقی براساس تصاویر ماهواره‌ای و با صرف هزینه و زمان بسیار کم برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های زاگرس، سنجنده OLI، شاخص سطح برگ، عکس‌برداری نیم‌کروی.

مقدمه

(Marvie Mohadjer, 2011). از این رو اطلاع از اندازه

شاخص اکولوژیکی مهمی مانند شاخص سطح برگ^۱ (LAI) در جنگل‌های زاگرس ما را در انتخاب راهکار صحیح مدیریت برای حفظ بهتر و همچنین در پایش این جنگل‌ها کمک می‌کند.

جنگل‌های زاگرس با مساحتی حدود پنج میلیون هکتار، از مهم‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی کشور محسوب می‌شوند و از نظر حفاظت منابع آبی، خاک، تعدیل آب‌وهوا و تنوع زیستی، اهمیت زیادی دارند

Kovacs et al. (2004) در تحقیقی در جنگل‌های تخریب‌شده مانگرو در مکزیک قابلیت داده‌های ماهواره IKONOS را به منظور برآورد شاخص سطح برگ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های رگرسیونی به دست آمده از شاخص‌های پوشش گیاهی $NDVI^2$ و SR^3 می‌توانند شاخص سطح برگ را با موفقیت برآورد کنند. (Stenberg et al., 2004). تحقیقی شاخص سطح برگ را با استفاده از شاخص‌های گیاهی SR ، $NDVI$ و RSR^4 حاصل از تصاویر سنجنده ETM+ در دو منطقه غالب از کاج اسکاتلندی و نوئل نروژی در فنلاند به دست آوردند. نتایج نشان داد که هر سه شاخص گیاهی مورد پژوهش ارتباط مثبتی با شاخص سطح برگ دارند و RSR نتیجه بهتری ($R^2=0/63$) در مقایسه با SR ($R^2=0/52$) و $NDVI$ ($R^2=0/55$) ارائه داده است. (Jiang et al., 2005) در تحقیقی قابلیت داده‌های سنجنده TM ماهواره لندست را در این زمینه در چین بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده قابلیت خوب شاخص پوشش گیاهی MSR^5 در برآورد شاخص سطح برگ جنگل است. (Soudani et al., 2006). تحقیقی، توانایی داده‌های ماهواره‌های IKONOS، Landsat 5 و SPOT 4 را برای برآورد شاخص سطح برگ در جنگل‌های اطراف پاریس بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که سه داده توانایی یکسانی ($r=0/84$) برای برآورد شاخص سطح برگ دارند. (Zhang et al., 2011) نیز پژوهشی را با هدفی مشابه در جنگل‌های بامبو در چین با استفاده از تصاویر سنجنده LIIS-3 ماهواره IRS-P6 انجام دادند. نتایج نشان داد که شاخص پوشش گیاهی SR بهترین متغیر برآوردکننده شاخص سطح برگ با ضریب

شاخص سطح برگ به عنوان سطح کل یک طرف برگ گیاهان در واحد سطح زمین تعریف شده است (Chen & Black, 1992). تعریف شاخص سطح برگ توده جنگلی عبارت است از نسبت مجموع سطح تمامی برگ‌های درختان موجود در توده به مساحت اشغال شده توسط تاج پوشش درختان. شاخص سطح برگ به صورت یک کمیت و بدون واحد ارائه می‌شود (Jonckheere et al., 2004). شاخص سطح برگ مشخصه مهم فیزیولوژیکی مرتبط با بسیاری از فرایندهای زیست محیطی مانند فتوسنتز، تبخیر و تعرق است. از این مشخصه برای بیان چگونگی تبادل گاز و افزایش کربن یا تولید ناخالص اولیه^۱ (GPP) از یک اکوسیستم و در بسیاری از برنامه‌های کاربردی مدل‌سازی محیط زیست استفاده می‌شود (Persson, 2014). برآورد شاخص سطح برگ برای بسیاری از مطالعات مربوط به کنش میان پوشش گیاهی و جو و برای بسیاری از مطالعات اکولوژیکی ضروری است و در ارزیابی تولیدات و کیفیت توده جنگلی کاربرد دارد (Arias et al., 2007).

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری زمینی شاخص سطح برگ در جنگل وجود دارد که اغلب بسیار دشوار، وقتگیر، پرهزینه و مهم‌تر از همه در مواردی مخرب‌اند، ضمن اینکه وسعت زیاد جنگل‌ها و گاه شرایط سخت توپوگرافی آنها، استفاده از روش‌های مستقیم را تقریباً غیرممکن می‌سازد. در مقابل استفاده از روش‌های سنجش از دوری ممکن است این محدودیت‌ها را جبران کند و به پایش و برآورد شاخص سطح برگ در مقیاس‌های بزرگ با حداقل هزینه‌ها و زمان اندک بپردازد و به عنوان روشی با پتانسیل زیاد برای توصیف این مشخصه در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف استفاده شود. مطالعات زیادی در خارج از ایران برای برآورد شاخص سطح برگ جنگل براساس داده‌های ماهواره‌ای صورت گرفته است، ولی متأسفانه در جنگل‌های ایران، تا به امروز پژوهشی در این زمینه انجام نشده است.

