

# ترکیب داده‌های بافتی و طیفی مستخرج از تصاویر اسپات-۵ به منظور برآورد میانگین سن و ارتفاع درختان

سعید میرانزاده مهابادی<sup>۱</sup>، علی شمس الدینی<sup>۲\*</sup>، علی جعفر موسیوند<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی - دانشکده علوم انسانی - دانشگاه تربیت مدرس  
saeedmirezadeh@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده علوم انسانی - دانشگاه تربیت مدرس  
{ali.shamsoddini, a.mousivand}@modares.ac.ir

(تاریخ دریافت فروردین ۱۳۹۷، تاریخ تصویب اسفند ۱۳۹۷)

## چکیده

اندازه‌گیری و برآورد پارامترهای ساختاری جنگل‌ها با دقتی مناسب می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مربوط به محافظت از جنگل‌ها و مدیریت پایدار آن‌ها در سطح محلی و جهانی کمک شایان توجهی نماید. با کمی کردن این پارامترها می‌توان حجم چوب تولیدی و ارزش اقتصادی جنگل‌ها را برآورد کرد. میانگین سن و ارتفاع درختان از جمله پارامترهایی هستند که در ارزیابی قابلیت تولید و حجم چوب در جنگل‌های دست کاشت بسیار حائز اهمیت می‌باشند. هدف از این تحقیق، استفاده از اطلاعات طیفی و بافتی و همچنین ترکیب آن‌ها در سطح ویژگی به منظور تخمین پارامترهایی چون میانگین سن و ارتفاع توده‌های درختان سوزنی‌برگ *Pinus radiata* می‌باشد. در این تحقیق از تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک اسپات-۵<sup>۱</sup> به منظور استخراج اطلاعات طیفی و بافتی استفاده گردید. اطلاعات طیفی شامل شاخص‌های گیاهی و تبدیل مؤلفه‌های اصلی و ضرایب انعکاس و برای استخراج اطلاعات بافتی تصویر پانکروماتیک، از ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری در چهار اندازه پنجره و چهار زاویه مختلف استفاده شد. در این تحقیق از رگرسیون چند متغیره برای مدل‌سازی روابط بین پارامترهای ساختاری (میانگین سن و ارتفاع) که از طریق نمونه‌گیری میدانی اندازه‌گیری شده و متغیرهای طیفی و بافتی استخراج شده از تصاویر استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که اطلاعات طیفی مستخرج از تصاویر چند طیفی اسپات-۵ و اطلاعات بافتی مستخرج از تصویر پانکروماتیک این ماهواره، در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان عملکرد مشابهی دارند. همچنین نتایج ترکیب داده‌های طیفی و بافتی نشان داد که نسبت گیری داده‌های طیفی و بافتی، بهترین مدل را در تخمین میانگین سن با درصد خطای ۱۷٪ و میانگین ارتفاع درختان با درصد خطای ۱۳٪ نسبت به سایر ورودی‌ها ارائه می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** تصاویر اپتیک، داده‌های طیفی، داده‌های بافتی، ترکیب داده‌ها، پارامترهای ساختاری

