



## Estimating the Average Age and Height of the Trees using SPOT-5 Panchromatic and Multi-spectral Image Fusion

Ali Shamsoddini<sup>1\*</sup>, Saeed Miranzadeh<sup>2</sup>, Ali Jafar Mousivand<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor of Remote Sensing, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Graduated Student of Remote Sensing and Geographic Information System, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

Article Type: Research article

Article history:

Received 08 September 2018

Accepted 15 November 2018

Available online 22 February 2019

Keywords:

Pixel-level Image Fusion,  
Age, Height, Spectral  
Information, Textural  
Information, SPOT-5.

Citation: Shamsoddini, A., Miranzadeh, S., Mousivand, A. J. (2019). A Field Study of the Function of Climatic Parameters in Tourism and the Validation of Bioclimatic Indices (Case Study: Gandoman Lagoon). *Geography and Sustainability of Environment*, 8 (4), 45-59.

### ABSTRACT

Sustainable management of the forests requires satellite data at a large scale. This research aims to exploit pixel-based image fusion methods including principal component analysis (PCA) transformation, wavelet transformation, PCA/Wavelet transformation to improve the estimation accuracy of the mean height and age of a *Pinus radiata* plantation using SPOT-5 panchromatic and multi-spectral images at segment level. Therefore, the average height and age of the trees is measured within 61 plots in a *Pinus radiata* plantation in NSW, Australia. After applying pre-processing on the images, the spectral information including reflectance and vegetation indices along with textural information derived from gray level co-occurrence matrix for four window sizes and orientations are extracted from multispectral and panchromatic images, respectively. The same information is extracted from the fused images. It is shown that the textural information derived from the fused images performs more efficient than the textural information derived from panchromatic images to estimate average height and age. The results indicate that the models derived from PCA/Wavelet-based fused images with estimation error of 16% and 11% for age and height, respectively, perform better than the models derived from the data extracted from the images fused by the other fusion methods.



## تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان با استفاده از ترکیب تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک اسپات-۵

علی شمس‌الدینی<sup>۱\*</sup>، سعید میرانزاده<sup>۲</sup>، علی جعفر موسیوند<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>استادیار سنجش‌ازدور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>تاریخچه مقاله:</p> <p>دریافت ۱۷ شهریور ۱۳۹۷</p> <p>پذیرش ۲۴ آبان ۱۳۹۷</p> <p>دسترسی آنلاین ۳ اسفند ۱۳۹۷</p> <p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>ترکیب تصاویر در سطح پیکسل، سن، ارتفاع، اطلاعات طیفی، اطلاعات بافتی، اسپات-۵.</p> <p>استناد: شمس‌الدینی، علی؛ میرانزاده، سعید؛ موسیوند، علی جعفر (۱۳۹۷). تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان با استفاده از ترکیب تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک اسپات-۵. <i>جغرافیا و پایداری محیط</i>، ۲۹ (۴)، ۴۵-۵۹.</p>	<p>تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، اهمیت فراوانی در مدیریت پایدار و مؤثر آن‌ها دارد. هدف از این پژوهش، استفاده از روش‌های ترکیب تصاویر در سطح پیکسل به منظور بهبود تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان (گونه کاج مونتری) است. اطلاعات سن و ارتفاع درختان در قالب ۶۱ پلات از جنگل دست‌کاشت کاج برداشت شد و عملکرد سه روش ترکیب تصاویر در سطح پیکسل، شامل تبدیل مؤلفه‌های اصلی، تبدیل موجک و تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک به منظور بررسی بهبود تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان با استفاده از تصاویر اسپات-۵ مورد مقایسه قرار گرفت. از هریک از تصاویر حاصل از ترکیب، اطلاعات طیفی و بافتی استخراج شد. برای استخراج اطلاعات طیفی، از شاخص‌های گیاهی و باندهای انعکاسی و برای استخراج اطلاعات بافتی، از ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری در چهار اندازه پنجره و چهار زاویه مختلف استفاده شد. مقایسه عملکرد مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی مستخرج از تصویر پانکروماتیک اسپات-۵ و اطلاعات بافتی حاصل از سه روش ترکیب تصاویر مورد استفاده در این پژوهش نشان داد: تخمین‌های حاصل از اطلاعات بافتی مستخرج از تصاویر ترکیب‌شده دارای دقت بیشتری هستند؛ همچنین، نتایج مدل‌سازی با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره نشان داد که روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک با درصد خطای ۱۶٪ برای سن درختان و ۱۱٪ برای ارتفاع درختان، عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان دارد.</p>

## مقدمه

جنگل‌ها نقشی کلیدی در تنظیم آب‌وهوای جهان، چرخه کربن، تبدیل دی‌اکسید کربن به اکسیژن و تبادل انرژی با اتمسفر و دیگر عملکردهای اکوسیستم ایفا می‌کنند (گاتز<sup>۱</sup>، ۱۹۹۰). امروزه جنگل‌ها دست‌خوش تغییرات شدیدی شده‌اند و مساحت آن‌ها روز به روز در حال کاهش است. با وجود این شرایط، هرگونه برنامه‌ریزی به‌منظور مدیریت صحیح بر منابع جنگلی، به‌ویژه جنگل‌هایی که به‌لحاظ تأمین و تولید چوب مهم هستند؛ نیازمند داشتن اطلاعاتی به‌هنگام از مشخصه‌های ساختاری جنگل‌ها، برای آگاهی از وضعیت آن، برآورد میزان تولید جنگل، پیش‌بینی و مدل‌سازی فشارهای وارده به جنگل و پیش‌بینی مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی آن است (والدر<sup>۲</sup>، ۱۹۹۸). امروزه استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور به‌عنوان روشی کم‌هزینه، اقتصادی و سریع در کسب اطلاعات در مورد مشخصه‌های ساختاری جنگل‌ها و به‌روزرسانی این اطلاعات مطرح است (شمس‌الدینی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۳ الف). داده‌های سنجش‌ازدور اپتیک منبع قابل اعتمادی از اطلاعات برای ارزیابی مشخصه‌های جنگل‌ها در سطح وسیع هستند (والدر، ۱۹۹۸). هزینه نسبتاً کم، دسترسی آسان به این داده‌ها و همچنین موجودبودن آن‌ها، در دامنه وسیعی از قدرت تفکیک‌پذیری مکانی و طیفی باعث افزایش پتانسیل آن‌ها برای تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها با استفاده از انواع اطلاعات مختلف مانند انعکاس، اطلاعات طیفی و شاخص‌های بافتی می‌شود (شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۳ الف)؛ از جمله محدودیت‌های استفاده از تصاویر اپتیک در تمامی زمینه‌ها، محدودیت سیگنال به نویز سنجنده‌های سنجش‌ازدور مربوط به این تصاویر است، این محدودیت باعث شده تا تصاویر پانکروماتیک دارای قدرت تفکیک مکانی بالا و قدرت تفکیک طیفی ضعیف بوده، اما در مقابل تصاویر چندطیفی، اطلاعات طیفی بهتر با قدرت تفکیک مکانی کمتری را ارائه دهند. بدین منظور روش‌های ترکیب تصاویر<sup>۴</sup> در سطح پیکسل برای بهبود و بازسازی قدرت تفکیک طیفی و مکانی تصاویر از جمله تکنیک‌های مطرح در زمینه استفاده از داده‌های اپتیک هستند (شمس‌الدینی، ۱۳۸۵: ۱۴).