¹ Gross Primary Production

² Normalized Difference Vegetation Index

³ Simple Ratio

⁴ Reduced Simple Ratio

⁵ Modified Simple Ratio

عنصر اصلی درختی در منطقه بلوط است که به صورت ترکیبی از گونه‌های *Quercus brantii* (برودار)، *Quercus infectoria* (مازودار) به همراه *Crataegus* spp. (زالالک) است. همچنین درختچه‌های *Amygdalus* spp. (بادام)، *Cotoneaster* spp. (شیرخشت) و *Cerasus microcarpa* (آلبالوی وحشی) نیز به صورت پراکنده در منطقه وجود دارند. تراکم تاج پوشش متوسط (۴۵ درصد) و پوشش غلیظ منطقه به دلیل باز بودن تاج پوشش زیاد است (شکل ۲).

داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ مربوط به تاریخ ۸ شهریور ۱۳۹۳ در ۹ باند طیفی به کار گرفته شد. تصاویر از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا با فرمت Geo-TIFF با مبنای WGS84 و در سطح تصحیحات L1T دریافت شد که در آن تصحیحات هندسی ضمن رفع اثر جابه‌جایی ناشی از پستی و بلندی‌ها (تصحیحات ارتو) نیز انجام گرفته است. در این پژوهش، باند ۹ (باند سیروس) تنها برای اطمینان از نبود ابرهای نامرئی در منطقه تحقیق استفاده شد. همچنین از دو برگ نقشه توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ برای تهیه نقشه مدل رقومی ارتفاع و کنترل هندسه تصویر استفاده شد.

روش پژوهش

برداشت نمونه‌های زمینی

برای دستیابی به هدف پژوهش، لازم بود چند قطعه نمونه بر روی زمین برداشت و مشخصه شاخص سطح برگ در آنها تعیین شود. همچنین سعی بر این بود که قطعات نمونه شامل مقادیر مختلف شاخص سطح برگ باشد، از این رو نمونه برداری به صورت انتخابی انجام گرفت. تعداد ۶۰ قطعه نمونه به شکل مربع و به ابعاد ۴۵×۴۵ متر در منطقه پیاده و موقعیت مکانی مرکز قطعات نمونه با دستگاه GPS ثبت شد.

تیبین ۰/۶۸ است. بررسی (Persson (2014 براساس داده‌های ماهواره SPOT در ۱۵ توده جنگلی خزان‌کننده در سوئد نیز نشان داد که رابطه خطی و همبستگی (r) قوی، حدود ۰/۸، بین شاخص سطح برگ و شاخص‌های پوشش گیاهی^۱ NDVI، GEMI، EVI2^۲ و VPI^۳ و باند مادون قرمز نزدیک وجود دارد. بررسی مطالعات خارج از ایران نشان می‌دهد که داده‌های سنجنده‌های مختلف در شرایط رویشگاهی متفاوت نتایج کم‌وبیش متفاوت ولی خوبی به‌منظور برآورد شاخص سطح برگ نشان دادند. از این رو این تحقیق با هدف بررسی قابلیت داده‌های ماهواره جدید و رایگان لندست ۸ که از دقت هندسی و رادیومتری بسیار خوبی برخوردار است، در برآورد این مشخصه مهم اکولوژیک در بخشی از جنگل‌های زاگرس انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

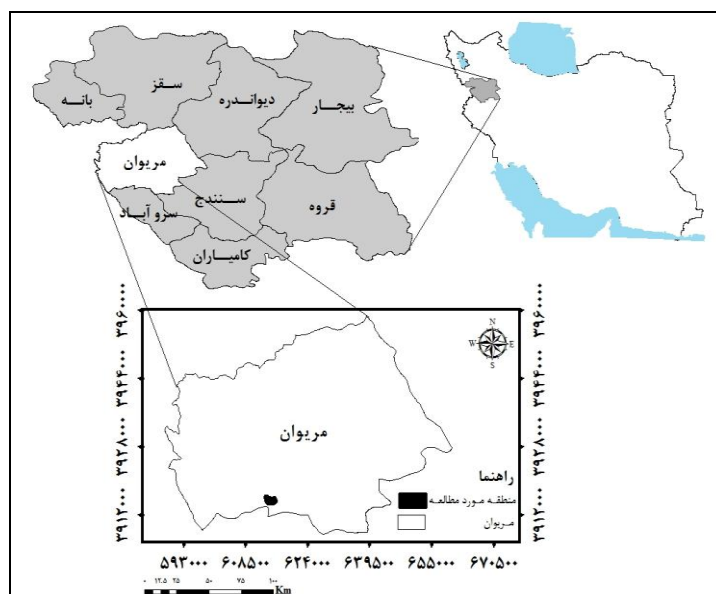
منطقه تحقیق

منطقه جنگلی پژوهش با مساحت ۴۶۴ هکتار در ۲۰ کیلومتری جنوب شهرستان مریوان، در گستره جغرافیایی ۴۹° ۱۴' تا ۵۱° ۱۶' ۴۶ طول شرقی و ۳۵° ۲۱' ۵۳" تا ۳۵° ۲۳' ۰۶" عرض شمالی و در دامنه ارتفاعی ۱۲۵۹ تا ۱۴۲۸ متر قرار دارد (شکل ۱). نزولات آسمانی در منطقه به صورت برف و باران است که بیشتر آن در اواخر زمستان و اوایل بهار و کمترین آن در فصل تابستان اتفاق می‌افتد. متوسط بارندگی منطقه براساس آمار ۱۲ ساله ایستگاه سینوپتیک مریوان (طول و عرض جغرافیایی ایستگاه به ترتیب ۱۲° ۴۶' و ۳۵° ۳۱' و ارتفاع آن ۱۲۸۶/۸ متر است)، ۹۹۱/۲ میلی‌متر در سال و متوسط دمای سالانه ۱۳/۷ درجه سانتی‌گراد است (همت‌بلند، ۱۳۸۹).