\* نویسنده رابط

<sup>۱</sup> SPOT-5

## ۱- مقدمه

مطالعه ساختار جنگل‌ها از طریق اندازه‌گیری و برآورد مشخصه‌های ساختاری<sup>۱</sup> این اکوسیستم‌ها به تصمیم‌گیری‌های مربوط به محافظت از جنگل‌ها و مدیریت پایدار آن‌ها کمک شایان توجهی می‌کند [۱]. هرگونه برنامه‌ریزی به‌منظور مدیریت صحیح بر منابع این جنگل‌ها، نیازمند اطلاعات صحیح و به‌هنگام از مشخصه‌های کمی و پارامترهای ساختاری این جنگل‌ها می‌باشد. با کمی کردن این پارامترها می‌توان حجم چوب تولیدی و ارزش اقتصادی جنگل‌ها را برآورد کرد. معمولاً اطلاعات مرتبط با این پارامترها از طریق عملیات میدانی انجام می‌شود. اما این روش‌های جمع‌آوری اطلاعات در سطح وسیع کاری بسیار دشوار و مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد است. لذا جمع‌آوری داده‌های زمینی مرتبط با ساختار جنگل‌ها با فواصل زمانی طولانی انجام‌گرفته و اطلاعات به‌هنگامی در دسترس مدیران جنگل‌ها به‌لحاظ برنامه‌ریزی سالیانه و حجم سرپا وجود ندارد [۲]. ازاین‌رو به‌کارگیری ابزارها و روش‌های جایگزین نظیر استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور در دستور کار مدیران قرار دارد تا در تلفیق با اندازه‌گیری‌های زمینی بتواند اطلاعات مربوط به ارزش اقتصادی جنگل و میزان موجودی سرپا جنگل را برآورد کنند. داده‌های سنجش از دور اپتیک منبع قابل اعتمادی از اطلاعات جهت ارزیابی خصوصیات جنگلی در منطقه‌ای وسیع می‌باشند [۳]. هزینه نسبتاً کم و دسترسی آسان به این داده‌ها و همچنین موجود بودن این داده‌ها در دامنه وسیعی از قدرت تفکیک مکانی و طیفی باعث افزایش پتانسیل آن‌ها برای تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها با استفاده از انواع اطلاعات مختلف مثل ضریب انعکاس، اطلاعات طیفی و شاخص‌های بافتی می‌شود [۴].

سنجش از دور چند طیفی به‌طور گسترده به‌منظور تخمین و کلاسه‌بندی پارامترهای ساختاری جنگل‌ها؛ همچون حجم سرپا [۵، ۴، ۶]، حجم توده سبز<sup>۲</sup> [۷، ۸، ۹]، ارتفاع [۱۰، ۴، ۶] قطر برابر سینه<sup>۳</sup> [۱۱، ۴، ۶]، مساحت سطح مقطع<sup>۴</sup> [۱۱، ۴، ۵، ۶]، شاخص سطح برگ<sup>۵</sup> [۱۲] و سن

درختان [۱۳، ۱۴، ۱۰، ۱۵، ۱۶] مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده در مطالعات مختلف با توجه به نوع تصویر مورد استفاده، نوع گونه درختی و شرایط رویشگاهی مربوط به هر منطقه متفاوت می‌باشند. در زمینه استفاده از داده‌های اپتیک به‌منظور تخمین و کلاسه‌بندی پارامترهای ساختاری جنگل مطالعات زیادی در راستای استفاده از شاخص‌های گیاهی و باندهای طیفی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی [۴، ۵، ۲۰، ۱۰] و [۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۳، ۴، ۶] و اطلاعات بافتی [۴، ۵، ۲۰، ۱۰] و ترکیب آن‌ها [۱۳، ۲۲، ۱۱، ۲۳] انجام‌شده است. فرانکلین و همکاران در سال ۱۹۹۲ در طی مطالعه‌ای در منطقه‌ای جنگلی با گونه سوزنی‌برگ *Pinus contorta* در غرب کانادا دریافتند که بین ضریب انعکاس طیفی باند سبز و قرمز اسپات<sup>۱</sup> و سن و ارتفاع توده‌های درختان *Pinus contorta* رابطه معنی‌داری وجود دارد. کای ایتاکر<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۶ قابلیت تصویر پانکروماتیک یک متری آیکونوس<sup>۷</sup> را برای تخمین پارامترهایی چون سطح مقطع، سن، ارتفاع، محیط، تراکم مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه از ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری<sup>۸</sup> برای استخراج اطلاعات بافتی استفاده شد. برای ارزیابی رابطه بین این پارامترها و اطلاعات بافتی تصویر از رگرسیون گام‌به‌گام خطی چند متغیره استفاده گردید. نتایج نشان داد؛ داده‌های سن، با فیلتر همبستگی<sup>۹</sup> با اندازه پنجره ۱۵ × ۱۵ و زاویه ۴۵ درجه بالاترین همبستگی، ارتفاع با فیلتر همبستگی با اندازه ۱۵ × ۱۵ و جهت ۰ درجه، مساحت سطح مقطع، با فیلتر کنتراست<sup>۱۰</sup> با اندازه پنجره ۲۵ × ۲۵ و زاویه ۴۵ درجه و تراکم درختان، با فیلتر کنتراست با اندازه پنجره ۵ × ۵ و زاویه ۹۰ درجه بالاترین همبستگی را نشان می‌دهند. مطالعات انجام‌گرفته در راستای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها نشان می‌دهد ویژگی‌های طیفی استخراج‌شده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط نسبت به ویژگی‌های بافتی این تصاویر، در تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها دقت بالاتری دارند [۲۱، ۲۲]. همچنین نتایج این مطالعات نشان می‌دهد ویژگی‌های بافتی استخراج‌شده از تصاویر با قدرت تفکیک بالا نسبت به ویژگی‌های طیفی این تصاویر در تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها دقت بالاتری دارند