به‌طور کلی هدف از ترکیب تصاویر در سطح پیکسل، افزایش کیفیت و محتوای اطلاعات (مکانی و طیفی) موجود در هر یک از تصاویر اولیه است تا بدین‌وسیله بتوان به اطلاعاتی دست یافت که با استفاده از داده‌های اولیه به‌تنهایی امکان دستیابی به آن‌ها نیست. ترکیب تصاویر در سطح پیکسل، به‌معنی ترکیب در پایین‌ترین سطح پردازش بدون توجه به ویژگی‌های کلی تصویر بوده و روی تک‌تک پیکسل‌ها اعمال می‌شود (پوهل و ونگردن<sup>۵</sup>، ۱۹۹۸). ترکیب تصاویر در سطح پیکسل، به‌معنای استفاده از تصویر پانکروماتیک به‌دلیل بهتر بودن قدرت تفکیک مکانی این تصویر، به‌منظور ترکیب با تصاویر دیگر، به‌ویژه تصاویر چندطیفی است (اسچو و نگرت<sup>۶</sup>، ۲۰۰۶: ۳۷۴). تصحیح هندسی و هم‌مختصات‌کردن<sup>۷</sup> تصاویر از سنجنده‌های مختلف، نقش بسیار مهمی در نتایج حاصل از ترکیب تصاویر در سطح پیکسل دارد؛ به‌طوری که تطبیق نادرست تصاویر موجب ایجاد اعوجاجات طیفی و یا هندسی در تصویر خروجی می‌شود (پوهل و ونگردن، ۱۹۹۸). طی فرایند ترکیب، تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی با توجه به الگوریتم ترکیب مورد استفاده، نسبت‌های مختلفی از ویژگی‌های مکانی و طیفی تصاویر ورودی را به تصویر به‌دست‌آمده منتقل می‌کنند. میزان این نسبت‌ها و همچنین روش ترکیب آن‌ها، ویژگی‌های طیفی و مکانی

- 1- Gates
- 2- Wulder
- 3- Shamsoddini
- 4- Image Fusion
- 5- Pohl & Van Genderen
- 6- Schowengerdt
- 7- Registration

متفاوتی در تصویر خروجی ایجاد می‌کند.

تاکنون روش‌های مختلفی برای ترکیب تصاویر در سطح پیکسل ارائه شده است، ضرورت اصلی تمام روش‌های ترکیب تصاویر، حفظ یا ایجاد حداقل تغییرات در اطلاعات موجود در تصاویر ورودی است؛ از جمله متداول‌ترین روش‌های ترکیب تصاویر، ترکیب تصاویر بر پایه تبدیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۱</sup> است. در پژوهش‌های مختلفی از این روش برای افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر چندطیفی مبنای ترکیب آن‌ها با تصاویر پانکروماتیک استفاده شده است (ژانگ<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰؛ لیو و هی<sup>۳</sup>، ۲۰۰۸). از جمله عیب‌های این روش، وجود مقداری اطلاعات طیفی در اولین مؤلفه اصلی است که متعاقباً جایگزین کردن این مؤلفه با تصویر پانکروماتیک، موجب از دست رفتن مقداری از اطلاعات طیفی در تصویر حاصل از ترکیب می‌شود که نتیجه آن، وجود اعوجاج طیفی در تصویر به دست آمده خواهد بود (علیمحمدی و همکاران، ۱۳۸۷)؛ بدین منظور، پژوهشگران روش‌های مختلفی برای بهبود خروجی این روش پیشنهاد کردند که از جمله آن‌ها می‌توان به اعمال فیلتر بالاگذر (متوالی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۹)، تبدیل مقادیر پشتیبیان<sup>۵</sup> (یانگ<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۲)، تبدیل موجک<sup>۷</sup> (تسنگ و چن<sup>۸</sup>، ۲۰۰۱)، گونزالس-اودیکانا<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۴) اشاره کرد.

تمامی این روش‌ها از یک مبنای کلی که همان استخراج اطلاعات مکانی از تصویر پانکروماتیک و اضافه کردن این جزئیات به تصاویر چندطیفی است، پیروی می‌کنند، ولی در عمل ممکن است از شیوه‌ها و راهکارهای متفاوتی به منظور استخراج داده‌های مکانی و نیز اضافه کردن آن‌ها به تصاویر چندطیفی استفاده کنند (تسنگ و چن، ۲۰۰۱). ترکیب تصاویر بر پایه تبدیل موجک، از جمله روش‌های ترکیب تصاویر در فضای فرکانسی است (علیمحمدی و همکاران، ۱۳۸۷). تبدیل موجک در جنبه‌های مختلف، توسعه یافته مفهوم فوریه است و به عنوان روشی جایگزین برای تبدیل فوریه زمان کوتاه پیشنهاد شد. تبدیل موجک از جمله روش‌های آنالیز چندتفکیکی<sup>۱۰</sup> است. هدف از این روش، نمایش تصاویر ورودی در سطوح تفکیک متفاوت و میزان اطلاعات مختلف است (شمس‌الدینی، ۱۳۸۵: ۷۸).

تبدیل موجک با اعمال بر تصویر ورودی، مجموعه‌ای از اطلاعات کلی و جزئی تصویر را در سطوح مختلف نمایش می‌دهد (صمدزادگان و همکاران، ۱۳۹۴: ۷۱). روش‌های ترکیب تصاویر بر مبنای تبدیل موجک به دو طریق انجام می‌شود که شامل انتخاب ضرایب موجک و جابه‌جا کردن جزئی ضرایب موجک است. در روش اول، تبدیل موجک بر روی تمامی تصاویر اعمال می‌شود؛ در روش دوم، تبدیل موجک تنها بر روی تصویر پانکروماتیک اعمال می‌شود (شمس‌الدینی، ۱۳۸۵: ۷۷). با اعمال تبدیل موجک بر روی تصاویر، اطلاعات مکانی و طیفی تصاویر در سطوح مختلف تفکیک می‌شوند. اعوجاجات طیفی حاصل از ترکیب تصاویر با استفاده از روش تبدیل موجک، نسبت به سایر روش‌های استاندارد ترکیب تصاویر کمتر است؛ با وجود این، ممکن است اثرات منفی دیگر نیز وجود داشته باشد. برخی از این اثرات ناشی از نوع روش تبدیل موجکی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که

1- Principle Component Analysis (PCA)

2- Zhang

3- Liu & He

4- Metwalli

5- Support Value Transformation

6- Yang

7- Wavelet

8- Tseng & Chen

9- Gonzalez-Audicana

10- Multiresolution Analysis

بعضی دیگر از این اثرات منفی در رابطه با نوع روش تزریق اطلاعات جزئی به تصویر چندطیفی است (آمولینس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۷).