^۱ Global Environment Monitoring Index

^۲ Vegetation Phenology Index

^۳ Enhanced Vegetation Index 2



شکل ۱- موقعیت منطقه تحقیق در ایران، استان کردستان و شهرستان مریوان



شکل ۲- سیمای طبیعی بخشی از منطقه پژوهش

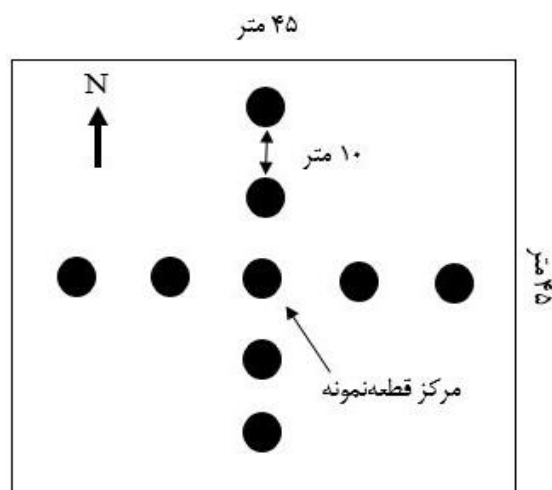
برای عکس‌برداری تعیین شد (شکل ۳). عکس‌برداری‌ها بلافاصله پس از طلوع یا قبل غروب خورشید یا در هوای ابری (نبود خورشید در آسمان)، در شهریور ۱۳۹۳ انجام شد. با توجه به اینکه فرم درختان منطقه بیشتر به صورت شاخه‌زاد است و برگ‌ها در ارتفاع کمی از سطح زمین قرار داشتند، دوربین روی سه‌پایه‌ای در ارتفاع کم تنظیم شد. این ارتفاع اندک دوربین موجب ثبت سطح زمین در عکس‌ها شد، از این‌رو قبل از پردازش هر عکس و

سپس برای تعیین مقدار شاخص سطح برگ در هر قطعه نمونه، روش غیرمستقیم عکس‌برداری نیم‌کروی^۱ و با استفاده از دوربین مجهز به عدسی چشم ماهی (Nikon Coolpix with 180° fish-eye lens) اجرا شد. به این ترتیب که به صورت خوشه‌ای و در دو جهت شمالی-جنوبی و شرقی-غربی و در مجموع ۹ نقطه در هر قطعه نمونه با فواصل ۱۰ متر از یکدیگر

^۱ Hemispherical Photography

با توجه به اینکه تصاویر نیم‌کروی مقدار شاخص سطح برگ را کمتر از اندازه واقعی برآورد می‌کند، باید مقدار برآوردی از این تصاویر را با استفاده از ضریب تصحیحی، که برای جنگل‌های مختلف متفاوت است، تصحیح و به مقدار واقعی نزدیک کرد. برای جنگل‌های زاگرس مقدار ضریب تصحیح ۰/۴ است (Abbasi, 2014; Breda, 2003; Neumann *et al.* 1998).

برآورد شاخص سطح برگ در آنها، سطح زمین در داخل عکس‌ها در محیط نرم‌افزار فتوشاپ حذف شد. بعد از این فرایند، تصاویر نیم‌کروی ویرایش شده، با استفاده از نرم‌افزار Gap Light Analyzer (GLA) پردازش شدند و مقدار شاخص سطح برگ براساس حلقه پنچ^۱ (Stenberg *et al.*, 1994) برای هر عکس و در نهایت برای هر قطعه نمونه محاسبه شد.



شکل ۳- موقعیت نقاط عکس برداری در قطعه نمونه

پردازش تصاویر

برای استخراج هرچه کامل‌تر اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای از پردازش‌های مختلفی مثل تولید شاخص‌های پوشش گیاهی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی^۲، تبدیل تسلدکپ و ادغام^۳ به روش‌های معکوس PCA و تبدیل فضای رنگ^۴ HIS استفاده شد. همچنین شاخص‌های گیاهی مختلف به‌ویژه شاخص‌های خط خاک به‌منظور تشدید تفاوت انعکاس طیفی بین پدیده‌ها و نیز کاهش اثر بازتاب خاک بر بازتاب پوشش گیاهی استفاده شد (جدول ۱). برای محاسبه

بررسی کیفیت و تصحیح هندسی تصاویر

پیش از تجزیه و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای، باید اطمینان حاصل شود که داده‌ها عاری از هر گونه خطای رادیومتری و هندسی هستند. به‌منظور اطمینان از نبود خطای رادیومتری احتمالی مانند پیکسل‌های دوبله از نمایش تصویر در باندهای مختلف و ساخت ترکیبات رنگی مختلف پس از بزرگسازي تصویر و بزرگنمایی آن بر روی صفحه نمایش رایانه استفاده شد. برای بررسی وضعیت هندسی تصاویر و اطمینان از تطابق هندسی مناسب تصاویر، لایه‌های وکتوری جاده‌ها و آبراهه‌ها از نقشه‌های رقومی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ استخراج و بر روی تصاویر ماهواره‌ای قرار داده شد.