<sup>۱</sup> Kayitakire

<sup>۷</sup> Ikonos2

<sup>۸</sup> Gray-level Co-Occurrence Matrix (GLCM)

<sup>۹</sup> Correlation

<sup>۱۰</sup> Contrast

<sup>۱</sup> Structural Parameters

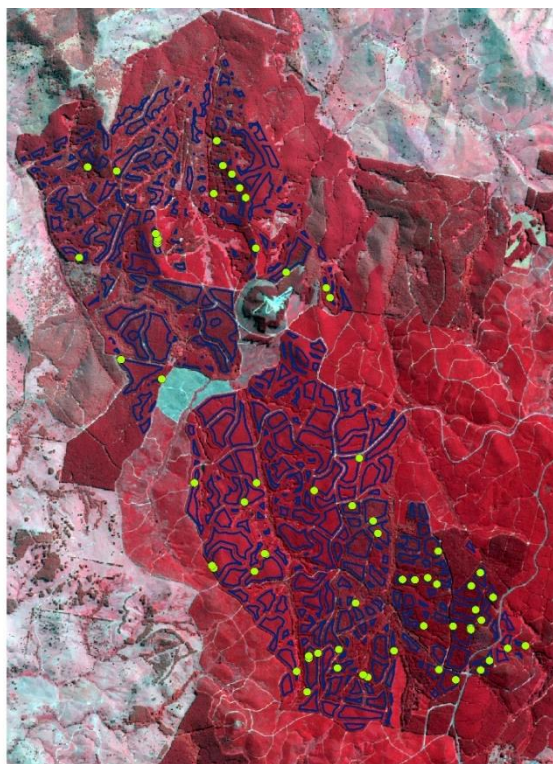
<sup>۲</sup> Biomas

<sup>۳</sup> Diameter at Breast Height (DBH)

<sup>۴</sup> Basel area

<sup>۵</sup> Leaf Area Index (LAI)

می‌باشد که در طول جغرافیایی ۱۴۷ درجه و ۵۸ دقیقه و ۴۸ ثانیه تا ۱۴۸ درجه و ۴ دقیقه و ۲ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه و ۵۸ ثانیه جنوبی قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه بخشی از جنگل‌های منطقه گرین هیلز<sup>۶</sup> در نزدیکی شهر بتلو<sup>۷</sup> در ایالت نیوساوت ولز<sup>۸</sup> استرالیا می‌باشد. میانگین ارتفاعی منطقه ۷۵۰ متر بالاتر از سطح دریا است.



شکل ۱- تصویر رنگی کاذب از ماهواره اسپات-۵ از منطقه جنگلی مورد مطالعه، نقاط سبز رنگ مراکز پلات‌ها و خطوط آبی رنگ، قطعات مربوط به توده‌های درختان سوزنی‌برگ *Pinus radiata* می‌باشد

### ۳- داده‌های پیمایشی

داده‌های پیمایشی مربوط به این مطالعه شامل ۶۱ پلات که به صورت تصادفی و با فاصله حداقل ۵۰ متر از عوارض انسانی نظیر جاده‌ها و ساختمان‌ها، در سپتامبر ۲۰۰۸ از منطقه مورد مطالعه برداشت گردید. پلات‌ها در سه کلاس شیب صفر تا ۱۰ درجه، ۱۰-۲۰ درجه و شیب بیش از ۲۰ درجه برداشت شد. همچنین این پلات‌ها دو کلاس سنی