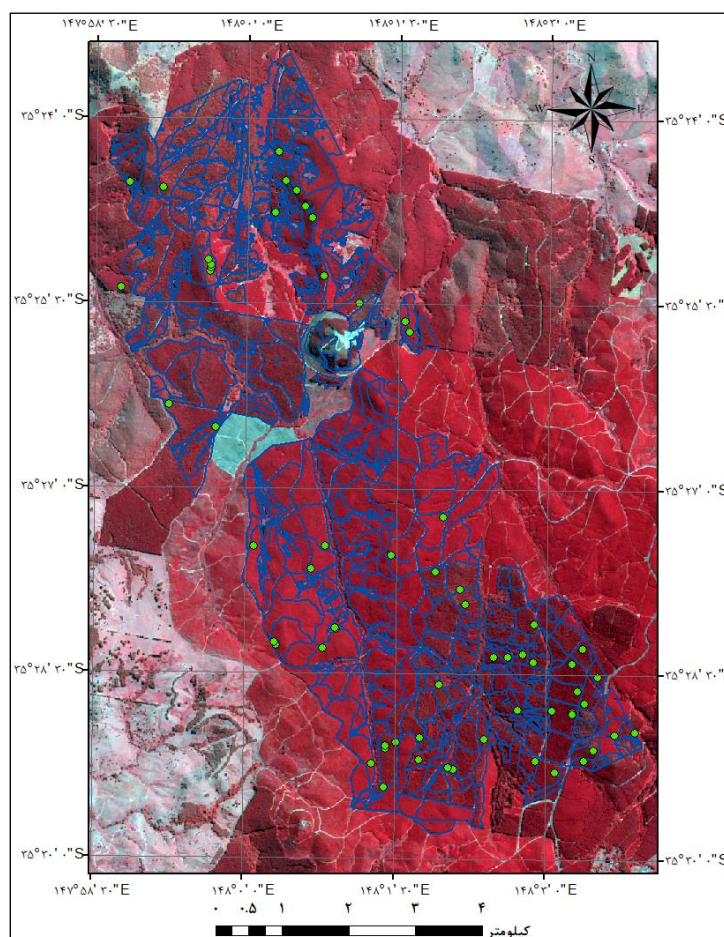
تاکنون مطالعات زیادی در زمینه مقایسه عملکرد روش‌های ترکیب تصاویر در سطح پیکسل انجام شده است؛ برای مثال تسنگ و چن (۲۰۰۱) با مقایسه عملکرد طیفی روش‌های تبدیل موجک، تبدیل مؤلفه‌های اصلی، آی-اچ-اس. (روشنایی - رنگ - اشباع)<sup>۲</sup> و تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک<sup>۳</sup>، نشان دادند که تصویر حاصل از روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک، عملکرد طیفی بهتری نسبت به تصاویر به‌دست‌آمده از سه روش دیگر دارد. در این رابطه شمس‌الدینی (۱۳۸۵) نیز با بررسی عملکرد طیفی و مکانی روش‌های مختلف ترکیب تصاویر نشان داد؛ در تصاویر با اختلاف قدرت تفکیک مکانی کم، عملکرد طیفی روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک نسبت به سایر روش‌های ترکیب تصاویر بهتر است و در تصاویر با اختلاف قدرت تفکیک مکانی زیاد روش تبدیل موجک بهترین عملکرد طیفی را نشان داد. در پژوهش‌های بالا هیچ‌گونه ارزیابی در رابطه با کاربرد تصاویر ترکیب‌شده در زمینه‌های مختلف از جمله مطالعات جنگل به‌عمل نیامده است.

در زمینه بررسی توانایی تصاویر حاصل از روش‌های ترکیب تصاویر در سطح پیکسل به‌منظور تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها تاکنون پژوهش‌های محدودی صورت گرفته است؛ برای نمونه واندرل<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۹) از تصاویر حاصل از ترکیب در سطح پیکسل برای بهبود تخمین کلاس‌های سنی و طبقه‌بندی این کلاس‌ها استفاده کردند. در این مطالعه که در جنگل‌های سدر قرمز غربی<sup>۵</sup> کلمبیا انجام شد، توانایی تصاویر طیفی ۲/۵ متر شده حاصل از ترکیب تصاویر در سطح پیکسل اسپات-۵ به‌منظور طبقه‌بندی ۷۶ توده درختی (کاج و درختان پهن‌برگ) در ۹ کلاس سنی از ۵ سال تا بیش از ۲۵۰ سال مورد بررسی قرار گرفت؛ همچنین ازدومیر<sup>۶</sup> (۲۰۰۸) برای تخمین حجم سرپای توده‌های درختان از تصاویر حاصل از ترکیب در سطح پیکسل کوئیک برد<sup>۷</sup> استفاده کرد، این پژوهش در جنگل‌های با گونه‌های درختی ارس<sup>۸</sup> در جنوب شرق ترکیه انجام گرفت. در این مطالعه، رابطه بین حجم سرپای پلات‌ها (داده‌های میدانی) و مساحت تاج درختان و مساحت سایه آن‌ها (اندازه‌گیری شده از تصاویر حاصل از ترکیب در سطح پیکسل کوئیک برد) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد بین مساحت سایه تاج درختان و حجم سرپای آن‌ها همبستگی بالایی وجود دارد. در هر دو مطالعه بالا، اگرچه از تصاویر ترکیب‌شده در مطالعات مربوط به پارامترهای ساختاری جنگل استفاده شده است، ولی مقایسه‌ای بین عملکرد تصاویر ترکیب‌شده و تصاویر اصلی ارائه نشده است؛ همچنین در مطالعات دیگر نیز تاکنون مقایسه عملکرد روش‌های مختلف ترکیب تصاویر در کاربردهای مطالعات جنگل از جمله تخمین پارامترهای ساختاری جنگل کمتر مورد بررسی قرار گرفته است؛ لذا در این پژوهش، قابلیت روش‌های ترکیب تصاویر در سطح پیکسل در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان کاج مونتری<sup>۹</sup> با استفاده از تصاویر اسپات-۵ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

- 1- Amolins
- 2- Intensity-Hue-Saturation (IHS)
- 3- Wavelet-Based PCA Image Fusion
- 4- Wunderle
- 5- Western Red Cedar
- 6- Ozdemir
- 7- Quick Bird
- 8- Juniperus
- 9- Pinus Radiata

### معرفی منطقه مورد بررسی

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، بخشی از جنگل‌های دست‌کاشت منطقه گرین هیلز<sup>۱</sup> در نزدیکی شهر بتلو<sup>۲</sup> در ایالت نیوساوت ولز<sup>۳</sup> استرالیا با مساحت ۵۰۰۰ هکتار است. این جنگل‌ها زیر کشت گونه کاج مونتری هستند. منطقه مورد مطالعه در طول جغرافیایی "۴۸' ۵۸" ۱۴۷° تا "۰۲' ۰۴" ۱۴۸° شرقی و عرض جغرافیایی "۰۰' ۲۳" ۳۵° تا "۵۸' ۲۹" ۳۵° جنوبی قرار گرفته است. میانگین ارتفاعی منطقه ۷۵۰ متر بالاتر از سطح دریا است (شکل ۱). بارش سالانه این منطقه در حدود ۱۱۷۵ میلی‌متر است. هرچند کاهش بارندگی در این منطقه در طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ منجر به محدودیت رشد معمول درختان کاج در این ناحیه شده است و براساس گزارش اداره جنگل‌بانی ایالت نیوساوت ولز، مهم‌ترین عامل مرگ و میر درختان کاج در سال ۲۰۰۷ در این ناحیه خشکسالی بوده است. منطقه مورد مطالعه دارای توپوگرافی متغیری بوده و شیب این ناحیه براساس نقشه رقومی ارتفاعی به‌دست‌آمده از داده‌های لیدار، بین ۰ تا بیش از ۲۰ درجه متغیر است. پوشش گیاهی این ناحیه به‌طور عمده درختان کاج مونتری بوده که به‌صورت تجاری در منطقه کشت شده‌اند. در کنار درختان کاج منطقه، قطعاتی از درختان اوکالیپتوس نیز در این ناحیه یافت می‌شود.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، مرز مربوط به محدوده قطعات جنگلی (خطوط آبی‌رنگ) و مراکز پلات‌های برداشت‌شده (نقاط سبزرنگ) بر روی تصویر رنگی کاذب اسپات-۵ (باند ۳ به‌عنوان قرمز، باند ۲ به‌عنوان سبز و باند ۱ به‌عنوان آبی)

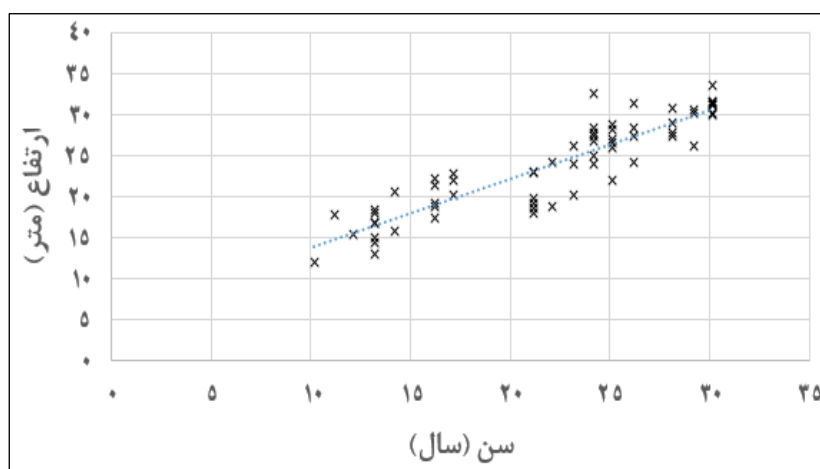
- 1- Green Hills
- 2- Batlow
- 3- New South Wales

## مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف تخمین سن و ارتفاع درختان کاج مونتری با استفاده از تصاویر اسپات-۵ انجام گرفت. هدف دیگر این تحقیق، ارزیابی تأثیر استفاده از روش‌های ترکیب تصاویر بر صحت تخمین سن و ارتفاع درختان است؛ به همین خاطر، لازم بود تا با توجه به هدف این پژوهش، ابتدا داده‌های میدانی از منطقه مورد مطالعه برداشت شوند. داده‌های میدانی حاصل از آماربرداری جنگل‌های کاج مونتری شامل ۶۱ پلات است که در سپتامبر ۲۰۰۸ به صورت تصادفی برداشت شد. طی عملیات آماربرداری، ارتفاع و قطر برابر سینه<sup>۱</sup> مربوط به ۹۷۸ درخت در سطح پلات‌ها اندازه‌گیری شد. موقعیت مراکز پلات‌ها و نیز هریک از درختان توسط تئودولیت لیزری و سیستم تعیین موقعیت جغرافیایی تفریقی<sup>۲</sup> تعیین شد. با توجه به موجودبودن اطلاعات زمان کاشت مربوط به درختان در هریک از پلات‌ها، میانگین سن درختان در هر پلات محاسبه شد. با توجه به کمبود تعداد پلات‌ها، این مطالعه در سطح توده‌های جنگلی<sup>۳</sup> انجام شد؛ یعنی از نقشه مربوط به توده‌های جنگلی درختان سوزنی‌برگ کاج مونتری استفاده شد (شکل ۱).

با توجه به اینکه در مشخصات هر قطعه تنها سن درختان ذکر شده بود و ارتفاع درختان محاسبه نشده بود، از مدل رگرسیونی حاصل از داده‌های میانگین ارتفاع و سن پلات‌های برداشت‌شده به منظور تخمین میانگین ارتفاع مربوط به هر قطعه استفاده شد. بدین منظور، بین سن و ارتفاع ۶۱ پلات برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه رابطه رگرسیونی برازش داده شد (شکل ۲) و صحت مدل رگرسیونی به دست آمده محاسبه شد (جدول ۱).

خطای حاصل از تخمین ارتفاع درختان براساس سن آن‌ها، حدود ۱۱٪ است (جدول ۱) که این خطا، کمتر از ۲۰٪ خطای پذیرفته‌شده برای آماربرداری جنگل است (هولمگرن و تارسون<sup>۴</sup>، ۱۹۹۸)؛ لذا می‌توان گفت که خطای به دست آمده قابل قبول است؛ همچنین این مدل رگرسیونی نشان داد که با استفاده از داده‌های سن درختان، می‌توان بیش از ۸۰٪ از تغییرات مربوط به ارتفاع درختان را در سطح پلات نشان داد (شکل ۲). با استفاده از مدل رگرسیونی به دست آمده، اطلاعات ارتفاعی برای هریک از این توده‌های درختی در این مطالعه به دست آمد و آمار مربوط به این قطعات استخراج شد (جدول ۲).



شکل ۲. رابطه رگرسیونی بین سن و ارتفاع درختان در سطح پلات‌ها

- 1- Diameter at Breast Height (DBH)
- 2- Differential Global Positioning System
- 3- Segment
- 4- Holmgren & Thuresson

جدول ۱. مدل رگرسیونی و میزان خطا

خطای تخمین (%)	ضرب تعیین <sup>۲</sup>	مجذور میانگین مربعات خطا <sup>۱</sup> (متر)	مدل رگرسیونی
۱۱٪	۰/۸۱	۲/۴۷	$H = (0/843 \times A) + 5/31$

نکته: A بیان‌کننده سن درختان و H بیان‌کننده ارتفاع درختان است.

جدول ۲. خلاصه اطلاعات آماری مربوط به سن و ارتفاع توده‌های درختان کاج مونتری

پارامترهای ساختاری	میانگین	بیشترین	کمترین	انحراف معیار
ارتفاع (متر)	۲۲/۹	۳۰/۶	۱۳/۷۴	۴/۷۵
سن (سال)	۲۰	۳۰	۱۰	۵/۶۴

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش شامل تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک ماهواره اسپات-۵ است (جدول ۳)، این تصاویر، نزدیک به زمان عملیات میدانی برداشت داده‌ها، در ۵ آوریل ۲۰۰۸ اخذ شده‌اند. داده‌های تهیه‌شده، قبلاً بر مبنای مدل رقومی زمین تصحیح هندسی شده بودند و لذا از نظر هندسی دقت بالایی داشتند. پیش‌پردازش تصاویر سنجش‌ازدور ضروری است. انرژی الکترومغناطیس ثبت‌شده توسط سنجنده‌ها در طی مسیر خود در درون اتمسفر تحت تأثیر جذب و پراکنش مواد تشکیل‌دهنده اتمسفر قرار می‌گیرد و به همین سبب، امواج الکترومغناطیس ثبت‌شده توسط سنجنده با آنچه از عوارض سطح زمین منعکس شده است، تفاوت دارد؛ لذا تأثیر اتمسفر روی تصویر به دست‌آمده باید کاهش یابد. در پژوهش حاضر، به منظور کاهش تأثیر اتمسفر، از روش تصحیح اتمسفری کسر جسم سیاه-<sup>۳</sup> بر روی تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک استفاده شد (کلارک<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۰)؛ همچنین به منظور محاسبه مقدار پراکنش رو به پایین<sup>۵</sup> ( $E_{down}$ ) برای اتمسفر رایلی فاقد ریزگرد با عمق نوری ۵۵۰ نانومتر، به عنوان یکی از پارامترهای مورد نیاز در روش کسر جسم سیاه-<sup>۳</sup>، از روش کد S6 استفاده شد (ورموت<sup>۶</sup> و همکاران، ۱۹۹۷).

ترکیب تصاویر در سطح پیکسل به معنی ترکیب در پایین‌ترین سطح پردازش است. این روش، به منظور افزایش اطلاعات مکانی مربوط به هر پیکسل در تصاویر به دست‌آمده از ترکیب استفاده می‌شود (پوهل و ونگردن، ۱۹۹۸). تصاویر سنجنده‌های مختلف برای ترکیب در سطح پیکسل، باید به خوبی نسبت به یکدیگر هم‌مرجع شده باشند تا تصویر حاصل از ترکیب دارای اعوجاج طیفی و هندسی کمی باشد. در پژوهش حاضر با توجه به اینکه از تصاویر یک سنجنده به منظور ترکیب تصاویر استفاده شد، نیازی به هم‌مرجع کردن تصاویر نبود. در این مطالعه، سه روش پرکاربرد ترکیب تصاویر در سطح پیکسل شامل تبدیل موجک، تبدیل مؤلفه‌های اصلی و تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳. مشخصات طیفی باندهای سنجنده HRG2 ماهواره اسپات-۵

باند طیفی	محدوده طول موج (نانومتر)	قدرت تفکیک مکانی (متر)
سبز	۵۰۰-۵۹۰	۱۰
قرمز	۶۱۰-۶۸۰	۱۰
مادون قرمز نزدیک	۷۸۰-۸۹۰	۱۰
مادون قرمز میانی	۱۵۸۰-۱۷۵۰	۲۰
پانکروماتیک	۴۸۰-۷۱۰	۲/۵