^۱ Ring 5

^۲ Principal Component Analysis (PCA)

^۳ Fusion

^۴ Hue Intensity Saturation

مشخصه‌های خط خاک (شیب و ضریب ثابت)، ۱۵ نقطه که بی‌تردید بدون پوشش گیاهی بودند (با توجه به شناخت کامل از منطقه) تعیین شد. همچنین برای اطمینان بیشتر، کنترل شد که ارزش این نقاط در تصویر NDVI کمتر از ۰/۲ باشد. سپس بازتاب این نقاط در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک استخراج و رابطه رگرسیونی بین آنها محاسبه و مقدار شیب خط خاک تعیین شد.

جدول ۱- شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده‌شده در تحقیق

منبع	فرمول	شاخص
Birth & Mc Vey (1968)	$SR = \frac{NIR}{RED}$	SR
Rouse et al. (1974)	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	NDVI
Huete (1988)	$SAVI = \frac{\rho NIR - \rho RED}{(\rho NIR + \rho RED + L)} \times (1 + L)$ L=1 پوشش گیاهی کم L=0/5 پوشش گیاهی متوسط L=0 پوشش گیاهی زیاد	SAVI ^۱
Baret et al. (1988)	$TSAVI1 = \frac{a(\rho NIR - a)(\rho RED - b)}{\rho RED + a\rho NIR - ab}$	TSAVI1 ^۲
Baret & Guyot (1991)	$TSAVI2 = \frac{a(\rho NIR - a)(\rho RED - b)}{\rho RED + a\rho NIR - ab + 0/08(1 + a^2)}$	TSAVI2 ^۳
Qi et al. (1994)	$MSAVI1 = \frac{\rho NIR - \rho RED}{\rho NIR - \rho RED + L} (1 + L)$ L = 1 - 2a.NDVI.WDVI	MSAVI1 ^۴
Qi et al. (1994)	$MSAVI2 = \frac{2\rho NIR + 1 - \sqrt{(2\rho NIR + 1)^2 - 8(\rho NIR - \rho RED)}}{2}$	MSAVI2 ^۵
Clever (1988)	$WDVI = NIR - a.RED$	WDVI ^۶
Tucker (1979)	$DVI = aNIR - RED$	DVI ^۷
Perry & Lautenschlager (1984)	$PVI1 = \frac{(aNIR - RED + b)}{\sqrt{a^2 + 1}}$	PVI1 ^۸
Bannari et al. (1996)	$PVI2 = \frac{(NIR - b) * (RED + a)}{\sqrt{1 + b^2}}$	PVI2 ^۹
Qi et al. (1994)	$PVI3 = b\rho NIR - a\rho RED$	PVI3 ^{۱۰}

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

1 Soil Adjusted Vegetation Index

2 Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index 1

3 Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index 2

4 Modified Soil Adjusted Vegetation Index1

5 Modified Soil Adjusted Vegetation Index2

6 Weighted Difference Vegetation Index

7 Difference Vegetation Index

8 Perpendicular Vegetation Index 1

9 Perpendicular Vegetation Index 2

10 Perpendicular Vegetation Index 3

داده‌های OLI (Baig *et al*, 2014) انجام مؤلفه سبزیگی حاصل استفاده شد (رابطه ۲).

$$TCT = -0.2941(\rho_{OLI_2}) - 0.243(\rho_{OLI_3}) - 0.5424(\rho_{OLI_4}) + 0.7276(\rho_{OLI_5}) + 0.0713(\rho_{OLI_6}) + 0.1608(\rho_{OLI_7})$$

رابطه ۲

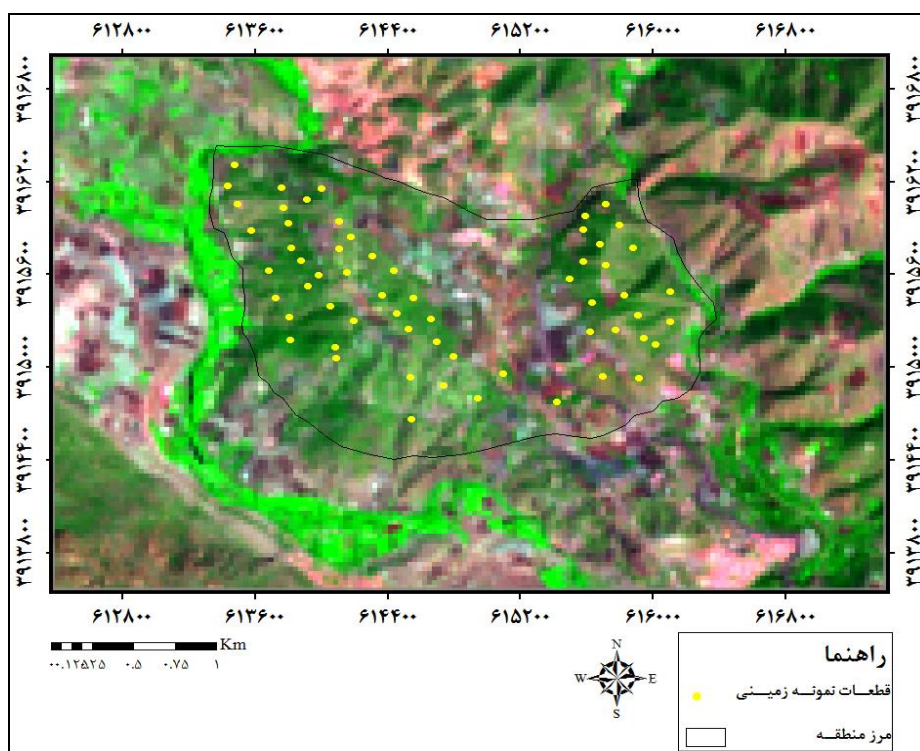
در رابطه بالا TCT مؤلفه سبزیگی تبدیل تسلدکپ و 7-OLI پادانسان حاصل از تبدیل باندهای ۲-۷ سنجنده OLI است. فرایند ادغام باند پانکروماتیک با دیگر باندهای طیفی نیز به دو روش ادغام معکوس PCA از تمامی باندهای اصلی و تبدیل فضای رنگ از باندهای قرمز، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی انجام شد. براساس مختصات مراکز قطعات نمونه نقشه وکتوری و رستری قطعات نمونه در محیط GIS تهیه شد (شکل ۴).