[۴]. به عنوان مثال شمس الدینی و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که به منظور تخمین پارامترهای ساختاری جنگل کاج با استفاده از داده‌های وردیو-۲ استفاده از داده‌های بافتی نسبت به استفاده از ویژگی‌های طیفی، نتایج بهتری را ارائه می‌دهد [۴]. استفاده از اطلاعات بافتی در کنار اطلاعات طیفی به منظور تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها، یک روش کارا در زمینه مقایسه اطلاعات بافتی و طیفی تصاویر مختلف و همچنین ترکیب این اطلاعات می‌باشد. نیکول و سارکر در سال ۲۰۱۰ مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از اطلاعات بافتی و طیفی تصاویر اسپات-۵ و AVNIR-2 انجام دادند، نتایج نشان داد استفاده از اطلاعات بافتی در کنار اطلاعات طیفی دقت تخمین میزان توده سبز درختان را افزایش می‌دهد [۲۳]. در تمامی این تحقیقات، داده‌های طیفی در کنار داده‌های بافتی و بطور مستقیم و بدون تغییر در مدل سازی مورد استفاده قرار گرفتند. این درحالیست که شمس الدینی و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که ترکیب خصیصه‌های مستخرج از داده‌های اپتیک و لیدار قبل از استفاده در مدل و استفاده از نسبت بین خصیصه‌ها می‌تواند نتایج بهتری را نسبت به زمانیکه خصیصه‌ها به صورت مستقیم و بدون تغییر در مدلسازی استفاده می‌شوند، ارائه دهد [۲۴]. با توجه به این مسئله، اگرچه مطالعاتی بر روی ترکیب داده‌های طیفی و بافتی به منظور تخمین پارامترهای ساختاری جنگل انجام شده است، ولی به موضوع چگونگی ترکیب این داده‌ها با یکدیگر (استفاده مستقیم از خصیصه‌های طیفی و بافتی در کنار هم و یا استفاده از نسبت بین خصیصه‌های طیفی و بافتی) به منظور تخمین پارامترهای جنگل کمتر پرداخته شده است. لذا اهداف این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- مقایسه اطلاعات طیفی و بافتی استخراج شده از تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک اسپات-۵ به منظور تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان *Pinus radiata*
- بررسی قابلیت روشهای ترکیب داده‌های طیفی و بافتی به منظور افزایش دقت تخمین حاصل از مدل سازی میانگین سن و ارتفاع درختان

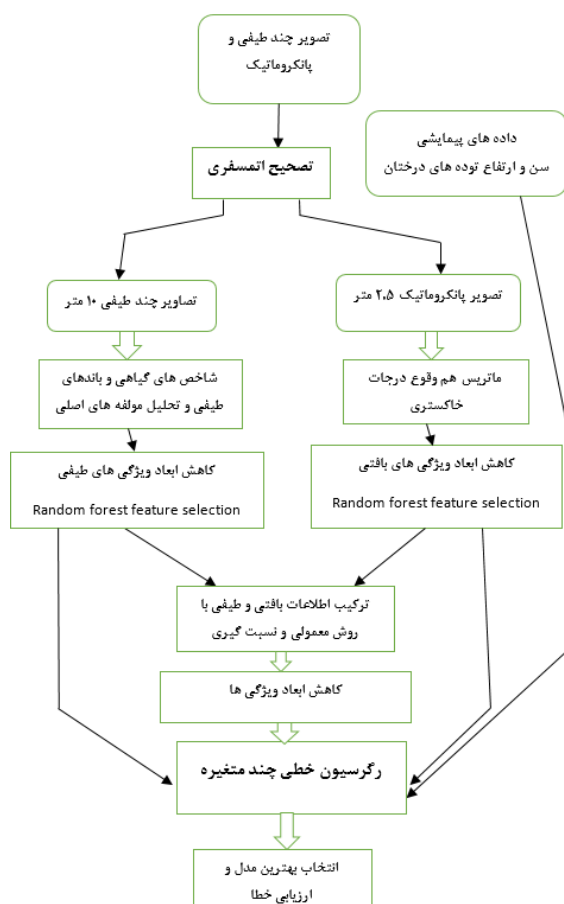
### ۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل ۵۰۰۰ هکتار اراضی تحت کشت درختان کاج (گونه *Pinus radiata*)