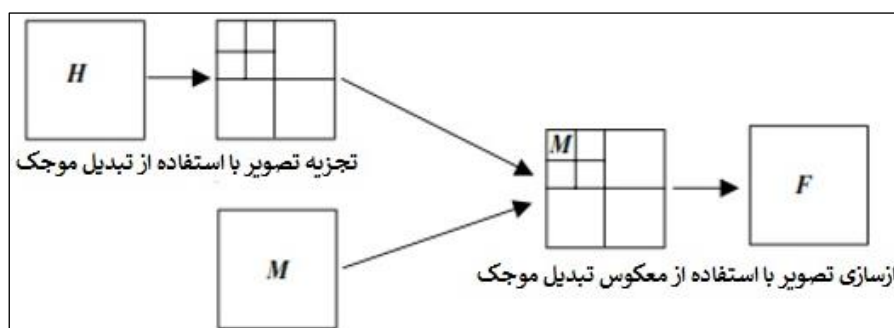
- 1- Root Mean Square Error (RMSE)
- 2- Coefficient of Determination (R2)
- 3- Durk Object Subtraction
- 4- Clark
- 5- Downwelling Scattering
- 6- Vermote



ترکیب تصاویر بر پایه تبدیل مؤلفه‌های اصلی، یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده در این پژوهش است. روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی، جزء روش‌های خطی محسوب می‌شود و جزء روش‌های چرخشی نیز تقسیم‌بندی می‌شود (شمس‌الدینی، ۱۳۸۵: ۵۰). در امتداد محور مؤلفه اصلی پراکندگی داده‌ها به مراتب بیشتر از سایر مؤلفه‌ها است (اسچوونگرت، ۲۰۰۶). این یعنی اولین مؤلفه، حاوی بیشترین مقدار واریانس و به بیان دیگر، بالاترین میزان اطلاعات مکانی در بین مؤلفه‌های دیگر است؛ لذا این مؤلفه، دارای بیشترین شباهت با تصویر پانکروماتیک است. بر این اساس در پژوهش حاضر ابتدا تصویر چندطیفی به فضای مؤلفه‌های اصلی تبدیل شد؛ سپس هیستوگرام تصویر پانکروماتیک با هیستوگرام مؤلفه اول منطبق شد تا کمترین اعوجاج طیفی پس از ترکیب تصاویر حاصل شود؛ سپس این مؤلفه با تصویر پانکروماتیک جایگزین و با تصاویر چندطیفی ترکیب شد. در پایان معکوس تبدیل مؤلفه‌های اصلی انجام شد و داده‌ها به فضای ابتدایی بازگشت.

ترکیب تصاویر بر پایه تبدیل موجک، یکی دیگر از روش‌های ترکیب تصاویر است که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، تبدیل موجک به روش جابه‌جا کردن جزئی ضرایب موجک انجام گرفت (علیمحمدی و همکاران، ۱۳۸۷). در این روش، تبدیل موجک تنها روی یکی از داده‌های ورودی انجام می‌گیرد. تبدیل موجک روی تصویر پانکروماتیک اعمال شد. با اعمال این تبدیل روی تصویر پانکروماتیک، ضرایب موجک این تصویر با باندهای تصویر چندطیفی جایگزین شد (شکل ۳). در این راستا، ابتدا تصویر پانکروماتیک با استفاده از تبدیل موجک، به یک تصویر تقریبی و سه ضریب جزئی فرکانس بالا - پایین<sup>۱</sup>، فرکانس بالا - بالا<sup>۲</sup> و فرکانس پایین - بالا<sup>۳</sup> تجزیه شد. در مرحله بعد، هریک از تصاویر چندطیفی جایگزین تصویر تقریبی حاصل از اعمال تبدیل موجک بر روی تصویر پانکروماتیک شد. در پایان، تبدیل معکوس موجک بر روی هریک از تصاویر اعمال شد.

ترکیب تصاویر بر پایه تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک، سومین روش ترکیب تصاویر بود که در پژوهش حاضر استفاده شد (صمدزادگان و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۳). در این روش، ابتدا تصویر پانکروماتیک اسپات-۵ با استفاده از تبدیل موجک به تصاویر تقریبی و سه ضریب موجک تجزیه شد، سپس مؤلفه اصلی اول حاصل از تصاویر چندطیفی اسپات-۵ به جای تصویر تقریبی (جزئیات مکانی کم) جایگزین شده و با استفاده از تبدیل معکوس موجک تصویری جدید حاصل از ترکیب ضرایب موجک تصویر پانکروماتیک و مؤلفه اصلی اول به دست می‌آید. در پایان، تصویر حاصل از این مرحله، به عنوان اولین مؤلفه اصلی به همراه دیگر مؤلفه‌های اصلی با اعمال تبدیل معکوس تحلیل مؤلفه‌های اصلی به منظور تولید تصویر حاصل از ترکیب به کار رفت.



شکل ۳. روند انجام ترکیب تصاویر با استفاده از روش جابه‌جا کردن جزئی ضرایب موجک، تصویر H نشان‌دهنده تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و تصویر M تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین (تسنگ و چن، ۲۰۰۱)

- 1- High-Low frequency (HL)
- 2- High-High frequency (HH)
- 3- Low-High frequency (LH)

به منظور برآزش مدل‌های تخمین سن و ارتفاع درختان، لازم است تا اطلاعاتی از قبیل اطلاعات طیفی و بافتی از تصاویر استخراج شود تا با برقراری رابطه میان این اطلاعات و هریک از پارامترهای ساختاری، مدل مربوطه به دست آید. در این پژوهش، از تکنیک‌های پردازشی مختلف از قبیل استفاده از شاخص‌های گیاهی، تبدیل مؤلفه‌های اصلی، به منظور استخراج اطلاعات طیفی و استفاده از آن‌ها در کنار باندهای انعکاسی استفاده شد؛ همچنین برای استخراج اطلاعات بافتی، از ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری<sup>۱</sup> در اندازه پنجره‌های مختلف  $3 \times 3$ ،  $5 \times 5$ ،  $7 \times 7$  و  $9 \times 9$  و در زاویه‌های مختلف ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه، بر روی هریک از باندهای تصاویر حاصل از ترکیب تصاویر و تصویر پانکروماتیک استفاده شد و پارامترهایی چون واریانس، کنتراست، همگنی<sup>۲</sup>، انترپوی، همبستگی، زاویه دوم لحظه‌ای<sup>۳</sup>، میانگین، انحراف معیار و عدم تجانس<sup>۴</sup> از این تصاویر استخراج شد. به منظور بررسی روابط رگرسیونی بین ویژگی‌های طیفی و بافتی تصاویر و میانگین سن و ارتفاع توده‌های درختان، میانگین ارزش‌های رقومی پیکسل‌های متناظر با هر قطعه از تمامی باندها، شاخص‌های گیاهی، مؤلفه‌های اصلی و تصاویر حاصل از فیلتر بافتی ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری محاسبه شد.

با توجه به تعداد زیاد ویژگی‌های طیفی و بافتی استخراج شده از تصاویر مربوطه و وجود هم‌خطی<sup>۵</sup> بین برخی از این ویژگی‌ها و همچنین جلوگیری از بیش‌برآزش<sup>۶</sup> مدل‌های رگرسیونی، حذف تعدادی از ویژگی‌ها برای انجام مدل‌سازی لازم است. بدین منظور، از روش انتخاب ویژگی‌ها براساس جنگل تصادفی<sup>۷</sup> استفاده شد (شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۳ ب). در پایان این مرحله، تعداد زیادی از ویژگی‌های طیفی و بافتی حذف شد. پس از استخراج اطلاعات طیفی و بافتی از هریک از تصاویر، از روش رگرسیون خطی چندمتغیره به منظور تعیین رابطه بین این اطلاعات و داده‌های سن و ارتفاع درختان استفاده شد. در این مطالعه، سن و ارتفاع درختان به‌عنوان متغیرهای وابسته و ویژگی‌های طیفی و بافتی استخراج شده از تصاویر ترکیب شده، به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. به منظور اعتبارسنجی نتایج هریک از مدل‌سازی‌ها، ۳۰٪ قطعات شامل ۹۳ قطعه به‌صورت تصادفی انتخاب و در فرایند مدل‌سازی شرکت داده نشدند و به‌عنوان داده‌های آزمایشی برای اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی در نظر گرفته شدند و بقیه قطعات شامل ۳۱۰ قطعه، به منظور مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. برای ارزیابی اعتبار تخمین هریک از مدل‌های رگرسیونی به‌دست آمده، از معیارهای ضریب تعیین و مجذور میانگین مربعات خطا استفاده شد تا عملکرد مدل‌های رگرسیونی به‌دست آمده روی داده‌های آزمایشی مورد ارزیابی قرار گیرد.