برای تبدیل DNهای تصویر به رفلکتانس که لازمه محاسبه در بعضی از شاخص‌های گیاهی است، از رابطه ۱ و بدون تصحیح زاویه تابش خورشید استفاده شد (www.landsat.usgs.gov).

$$\rho_{\lambda'} = M_p Q_{cal} + A_p$$

رابطه ۱

در این رابطه $\rho_{\lambda'}$ رفلکتانس باندهای تصاویر، M_p ضریب تبدیل هر باند، Q_{cal} باند اصلی و A_p اضافه ثابت هر باند است که ضرایب و اضافه‌های ثابت باندها از فایل Header تصاویر استخراج شدند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی به دو حالت، تمامی باندهای اصلی و همچنین کلیه باندها با همبستگی زیاد (همه باندها به جز باند مادون قرمز نزدیک، براساس جدول همبستگی بین باندها) و مؤلفه‌های اول هر دو تحلیل در تجزیه و تحلیل‌های بعدی استفاده شد. تبدیل تسلدکپ نیز براساس رابطه تهیه شده برای



شکل ۴- نقشه پراکنش قطعات نمونه زمینی بر روی تصویر رنگی کاذب (RGB) ۷۵۴ تصویر ماهواره‌ای OLI در منطقه تحقیق

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)}{N} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$Bias(\%) = \frac{Bias}{\bar{y}} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

در این روابط، N تعداد نمونه‌ها، \hat{y}_i مقدار برآورد شده، y_i مقدار واقعی و \bar{y} میانگین مقادیر واقعی است.

نتایج

برآورد شاخص سطح برگ

براساس پردازش عکس‌های نیم‌کروی حاصل از دوربین چشم ماهی، مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین شاخص سطح برگ در ۶۰ قطعه نمونه به ترتیب ۰/۲۷، ۲/۱۸ و ۱/۱۵ است. بررسی کیفیت تصاویر نشان داد که تصاویر کیفیت مطلوبی دارند. همچنین همخوانی مکانی تصاویر با لایه‌های وکتوری جاده‌ها و آبراهه‌ها، هندسه درست تصاویر را تأیید کرد و نیازی به تصحیح هندسی مجدد تصاویر نیست. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال برخوردارند ($P > 0/05$). مقادیر چولگی و کشیدگی نیز این نکته را تأیید کردند.

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون بین شاخص سطح برگ در قطعات نمونه زمینی و ارزش‌های طیفی متناظر در باندهای اصلی و محاسباتی نشان داد که شاخص سطح برگ بیشترین و کمترین مقدار همبستگی را با شاخص‌های پوشش گیاهی SR ($r=0/827$) و PVI3 ($r=0/409$) دارد و همه باندها همبستگی معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد دارند (جدول ۲).

استخراج ارزش‌های طیفی در محل قطعات نمونه

به‌منظور استخراج ارزش‌های طیفی در محل قطعات نمونه و با توجه به اندازه قطعات ۴۵×۴۵ متر اندازه پیکسل‌های باندها به ۱۵×۱۵ متر تبدیل شد تا هر قطعه نمونه ۹ پیکسل را شامل شود. استخراج ارزش‌های رقومی از طریق میانگین‌گیری ارزش‌های طیفی پیکسل‌های متناظر با قطعات نمونه زمینی و با استفاده از نقشه رستری قطعات نمونه زمینی از باندهای اصلی و محاسباتی انجام شد.

تجزیه و تحلیل‌های آماری

ابتدا بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آماره‌های توصیفی (چولگی و کشیدگی) و آزمون آماری کولموگروف-اسمیرنوف انجام شد. سپس ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده در ۷۵ درصد قطعات نمونه و ارزش‌های طیفی متناظر محاسبه و معنی‌داری روابط حاصل در سطوح احتمال ۹۹ و ۹۵ درصد مشخص شد. برای انتخاب متغیر برآوردکننده مناسب و مدل‌سازی آماری از دو روش رگرسیون ساده با مدل‌های خطی (Linear)، لگاریتمی (Logaritmik)، درجه دوم (Quadratic) و نمایی (Exponential) و روش رگرسیون خطی چندگانه به روش گام‌به‌گام (Stepwise) استفاده شد. در نهایت از بین مدل‌های به‌دست‌آمده مدل‌های دارای بیشترین ضریب تبیین، اعتبارسنجی شدند.

اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی

اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از ۲۵ درصد نمونه‌ها که به‌صورت تصادفی انتخاب شده بودند (قطعات شاهد) و بر پایه آماره‌های معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نسبی (RMSE %)، اریبی (Bias) و اریبی نسبی (Bias %) (روابط ۳، ۴، ۵ و ۶) انجام شد (Tian et al., 2007; Sohrabi et al., 2010).

جدول ۲- مقدار همبستگی پیرسون بین شاخص سطح برگ و باندهای اصلی و محاسباتی

r	باندهای اصلی و محاسباتی	r	باندهای اصلی و محاسباتی
۰/۷۶۶**	MSAVI2	-۰/۷۵۵**	B1
۰/۷۷۳**	PVI1	-۰/۷۷۷**	B2
۰/۷۲۹**	PVI2	-۰/۷۵۹**	B3
-۰/۴۰۹**	PVI3	-۰/۷۷۴**	B4
۰/۷۷۳**	DVI	-۰/۴۱۱**	B5
۰/۴۹۹**	WDVI	-۰/۷۰۷**	B6
-۰/۷۳۱**	FUS 1-PCA	-۰/۷۳۸**	B7
-۰/۷۶۷**	FUS 2-PCA	-۰/۷۶۸**	B8
-۰/۷۵۶**	FUS 3-PCA	۰/۷۶۵**	Greenness
-۰/۷۸۱**	FUS 4-PCA	-۰/۷۴۵**	PCA ₁ (1-8)
-۰/۴۱۷**	FUS 5-PCA	-۰/۷۲۹**	PCA ₁ (1-4, 6-8)
-۰/۷۶۷**	FUS 6-PCA	۰/۸۲۲**	NDVI
-۰/۷۹۱**	FUS 7-PCA	۰/۸۲۷**	SR
-۰/۷۸۸**	FUS 7-HIS	۰/۷۹**	SAVI
-۰/۶۲۴**	FUS 5-HIS	-۰/۷۷۴**	TSAVI1
-۰/۸۲۸**	FUS 4-HIS	-۰/۷۷۴**	TSAVI2
		۰/۷۶۱**	MSAVI1

** : معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد، B1-B8: باندهای اصلی ۱ تا ۸، Greenness: باند سبزی‌نگی حاصل از تسلاکپ، PCA₁: مؤلفه اول حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی، FUS 1- PCA-FUS 7-PCA: باندهای حاصل از ادغام باندهای ۱ تا ۷ با باند پانکروماتیک به روش معکوس PCA، FUS 4-HIS- FUS 7-HIS: باندهای حاصل از ادغام باندهای ۴، ۵ و ۷ با باند پانکروماتیک به روش HIS

همچنین مدل‌های خطی حاصل از متغیرهایی که ضریب تبیین بیشتر از ۰/۶ داشتند (جدول ۳) به‌عنوان بهترین مدل‌های برآوردی انتخاب شده و اعتبارسنجی شدند.

نتایج بررسی مدل‌های رگرسیونی ساده نشان داد با توجه به اینکه مدل‌های استفاده‌شده دارای ضرایب تبیین (R^2) نزدیک به هم بودند، براساس دو اصل سادگی و بهترین برازش، از مدل خطی برای مدلسازی شاخص سطح برگ استفاده شد.

جدول ۳- مدل‌های رگرسیونی انتخاب‌شده بین شاخص سطح برگ (y) در قطعات نمونه و ارزش‌های طیفی متناظر در باندهای اصلی و محاسباتی (x) سنجنده OLI

R ²	مدل رگرسیونی	متغیر پیش‌بینی کننده	R ²	مدل رگرسیونی	متغیر پیش‌بینی کننده
۰/۶۲	y=4.374-0.0003x	FUS 7-HIS	۰/۶۸۶	y=5.89-0.0005x	FUS 4-HIS
۰/۶۱	y=3.016-0.0001x	FUS 4-PCA	۰/۶۸۴	y=-6.673+5.197x	SR
۰/۶۰۴	y=13.664-0.0012x	B2	۰/۶۷۵	y=-2.077+16.073x	NDVI
۰/۶	y=12089-12085x	TSAVI1	۰/۶۲۶	y=2.81-0.0001x	FUS 7-PCA
۰/۶	y=12089-12085x	TSAVI2	۰/۶۲۴	y=-2.244+17.713x	SAVI

اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی

نتایج اعتبارسنجی مدل‌های انتخاب‌شده با استفاده از آزمون t، براساس ۱۵ قطعه نمونه شاهد و با معیارهای RMSE (%)، Bias (%). در جدول ۴ درج شده است. مدل‌های ساده NDVI، SR و چندگانه از جمله مدل‌های مناسب‌اند.

نتایج تحلیل رگرسیونی چندگانه گام‌به‌گام نیز نشان داد که مجموع سه متغیر NDVI، SR و SAVI با ضریب تبیین ۰/۷۵ بهترین مدل چندگانه (رابطه ۷) را برای برآورد شاخص سطح برگ تشکیل دادند.