<sup>۶</sup> Green Hills

<sup>۷</sup> Batlow

<sup>۸</sup> New South Wales



شکل ۲- نمودار جریان تحقیق

#### ۴- داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های چند طیفی و پانکروماتیک مورد استفاده در این تحقیق مربوط به ماهواره اسپات-۵ و سنجنده HRG2 می‌باشد. زمان اخذ تصویر ۵ آوریل ۲۰۰۸ است. این سنجنده در باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر، باند مادون قرمز میانی با قدرت تفکیک ۲۰ متر (که به ۱۰ متر بازنویسی می‌شود) و باند پانکروماتیک با قدرت تفکیک ۲/۵ متر را برداشت می‌نماید. شکل ۲ نمودار جریانی این تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق با این نمودار در این تحقیق اطلاعات طیفی تصاویر چند طیفی اسپات-۵ با استفاده از روش‌هایی همچون شاخص‌های گیاهی، باندهای طیفی و تبدیل مولفه‌های اصلی استخراج گردید، همچنین از روش ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری به منظور استخراج اطلاعات بافتی تصویر پانکروماتیک استفاده گردید. به منظور مدل‌سازی رابطه بین اطلاعات طیفی و بافتی و داده‌های سن و ارتفاع درختان از روش رگرسیون خطی چند متغیره استفاده گردید.

۱۰-۲۰ سال و بیش از ۲۰ سال را شامل می‌شوند. طی عملیات زمینی، ارتفاع و قطر برابر سینه مربوط به ۹۷۸ درخت در قالب ۶۳ پلات اندازه‌گیری شد. موقعیت مراکز پلات‌ها و نیز هریک از درختان توسط تئودولیت لیزری و سیستم تعیین موقعیت جغرافیایی تفریقی<sup>۱</sup> تعیین گردید. با توجه به این‌که این منطقه، اراضی تحت کشت تجاری درختان *Pinus radiata* می‌باشد، زمان کاشت مربوط به درختان در هریک از پلات‌ها مشخص بود. با توجه به کم بودن تعداد پلات‌ها، این مطالعه در سطح توده‌های جنگلی انجام شد. یعنی از لایه پلی گونی مربوط به توده‌های جنگلی مربوط به درختان سوزنی‌برگ *Pinus radiata* استفاده گردید. با توجه به اینکه در مشخصات هر قطعه ارتفاع درختان لحاظ نشده بود از رابطه رگرسیونی حاصل از داده‌های ارتفاع و سن پلات‌ها به منظور تخمین ارتفاع قطعات مورد مطالعه استفاده شد. جدول ۱ دقت حاصل از رابطه رگرسیونی بین داده‌های سن و ارتفاع پلات‌ها را نشان می‌دهد. در مورد تخمین ارتفاع قطعات با مدل رگرسیونی ایجاد شده از داده‌های پلات‌ها، این نکته قابل‌ذکر می‌باشد که با توجه به اینکه داده‌های پلات‌ها عمدتاً برای سن‌های ۱۰-۳۰ سال و در برخی موارد سنین ۳۱ را نیز شامل می‌شدند، بدین منظور قطعاتی را که سن آن‌ها در این محدوده نبود حذف گردید، در پایان تعداد ۵۴۷ قطعه با محدوده سنی ۱۰-۳۰ سال باقی ماند از این تعداد ۲۶۹ قطعه با مساحت‌های کمتر از ۵ پیکسل (اندازه هر پیکسل ۱۰ × ۱۰ متر می‌باشد) حذف گردید و در کل ۲۷۸ قطعه به عنوان تعداد نهایی قطعات به منظور تخمین نهایی میانگین سن و ارتفاع در این منطقه مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۲ خلاصه اطلاعات آماری مربوط به قطعات مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مدل رگرسیونی و میزان خطا

| مدل رگرسیونی                  | RMSE | R <sup>2</sup> | (%RMSE) |
|-------------------------------|------|----------------|---------|
| ارتفاع = ۰/۸۴۳۱ × سن + ۵/۳۱۲۵ | ۲/۴۷ | ۰/۸۱           | ۱۱٪     |