## نتایج

در این مطالعه، عملکرد داده‌های طیفی و بافتی مستخرج از تصاویر ترکیب شده حاصل از روش‌های مختلف ترکیب تصاویر به منظور بهبود تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر ضریب تعیین و مجذور میانگین مربعات خطا حاصل از مدل رگرسیونی چندمتغیره خطی بین داده‌های طیفی مستخرج از تصاویر ترکیب شده با استفاده از روش‌های مختلف ترکیب تصاویر و داده‌های میانگین سن و ارتفاع درختان تعیین شد (جدول ۴). به منظور انجام مقایسه آماری عملکرد مدل‌های به‌دست آمده، از آزمون تی نمونه‌های جفت شده<sup>۸</sup> استفاده

1- Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM)

2- Homogeneity

3- Angular Second Moment

4- Dissimilarity

5- Multicollinearity

6- Overfitting

7- Random Forest Feature Selection

8- Pair Samples t-test

شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و همچنین نتایج حاصل از آزمون آماری تی نمونه‌های جفت‌شده (نتایج آزمون تی در این مقاله آورده نشده)، مدل‌های حاصل از داده‌های طیفی روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک نسبت به دو روش دیگر به‌صورت معنی‌داری دارای صحت بالاتری هستند (جدول ۴).

مقادیر ضریب تعیین و مجذور میانگین مربعات خطا حاصل از مدل رگرسیونی چندمتغیره خطی بین مدل‌های حاصل از داده‌های بافتی تصاویر به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف ترکیب تصاویر در سطح پیکسل و داده‌های میانگین سن و ارتفاع درختان را نشان می‌دهد (جدول ۵). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و همچنین نتایج آزمون تی نمونه‌های جفت‌شده (در مقاله آورده نشده) هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری بین عملکرد مدل‌های حاصل از داده‌های بافتی تصاویر به‌دست‌آمده از روش‌های ترکیب تصاویر وجود ندارد (جدول ۵). در ادامه داده‌های طیفی و بافتی حاصل از تصاویر ترکیب‌شده، در کنار هم به‌منظور مدل‌سازی سن و ارتفاع درختان مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۶) و عملکرد این مدل‌ها با استفاده از آزمون تی نمونه‌های جفت‌شده مورد مقایسه آماری قرار گرفت (جدول ۷). براساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر، مدل‌های حاصل از داده‌های مستخرج از تصاویر ترکیب‌شده با روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک، بهترین عملکرد را در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان دارد (جدول ۶ و ۷).

جدول ۴. نتایج عملکرد مدل‌های حاصل از اطلاعات طیفی تصاویر ترکیب‌شده

پارامترهای ساختاری	ترکیب تصاویر	مجذور میانگین مربعات خطا	ضریب تعیین	خطای تخمین (%)
میانگین سن (سال)	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	۴/۱۴	۰/۵۰	٪۲۰
	تبدیل موجک	۳/۸۵	۰/۶۳	٪۱۹
	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک	۳/۵	۰/۶۶	٪۱۷
میانگین ارتفاع (متر)	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	۳/۵	۰/۶۶	٪۱۵
	تبدیل موجک	۳/۲۲	۰/۶۹	٪۱۴
	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک	۳	۰/۷	٪۱۳

جدول ۵. نتایج عملکرد مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی تصاویر ترکیب‌شده

پارامترهای ساختاری	ترکیب تصاویر	مجذور میانگین مربعات خطا	ضریب تعیین	خطای تخمین (%)
میانگین سن (سال)	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	۳/۳۷	۰/۵۲	٪۱۶
	تبدیل موجک	۳/۷	۰/۶۳	٪۱۸
	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک	۳/۸	۰/۶۳	٪۱۸
میانگین ارتفاع (متر)	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	۳/۱۱	۰/۶۵	٪۱۳
	تبدیل موجک	۳	۰/۶۷	٪۱۳
	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک	۳	۰/۶۷	٪۱۳

جدول ۶. نتایج عملکرد مدل‌های حاصل از اطلاعات طیفی و بافتی تصاویر ترکیب‌شده

پارامترهای ساختاری	ترکیب تصاویر	مجذور میانگین مربعات خطا	ضریب تعیین	خطای تخمین (%)
میانگین سن (سال)	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	۳/۸۸	۰/۶۱	٪۱۹
	تبدیل موجک	۳/۵	۰/۶۵	٪۱۷
	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک	۳/۳	۰/۷۲	٪۱۶
میانگین ارتفاع (متر)	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	۳	۰/۶۷	٪۱۳
	تبدیل موجک	۳/۲۶	۰/۶۲	٪۱۴
	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک	۲/۷	۰/۷۴	٪۱۱

با توجه به نتایج ارائه شده، روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک نسبت به دو روش دیگر ترکیب تصاویر مورد استفاده در این مطالعه به‌طور معنی‌داری دقت بالاتری در بهبود تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان دارد (جدول ۷). پس از مقایسه عملکرد مدل‌های حاصل از تصاویر چندطیفی ترکیب‌شده با استفاده از روش‌های مختلف ترکیب تصاویر، لازم بود تا عملکرد این مدل‌ها، با مدل‌هایی که از اطلاعات بافتی مستخرج از تصاویر پانکروماتیک به‌دست آمده بود نیز مقایسه شوند. با مقایسه نتایج عملکرد مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی تصاویر ترکیب‌شده (جدول ۵) و نتایج مدل رگرسیونی به‌دست‌آمده از داده‌های بافتی تصویر پانکروماتیک اسپات-۵ برای تخمین میانگین سن و ارتفاع توده‌های درختی (جدول ۸)، می‌توان دریافت که اطلاعات بافتی مستخرج از تصاویر حاصل از ترکیب در سطح پیکسل نسبت به اطلاعات بافتی تصویر پانکروماتیک دارای دقت بالاتری است.

جدول ۷. مقادیر پی-مقدار<sup>۱</sup> حاصل از آزمون تی نمونه‌های جفت‌شده مقایسه عملکرد مدل‌های حاصل از اطلاعات طیفی و بافتی

تصاویر ترکیب‌شده

پارامترهای ساختاری	روش ترکیب تصاویر	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	تبدیل موجک	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک
میانگین سن (سال)	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	-----	۰/۳۷	۰/۰۰۴۶
	تبدیل موجک	۰/۳۷	-----	۰/۱۱
	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک	۰/۰۰۴۶	۰/۱۱	-----
میانگین ارتفاع (متر)	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	-----	۰/۳۴	۰/۰۴۲
	تبدیل موجک	۰/۳۴	-----	۰/۰۱۱
	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک	۰/۰۴۲	۰/۰۱۱	-----

نکته: آزمون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ صورت گرفت.