رابطه ۷

$$LAI = -19.129 - 23.46NDVI + 19.89SR - 25.846SAVI$$

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی مدل‌های انتخاب‌شده

Bias (%)	Bias	RMSE (%)	RMS E	متغیر پیش‌بینی کننده	Bias (%)	Bias	RMSE (%)	RMSE	متغیر پیش‌بینی کننده
۴۸/۶۵	۰/۵۷۳	۵۶/۲	۰/۵۹	TSAVI1	-۰/۰۴	-۰/۰۰۰۵	۲۰	۰/۲۲	چندگانه
۴۸/۶۵	۰/۵۷۳	۵۶/۲	۰/۵۹	TSAVI2	-۱/۸۳	-۰/۰۱۹	۲۲/۶	۰/۲۴	SR
۵۱/۴۵	۰/۵۴۷	۵۹	۰/۶۲	B2	-۱/۳۸	-۰/۰۱۴	۲۲/۹	۰/۲۴	NDVI
۵۴/۹۳	۰/۵۸۴	۵۹/۵	۰/۶۳	FUS 7-PCA	-۳/۰۳	-۰/۰۳۲	۲۴/۳۳	۰/۲۵	SAVI
۵۵/۹۶	۰/۵۹۵	۶۰/۵	۰/۶۴	FUS 4-PCA	۳/۱۹	۰/۰۳۳	۲۴/۱	۰/۲۵	FUS 7-HIS
					-۱/۹	-۰/۲۸۵	۳۵/۶	۰/۳۷	FUS 4-HIS

بحث

داد که مقدار ضریب تبیین (R^2) در کلیه مدل‌ها برای باندهای مختلف بسیار به هم نزدیک است. از این‌رو تنها آن دسته از مدل‌های خطی معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹ درصد که ضریب تبیین آنها بیش از ۰/۶ بودند، به همراه مدل نهایی چندگانه با استفاده از ۱۵ قطعه نمونه شاهد مورد اعتبارسنجی بر پایه آماره‌های RMSE، RMSE(%) و Bias مقایسه شدند. کم بودن نسبی این آماره‌ها در مورد مدل‌های حاصل از شاخص‌های پوشش گیاهی پرکاربرد SR و NDVI و مدل چندگانه برپایه شاخص‌های NDVI، SR و SAVI بیانگر قابلیت مدل‌های یادشده و اهمیت دو شاخص پوشش گیاهی SR و NDVI در زمینه مدل‌سازی شاخص سطح برگ است. این جمع‌بندی در مطالعات دیگری مانند Persson, (2014)؛ Zhang et al. (2011) و Soudani et al. (2006) نیز بیان شده است.

شاخص‌های خط خاک استفاده‌شده در این تحقیق SAVI، TSAVI1، TSAVI2، MSAVI1، MSAVI2، PVI1، PVI2، PVI3، WDVI و DVI در مقایسه با شاخص‌های SR و NDVI همبستگی کمتری در زمینه شاخص سطح برگ از خود نشان دادند. دلایل آن را می‌توان در تراکم متوسط توده‌های درختی به همراه پوشش علفی خشک‌شده (در تاریخ تصویر) کف جنگل و از این‌رو اثرگذار نبودن بازتاب سطح خاک، جستجو کرد.

در پژوهش حاضر، قابلیت تصویر سنجنده OLI به‌عنوان جدیدترین محصول سری لندست به‌منظور برآورد شاخص سطح برگ بررسی شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، تصویر OLI و استفاده از مدل‌های رگرسیونی ساده و چندگانه توانستند به مقدار مناسبی شاخص سطح برگ را در منطقه پژوهش برآورد کنند. از این‌رو در صورت کسب نتایج مشابه در دیگر مناطق زاگرس، امکان تعمیم نتایج، و زمینه برآورد این شاخص اکولوژیکی مهم با صرف زمان و هزینه کمتر فراهم خواهد شد.

در تحلیل همبستگی مشخص شد که شاخص سطح برگ با کلیه باندهای اصلی (مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی) دارای ضرایب همبستگی منفی است که بیانگر رابطه معکوس بین این شاخص و ارزش‌های طیفی است. هرچند که این نتیجه با نتایج تحقیق Stenberg et al. (2004) در جنگل‌های فنلاند با دو گونه غالب کاج اسکاتلندی (*Pinus sylvestris*) و نوئل نروژی (*Picea abies*) با تراکم متوسط همسوست ولی با توجه به پوشش گیاهی نیمه‌متراکم منطقه پژوهش، انتظار می‌رفت با افزایش شاخص سطح برگ که به‌نوعی بیانگر افزایش سبزی‌نگی توده است، بازتاب‌ها در باند مادون قرمز نزدیک هم افزایش یابد و همبستگی مثبت باشد که عملاً این حالت رخ نداده است. دلیل احتمالی آن تجمع گردوغبار ورودی از کشور عراق از اوایل خرداد تا آبان در غرب کشور (منطقه تحقیق) و اثرهای منفی آن بر برگ درختان تا زمان تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده (شهریور) است. همچنین تحلیل همبستگی نشان داد که براساس انتظار دو شاخص پوشش گیاهی SR و NDVI، که در زمینه مطالعات پوشش گیاهی کاربردهای فراوانی دارند و افزایش مقادیر آنها بیانگر وجود پوشش گیاهی بیشتر در منطقه است، دارای همبستگی مثبت با شاخص سطح برگ است. این وضعیت هماهنگ با یافته‌های Persson, (2014)؛ Kovacs et al. (2004) و Jianjun et al. (2005) نیز است. نکته یادشده در مورد شاخص‌های خط خاک که براساس مبانی، در راستای حذف اثر خاک در چنین توده‌های نیمه‌متراکمی به کار می‌روند و نمایانگر اندازه پوشش گیاهی هستند (Alavipanah, 2014) نیز صادق و همسو با نتایج Zhang et al. (2011) و Soudani et al. (2006) است.