جدول ۲- اطلاعات آماری مربوط به میانگین سن و ارتفاع توده‌های جنگلی

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

<sup>۱</sup> Differential Global Positioning System

## ۵- پیش پردازش و پردازش تصاویر

در این مطالعه، تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک، با روش DOS3<sup>۱</sup> انجام شد. این روش جز روش‌های ترکیبی به منظور کاهش اثرات ناخواسته اتمسفر در تصویر می‌باشد [۲۵]، در این روش‌ها، از اطلاعات تصویر و همچنین از اطلاعات اتمسفر منطقه همچون حجم بخار آب اتمسفر، حجم ازون و میزان آتروسول‌ها در فضای اتمسفر منطقه استفاده می‌شود [۲۵]. در این تحقیق از تکنیک‌های مختلفی به منظور استخراج اطلاعات طیفی و بافتی از تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک استفاده گردید. از جمله مهم‌ترین تکنیک‌های پردازشی به منظور استخراج اطلاعات طیفی در این تحقیق، استفاده از شاخص‌های گیاهی، تبدیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۲</sup> و باندهای انعکاسی می‌باشند. جدول ۳ در صفحه بعد لیست شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین برای استخراج اطلاعات بافتی<sup>۳</sup>، ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری در اندازه پنجره‌های مختلف  $3 \times 3$ ،  $5 \times 5$ ،  $7 \times 7$  و  $9 \times 9$  و در زاویه‌های مختلف  $135.90.45.0$  درجه، بر روی تصویر پانکروماتیک انجام شد و پارامترهایی چون واریانس<sup>۴</sup>، کنتراست<sup>۵</sup>، همگنی<sup>۶</sup>، انتروپی<sup>۷</sup>، همبستگی<sup>۸</sup>، زاویه دوم لحظه‌ای، میانگین<sup>۹</sup>، انحراف معیار<sup>۱۰</sup> و عدم تجانس<sup>۱۱</sup> از تصویر پانکروماتیک استخراج گردید [۱].

## ۶- استخراج ارزش‌های طیفی و بافتی

به منظور تحلیل همبستگی و بررسی روابط رگرسیونی بین تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهایی چون سن و ارتفاع، استخراج ارزش‌های طیفی و بافتی متناظر با هر قطعه در باندهای مختلف صورت گرفت. این عمل از طریق میانگین‌گیری ارزش‌های طیفی و بافتی پیکسل‌های واقع در محدوده هر قطعه از باندهای اصلی و تصاویر طیفی و بافتی، در محیط نرم‌افزار ARC MAP صورت گرفت. از جمله نکاتی

که باید در این مرحله در نظر گرفته شود این است که مقادیر عددی پیکسل‌های قرار گرفته در مرزهای قطعات، مربوط به عوارض کناری و داخلی قطعات می‌باشد، بدین منظور دخیل کردن این مقادیر در میانگین‌گیری برای هر قطعه باعث ایجاد خطا در ادامه کار می‌شود. به منظور عدم دخالت این پیکسل‌ها در میانگین‌گیری مربوط به هر قطعه، یک بافر ۵۰ متر در داخل هر قطعه زده شد تا مقادیر عددی پیکسل‌های هر قطعه هیچ‌گونه تداخلی با عوارض اطراف نداشته باشد [۳۸]. در پایان تعداد ۲۵ ویژگی طیفی و ۱۲۸ ویژگی بافتی از تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک استخراج گردید. با توجه به تعداد زیاد ویژگی‌های طیفی و بافتی استخراج‌شده از تصاویر مربوطه و وجود هم خطی<sup>۱۲</sup> بین بعضی ویژگی‌ها و همچنین جلوگیری از بیش برآزشی<sup>۱۳</sup> مدل‌های رگرسیونی، نیاز به حذف تعدادی از ویژگی‌ها و استفاده از ویژگی‌های مهم و مرتبط برای انجام مدل‌سازی بود. بدین منظور از روش انتخاب ویژگی براساس جنگل تصادفی<sup>۱۴</sup> استفاده شد [۳۸]. بدین منظور تمامی خصیصه‌ها شامل خصیصه‌های بافتی و طیفی با استفاده از روش جنگل تصادفی به منظور مدل‌سازی هریک از پارامترهای سن و ارتفاع مورد استفاده قرار گرفتند و میانگین مربعات خطای مدل محاسبه گردید. با توجه به آنکه روش جنگل تصادفی اهمیت خصیصه‌ها را مشخص می‌نماید، در گام بعد متغیرهای کم‌اهمیت حذف گردیدند. حذف متغیرهای کم‌اهمیت به صورت مرحله‌ای می‌باشد، یعنی در هر مرحله ۲۰٪ از متغیرهای کم‌اهمیت حذف می‌گردند. با حذف ۲۰٪ از متغیرهای کم‌اهمیت در هر مرحله، با استفاده از روش جنگل تصادفی با بقیه متغیرها، مدل‌سازی پارامترهای سن و ارتفاع انجام گرفت و میزان خطای مدل در هر مرحله محاسبه گردید. این مرحله تا رسیدن به ۳ متغیر مستقل ادامه داشت و در هر مرحله میزان خطای مدل محاسبه گردید. برای دستیابی به تعداد نهایی متغیرها، در هر مرحله، از آزمون تی زوجی روی مقادیر قدر مطلق باقی‌مانده‌ها در آن مرحله و مرحله قبل (در صورت کاهش میزان خطا) استفاده گردید. این آزمون به منظور بررسی معنی‌دار بودن میزان کاهش خطای یک مرحله نسبت به مرحله قبل استفاده گردید. در صورت معنی‌دار بودن کاهش خطای یک