جدول ۸. نتایج مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی تصویر پانکروماتیک

پارامترهای ساختاری	ضریب تعیین	مجدور میانگین مربعات خطا	خطای تخمین (%)	ویژگی‌ها	$\beta$	خطای استاندارد $\beta$
میانگین سن (سال)	۰/۴۷	۴/۳	٪۲۱	میانگین (۳/۰)	-۲/۰۷۴	۰/۴۴
				همبستگی (۵/۱۳۵)	-۱۴۹/۳۳۹	۶۷/۷۲۴
				همبستگی (۵/۹۰)	-۱۱۷/۶۸۸	۷۵/۷۳
				همبستگی (۷/۱۳۵)	۳۴۹/۵۲۵	۱۳۹/۰۷۸
				همبستگی (۷/۹۰)	۲۹۹/۲۲	۱۵۸/۸۱
				همبستگی (۹/۱۳۵)	-۱۷۳/۳۵	۸۲/۴۶۳
				همبستگی (۷/۰)	-۸۵/۶۱۲	۱۲/۹۵۵
				همبستگی (۹/۹۰)	-۱۹۲/۶۱	۱۰۰/۳۴۶
میانگین ارتفاع (متر)	۰/۴۳	۳/۸	٪۱۷	همبستگی (۳/۹۰)	-۱۸/۷۵۵	۲۵/۴۴۹
				همبستگی (۵/۱۳۵)	-۱۲۸/۹۱۵	۶۱/۳۸۳
				همبستگی (۵/۹۰)	-۴۶/۶۷۴	۹۳/۴۷۲
				همبستگی (۵/۰)	-۳۸/۹۳۳	۹/۵۷
				همبستگی (۷/۱۳۵)	۲۷۲/۰۶۲	۱۲۵/۰۱۳
				همبستگی (۷/۹۰)	۲۵۴/۶۷	۱۵۵/۳۱۱
				همبستگی (۹/۱۳۵)	-۱۱۶/۵۷۵	۷۳/۶۹
				همبستگی (۹/۹۰)	-۱۹۲/۵۹	۹۱/۹۴۳

نکته: اعداد داخل پرانتز به ترتیب نشان‌دهنده زاویه و اندازه پنجره در فیلتر بافتی ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری است.

به‌منظور مقایسه عملکرد داده‌های بافتی مستخرج از تصاویر ترکیب‌شده حاصل از هریک از روش‌های ترکیب تصاویر و داده‌های بافتی تصویر پانکروماتیک از آزمون تی نمونه‌های جفت‌شده استفاده شد (جدول ۹). براساس نتایج حاصل از آزمون تی نمونه‌های جفت‌شده، مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی مستخرج از تصاویر ترکیب‌شده با استفاده از روش‌های مختلف ترکیب تصاویر، از نظر آماری نسبت به مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی تصویر پانکروماتیک، به‌طور معنی‌داری عملکرد بهتری در تخمین میانگین سن و ارتفاع توده‌های درختی دارند.

### بحث

در پژوهش حاضر عملکرد روش‌های مختلف ترکیب تصاویر در سطح پیکسل به‌منظور بهبود تخمین میانگین سن و ارتفاع توده‌های درختان کاج مونتری مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش سه روش ترکیب تصاویر در سطح پیکسل شامل روش تبدیل موجک، تبدیل مؤلفه‌های اصلی و تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک استفاده شد. با توجه به نتایج ارائه‌شده، مدل‌های حاصل از اطلاعات طیفی و بافتی تصاویر حاصل از روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک نسبت به سایر مدل‌ها صحت بالاتری در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان دارند. دلیل عملکرد بهتر مدل‌های حاصل از اطلاعات طیفی و بافتی تصاویر حاصل از روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک نسبت به سایر مدل‌ها آن است که در این روش، افزون بر بهبود دقت مکانی تصاویر چندطیفی، اطلاعات طیفی این تصاویر کمتر تغییر می‌کند. در روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک با توجه به اینکه مؤلفه اصلی اول با تصویر تقریبی حاصل از اعمال تبدیل موجک بر روی تصویر پانکروماتیک جایگزین می‌شود، سبب حفظ اطلاعات طیفی بیشتری و به حداقل رسیدن اعوجاجات طیفی می‌شود؛ به‌عبارت دیگر، در روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک، اطلاعات طیفی تصاویر اولیه بیشتر حفظ می‌شود (تسنگ و چن، ۲۰۰۱). این نتیجه اگرچه در زمینه مطالعات جنگل جدید است، ولی در مطالعات دیگر به پایین بودن اعوجاجات طیفی و هندسی در تصاویری که با این روش ترکیب شده‌اند اشاره شده است (شمس‌الدینی، ۱۳۸۵؛ گونزالس-اودیکانا و همکاران، ۲۰۰۴؛ تسنگ و چن، ۲۰۰۱).

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته در زمینه ارزیابی تصاویر حاصل از روش‌های مختلف ترکیب تصاویر با استفاده از شاخص‌های متفاوت، روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک، از جمله روش‌های دقیق در زمینه حفظ اطلاعات طیفی و مکانی تصاویر اصلی است (تسنگ و همکاران، ۲۰۰۱؛ یوهندرا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲)؛ همچنین دقت پایین اطلاعات طیفی حاصل از روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی نسبت به دو روش دیگر در این مطالعه می‌تواند به این دلیل باشد که اولین مؤلفه اصلی افزون بر اطلاعات مکانی، حاوی مقادیری اطلاعات طیفی نیز هست و پس از این، جایگزین کردن آن با تصویر پانکروماتیک موجب از دست رفتن مقداری از اطلاعات طیفی در تصویر حاصل از ترکیب می‌شود.

جدول ۹. پی-مقدار حاصل از آزمون تی نمونه‌های جفت‌شده به‌منظور مقایسه عملکرد مدل‌های اطلاعات بافتی حاصل از روش‌های

ترکیب تصاویر در سطح پیکسل و اطلاعات بافتی تصویر پانکروماتیک

میانگین ارتفاع (متر)	میانگین سن (سال)	مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی
تصویر پانکروماتیک	تصویر پانکروماتیک	تبدیل مؤلفه‌های اصلی
۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۹۸	تبدیل موجک
۰/۰۰۴۳	۰/۰۱۱۳	تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک
۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۴۱	

نکته: آزمون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ صورت گرفت.

همین مسئله به ایجاد اعوجاجات طیفی در تصاویر حاصل از ترکیب با روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی منجر می‌شود (صمدزادگان و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۰) و به دنبال آن، مدل‌های حاصل از اطلاعات طیفی و بافتی از این تصاویر نمی‌توانند عملکرد خوبی در زمینه تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان داشته باشند. براساس نتایج حاصل از این پژوهش، مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی مستخرج از تصاویر چندطیفی ترکیب‌شده، در مقایسه با مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی تصویر پانکروماتیک، دارای صحت بالاتری هستند. دلیل این امر، استفاده از تصاویر چندطیفی با قدرت تفکیک مکانی بهبود یافته (۲/۵ متر) برای استخراج اطلاعات بافت است؛ زیرا نوع داده‌های طیفی که ویژگی‌های بافتی از آن‌ها استخراج می‌شود، بر عملکرد شاخص‌های بافتی ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری تأثیرگذار است (کای‌ایتاکیر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۶؛ شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۳ الف). تصاویر پانکروماتیک به‌طور معمول، به علت پهنای طیفی بزرگ، اطلاعات طیفی مفیدی ندارند، این در حالی است که تصاویر طیفی (۲/۵ متر) حاصل از ترکیب تصاویر، افزون بر اطلاعات ساختاری، اطلاعات طیفی را نیز شامل می‌شوند (شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۳ الف).