نتایج تحلیل رگرسیونی ساده با مدل‌های خطی، لگاریتمی، درجه دوم، نمایی بین شاخص سطح برگ قطعات نمونه زمینی و ارزش‌های طیفی متناظر نشان

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, Faculty of Natural Resources, Department of Forestry, University of Kordistan.
- Alavipanah, S. K. (2014). *Application of remote sensing in the earth sciences (soil)*. University of Tehran press, ISBN, 964-03.
- Arias, D., Calvo-Alvarado, J., & Dohrenbusch, A. (2007). Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 247(1), 185-193.
- Aronoff, S. (2005). *Remote Sensing for GIS Managers* (Ali. A. Darvishsefat, M. Pir Bavaghar & M. Rajab Pourrahmati, Trans.). Redlands: ESRI Press.
- Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423-431.
- Bréda, N. 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.
- Chen, J. M., & Black, T. A. (1992). Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15(4), 421-429.
- Hemmatboland, I., Akbarinia, M., & Shafiei, A. B. (2010). The effect of fire on some soil chemical properties of oak forests in Marivan region. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(2), 205-218.
- Jiang, J., Chen, S., Cao, S., Wu, H., Zhang, L., & Zhang, H. (2005). Leaf area index retrieval based on canopy reflectance and vegetation index in eastern China. *Journal of Geographical Sciences*, 15(2), 247-254.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and forest meteorology*, 121(1), 19-35.
- Kovacs, J. M., Flores-Verdugo, F., Wang, J., & Aspden, L. P. (2004). Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data. *Aquatic botany*, 80(1), 13-22.
- Marvie Mohadjer, M.R. (2011). *Silviculture*, University of Tehran Press.
- Neumann, H. H., Den Hartog, G., & Shaw, R. H. (1989). Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45(3-4), 325-345.
- Sohrabi, H., Hosseini, S. M., & Zobeiri, M. (2010). Estimation of forest stand volume using textural indices of aerial images. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(2), 297-306.
- Persson, S. (2014). Estimating leaf area index from satellite data in deciduous forests of southern Sweden. *Student thesis series INES*.
- Soudani, K., François, C., Le Maire, G., Le Dantec, V., & Dufrêne, E. (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(1), 161-175.
- Stenberg, P., Rautiainen, M., Manninen, T., Voipio, P., & Smolander, H. (2004). Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands. *Silva Fennica*, 38(1), 3-14.
- Stenberg, P., Linder, S., Smolander, H., & Flower-Ellis, J. (1994). Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands. *Tree Physiology*, 14(7), 981-995.

Tian, Q. J., Luo, Z., Chen, J. M., Chen, M., & Hui, F. (2007). Retrieving leaf area index for coniferous forest in Xingguo County, China with Landsat ETM+ images. *Journal of environmental management*, 85(3), 624-627.

Zhang, Z., He, G., Wang, X., & Jiang, H. (2011). Leaf area index estimation of bamboo forest in Fujian province based on IRS P6 LISS 3 imagery. *International journal of remote sensing*, 32(19), 5365-5379.



Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 data

N.Miri¹, A.A. Darvishsefat^{2*}, N.Zargham³, and Z.Shakeri⁴

¹M.Sc. Graduate of forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

² Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

³Associate Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

⁴Assistant Prof., Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, I. R. Iran

(Received: 06 February 2016, Accepted: 23 October 2016)

Abstract

Leaf area index (LAI) is an important feature controlling many forest ecological processes like gaseous exchanges between the atmosphere and forests, photosynthesis, evapotranspiration, water and carbon cycles. The aim of this study was to evaluate Landsat-8 OLI data to estimate LAI of forests in Zagros forests in Marivan region. To determine the relationship between LAI and OLI data, 60 sample plots were defined with a dimension of 45×45 m. The LAI value within each ground sample plot was determined using hemispherical photography and Gap Light Analyzer software. Suitable enhancement techniques such as vegetation indices, Principle Component Analysis (PCA), Tasseled Cap transformation and fusion were performed. The spectral values of corresponding plots were also extracted. Based on correlation analysis and contrary to expectations, negative correlation was observed between LAI, which represents the amount of greenness, and reflections in the infrared band. This could be due to the accumulation of dust on the leaves. The relationship between the spectral values and ground LAI were analyzed using stepwise multiple regression with 75% of the samples. Validation of resulted statistical models using the rest of control plots (25%) showed that the linear models are more efficient. The simple linear model of LAI and SR vegetation index ($R^2=0.682$, $RMSE\% =22.6\%$ and $Bias\% =-1.83$) and the multiple regression model of NDVI, SR and SAVI ($R^2=0.722$, $RMSE\% =20\%$ and $Bias\% =-0.04$) were the best ones for estimating the LAI from satellite data. Further complementary studies for determining the amount of LAI underestimation by hemispherical photography, capabilities of other remote sensing data and analysis methods are suggested to enhance this approach to estimate LAI.

Keywords: Hemispherical photographs, Leaf area index (LAI), OLI sensor, Zagros forests.