<sup>۱۲</sup> Multicollinearity

<sup>۱۳</sup> Overfitting

<sup>۱۴</sup> Random Forest Feature Selection

<sup>۱</sup> Durk object subtraction3

<sup>۲</sup> Principle Component Analysis

<sup>۳</sup> Texture

<sup>۴</sup> Variance

<sup>۵</sup> Contrast

<sup>۶</sup> Homogeneity

<sup>۷</sup> Entropy

<sup>۸</sup> Correlation

<sup>۹</sup> Angular Second Moment

<sup>۱۰</sup> Standard Deviation

<sup>۱۱</sup> Dissimilarity

مرحله نسبت به مرحله قبل، تعداد نهایی متغیرها، برابر با تعداد متغیرهای باقیمانده برای آن مرحله می باشد، ولی در صورتی که این اختلاف معنی‌دار نبود، تعداد متغیرهای

انتخاب شده برای مدلسازی برابر با تعداد متغیرهای مرحله-ای می باشد که کمترین تعداد متغیر را دارا است [۳۸].

جدول ۳- لیست شاخص‌های گیاهی با توجه به باندهای موجود در تصاویر اسپات-۵

| منابع | فرمول                                                                                                                               | شاخص‌های گیاهی    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| [۲۶]  | $\eta(1 - 0.25\eta) \frac{Red - 0.125}{1 - Red}; \eta = \frac{2(NIR^2 - Red^2) + 1.5 \times NIR + 0.5 \times Red}{NIR + Red + 0.5}$ | GEMI              |
| [۲۷]  | $\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$                                                                                                   | GNDVI             |
| [۲۸]  | $\frac{SWIR}{[(RED + GREEN) / 2]}$                                                                                                  | SVR               |
| [۲۹]  | $(NIR - Red) / (NIR + Red)$                                                                                                         | NDVI              |
| [۳۰]  | $\frac{NIR - Red}{NIR + Red} (1 - \frac{SWIR - SWIR_{min}}{SWIR_{max} - SWIR_{min}})$                                               | NDVI <sub>c</sub> |
| [۳۱]  | $\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$                                                                                                     | NDII              |
| [۳۲]  | $(1 + L) \frac{NIR + Red}{NIR + Red + L}$                                                                                           | OSAVI             |
| [۳۳]  | $\sqrt{NDVI \times DVI}$                                                                                                            | RDVI              |
| [۳۴]  | $\frac{NIR}{Red} (1 - \frac{SWIR - SWIR_{min}}{SWIR_{max} - SWIR_{min}})$                                                           | RSR               |
| [۳۵]  | $\frac{(1 + L)(NIR + Red)}{NIR + red + L}; L = 0.5$                                                                                 | SAVI              |
| [۳۶]  | $NIR + 0.5 - \sqrt{(NIR + 0.5)^2 - 2(NIR - Red)}$                                                                                   | MSAVI2            |
| [۳۷]  | $1.2 * [1.2 * (NIR - GREEN) - 2.5 * (RED - GREEN)]$                                                                                 | MTVI1             |
| [۳۷]  | $\frac{1.5 * [1.2 * (NIR - GREEN) - 2.5 * (RED - GREEN)]}{\sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - (6 * NIR - 5 * \sqrt{RED}) - 0.5}}$               | MTVI2             |
| [۳۷]  | $1.2 * [2.5 * (NIR - RED) - 1.3 * (NIR - GREEN)]$                                                                                   | MCARI             |
| [۳۷]  | $\frac{1.5 * [2.5 * (NIR - RED) - 1.3 * (NIR - GREEN)]}{\sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - (6 * NIR - 5 * \sqrt{RED}) - 0.5}}$                 | MCARI2            |