میزان خطای قابل قبول در آماربرداری جنگل‌ها به‌منظور تخمین پارامترهای ساختاری، بین ۱۵٪ تا ۲۰٪ است (هولمگرن و تارسون، ۱۹۹۸). در تمامی نتایج این پژوهش، درصد خطای تخمین سن و ارتفاع درختان کمتر از ۲۰٪ بود. در این میان، میانگین ارتفاع درختان با دقت بهتری (با درصد خطای ۱۱٪) نسبت به میانگین سن درختان (درصد خطای ۱۶٪) تخمین زده شد. در مطالعات گذشته نیز صحت بالای تخمین ارتفاع درختان نسبت به سایر پارامترهای ساختاری جنگل گزارش شده است (هیپا<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۰؛ شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۳ الف؛ کای‌ایتاکیر و همکاران، ۲۰۰۶، دوب<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). وجود تنها یک گونه کاج در منطقه مورد مطالعه، منجر به کاهش پیچیدگی حاصل از بازتابش‌های درختان می‌شود. این مسئله، موجب شد تا با سهولت بیشتری امکان مقایسه روش‌های مختلف در پژوهش حاضر فراهم شود. اگرچه نتایج حاصل از این تحقیق به‌منظور برآورد میانگین سن و ارتفاع درختان قابل قبول است، ولی باید به این نکته توجه شود که تعمیم‌پذیری این نتایج به جنگل‌های طبیعی با گونه‌های درختی په‌برگ امکان‌پذیر نبوده و ممکن است که نتایج در این نواحی تا حدود زیادی با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر متفاوت باشد. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شامل جنگل دست‌کاشت کاج بود که تنوع گونه‌ای ندارد. لذا تخمین پارامترهای ساختاری در چنین شرایطی با صحت بالاتری همراه است. این در حالی است که در جنگل‌های طبیعی، به‌دلیل تنوع گونه‌ای بالا و نیز وجود درختانی با سنین بسیار زیاد، می‌تواند نتایج تخمین پارامترهای ساختاری را تا حدود زیادی تحت تأثیر قرار دهد.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر عملکرد سه روش ترکیب تصاویر در سطح پیکسل به‌منظور بهبود تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان کاج مونتری مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج این پژوهش، مدل‌های حاصل از اطلاعات بافتی و طیفی تصاویر ترکیب‌شده با روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی مبتنی بر تبدیل موجک عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان داشتند؛ همچنین، مدل‌های حاصل از داده‌های طیفی تصاویر ترکیب‌شده حاصل از روش تبدیل مؤلفه‌های اصلی، نسبت به داده‌های طیفی تصاویر ترکیب‌شده حاصل از دو روش دیگر در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان، دقت پایین‌تری داشتند. اگرچه بین مدل‌های حاصل از داده‌های

1- Kayitakire

2- Hyyppä

3- Dube

بافتی تصاویر ترکیب‌شده با استفاده از روش‌های مختلف ترکیب تصاویر در سطح پیکسل هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، ولی مشخص شد که اطلاعات بافتی حاصل از روش‌های ترکیب تصاویر در سطح پیکسل، نسبت به اطلاعات بافتی تصویر پانکروماتیک، می‌تواند تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان را بهبود دهد. با مقایسه خطای تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان، میانگین ارتفاع با صحت بهتری نسبت به میانگین سن تخمین زده شد.

## منابع

شمس‌الدینی، علی (۱۳۸۵). *ارزیابی تأثیر اختلاف قدرت تفکیک مکانی تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی بر کیفیت تصاویر ترکیب‌شده*. استاد راهنما: علیمحمدی، عباس، مقطع کارشناسی‌ارشد، رشته سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس.

صمدزادگان، فرهاد؛ طبیب محمودی، فاطمه؛ بیگدلی، بهناز (۱۳۹۴). *اندغام داده‌ها در سنجش‌ازدور مفاهیم و روش‌ها*. چاپ دوم. تهران: دانشگاه تهران.

علیمحمدی، عباس؛ شمس‌الدینی، علی؛ ضیائیان فیروزآبادی، پرویز (۱۳۸۷). *مقایسه عملکرد طیفی و مکانی روش‌های ترکیب تصاویر در اختلاف قدرت تفکیک‌های مختلف تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک: تهران. برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۱۲ (۵۷)، ۱۱۹-۱۳۷*.

## References

- Amolins, K., Zhang, Y., Dare, P. (2007). Wavelet Based Image Fusion Techniques—an Introduction, Review and Comparison. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62 (4), 249-263.
- Clark, B., Suomalainen, J., Pellikka, P. (2010). A Comparison of Methods for the Retrieval of Surface Reflectance Factor from Multitemporal SPOT HRV, HRVIR, and HRG Multispectral Satellite Imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36 (4), 397-411.
- Dube, T., Mutanga, O., Abdel-Rahman, E. M., Ismail, R., Slotow, R. (2015). Predicting Eucalyptus spp. Stand Volume in Zululand, South Africa: an Analysis Using a Stochastic Gradient Boosting Regression Ensemble with Multi-Source Data Sets. *International Journal of Remote Sensing*, 36 (14), 3751-3772.
- Gates, D. M. (1990). Climate Change and the Response of Forests. *International Journal of Remote Sensing*, 11 (7), 1095-1107.
- González-Audicana, M., Saleta, J. L., Catalán, R. G., García, R. (2004). Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Using Improved IHS and PCA Mergers Based on Wavelet Decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42 (6), 1291-1299.
- Holmgren, P., Thureson, T. (1998). Satellite Remote Sensing for Forestry Planning—a Review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 13 (1-4), 90-110.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S., Zhu, Y. H. (2000). Accuracy Comparison of Various Remote Sensing Data Sources in the Retrieval of Forest Stand Attributes. *Forest Ecology and Management*, 128 (1), 109-120.
- Kayitakire, F., Hamel, C., Defourny, P. (2006). Retrieving Forest Structure Variables Based on Image Texture Analysis and IKONOS-2 Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 102 (3), 390-401.
- Liu, W. Y., He, G. J. (2008). Comparison of Fusion Algorithms for ALOS Panchromatic and Multi-Spectral Images. *IEEE Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 4, 503-509.
- Metwalli, M. R., Nasr, A. H., Allah, O. S. F., El-Rabaie, S. (2009). Image Fusion Based on Principal Component Analysis and High-Pass Filter. *IEEE International Conference on Computer Engineering & Systems*, 63-70.
- Ozdemir, I. (2008). Estimating Stem Volume by Tree Crown Area and Tree Shadow Area Extracted

- from Pan-Sharpended Quickbird Imagery in Open Crimean Juniper Forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (19), 5643-5655.
- Pohl, C., Van Genderen, J. L. (1998). Review Article Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications. *International journal of remote sensing*, 19 (5), 823-854.
- Schowengerdt, R. A. (2006). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Academic press, Sandiego.
- Shamsoddini, A., Trinder, J. C., Turner, R. (2013 A). Pine Plantation Structure Mapping Using WorldView-2 Multispectral Image. *International Journal of Remote Sensing*, 34 (11), 3986-4007.
- Shamsoddini, A., Trinder, J. C., Turner, R. (2013 B). Non-Linear Methods for Inferring Lidar Metrics Using SPOT-5 Textural Data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/w2, 259-264.
- Tseng, D. C., Chen, Y. L., Liu, M. S. C. (2001). Wavelet-Based Multispectral Image Fusion. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4, 1956-1958.
- Vermote, E. F., Tanre, D., Deuze, J. L., Herman, M., Morcette, J. J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35 (3), 675-686.
- Wulder, M. (1998). Optical Remote-Sensing Techniques for the Assessment of Forest Inventory and Biophysical Parameters. *Progress in Physical Geography*, 22 (4), 449-476.
- Wunderle, A. L., Franklin, S. E., Guo, X. (2009). Age Class Estimation of Western Red Cedar Using SPOT-5 Pan-Sharpended Imagery in British Columbia, Canada. *Geocarto International*, 24 (1), 47-63.
- Yang, S., Wang, M., Jiao, L. (2012). Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Based on Support Value Transform and Adaptive Principal Component Analysis. *Information Fusion*, 13 (3), 177-184.
- Yuhendra, Alimuddin, I., Sumantyo, J. T. S., Kuze, H. (2012). Assessment of Pan-Sharpending Methods Applied to Image Fusion of Remotely Sensed Multi-Band Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 165-175.
- Zhang, B. (2010). Study on Image Fusion Based on Different Fusion Rules of Wavelet Transform. *IEEE 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, 3, 649-653.