## ۷- مدل‌سازی

در این تحقیق از رگرسیون خطی چند متغیره به‌منظور تعیین رابطه‌ی بین داده‌های پیمایشی مورد بررسی و اطلاعات طیفی و بافتی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای

استفاده گردید. در این مطالعه سن و ارتفاع درختان به عنوان متغیرهای وابسته و ویژگی‌های طیفی و بافتی استخراج‌شده از تصاویر به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. به‌منظور اعتبار سنجی نتایج هریک از

اندازه گیری شده و مقادیر برآورد شده توسط هر یک از مدل ها بدون در نظر گرفتن منفی و یا مثبت بودن این باقی مانده ها انجام می گیرد [۳۹].

## ۸- نتایج

### ۸-۱- تخمین سن و ارتفاع با داده های طیفی و بافتی

جداول (۴) و (۵) مقادیر  $R^2$  و RMSE حاصل از مدل های رگرسیونی خطی بین داده های طیفی و بافتی و پارامترهای ساختاری سن و ارتفاع درختان را نشان می دهد. مطابق با جدول (۴)، شاخص گیاهی MCARI2 بالاترین مقدار  $\beta$  را نشان می دهد، این یعنی اینکه تغییرات این متغیر بیشترین تاثیر را در تغییرات متغیر پاسخ یعنی سن و ارتفاع درختان دارد.

مدل سازی ها، یک سوم قطعات به صورت تصادفی انتخاب گردیدند و در فرآیند مدل سازی شرکت داده نشدند. این قطعات به عنوان داده های آزمایشی برای اعتبار سنجی مدل های رگرسیونی در نظر گرفته شدند. برای ارزیابی اعتبار تخمین هر یک از مدل های رگرسیونی به دست آمده، از معیارهای ضریب تعیین ( $R^2$ )، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطا، که از تقسیم مقادیر RMSE بدست آمده برای تخمین هر پارامتر به میانگین مقادیر اندازه گیری شده آن پارامتر ضرب در ۱۰۰ به دست می آید استفاده گردید. به منظور مقایسه آماری نتایج حاصل از هریک از مدلسازی های مختلف (مدلسازی حاصل از داده های طیفی، بافتی و ترکیب داده های طیفی و بافتی) از آزمون تی نمونه های جفت شده استفاده شد. این آزمون بر روی مقادیر مطلق باقی مانده ها یعنی اختلاف بین مقادیر

جدول ۴- نتایج مدل رگرسیونی با استفاده از داده های طیفی برای تخمین میانگین سن و ارتفاع توده های درختان

| پارامترهای ساختاری   | $R^2$ | RMSE | (/RMSE) | ویژگی ها                        | $\beta$  | $\beta$ Std.error.of |
|----------------------|-------|------|---------|---------------------------------|----------|----------------------|
| میانگین ارتفاع (متر) | ۰/۶۴  | ۳/۲۲ | ٪۱۴     | GNDVI<br>MCARI2<br>OSAVI<br>SVR | -۰/۷۴۵۳  | ۱/۲۹۳                |
|                      |       |      |         |                                 | -۱۱۰/۴۴  | ۱۳/۳۸                |
|                      |       |      |         |                                 | -۱۵/۸۳   | ۱۰/۲۳                |
|                      |       |      |         |                                 | ۱۱/۸۱۳   | ۴/۲۶                 |
| میانگین سن (سال)     | ۰/۶۴  | ۳/۸۸ | ٪۱۸     | GNDVI<br>MCARI2<br>OSAVI<br>SVR | -۰/۸۸۴   | ۱/۵۳۴                |
|                      |       |      |         |                                 | -۱۳۰/۹۹۸ | ۲۱/۸                 |
|                      |       |      |         |                                 | -۱۸/۷۷۵  | ۱۲/۱۳۴               |
|                      |       |      |         |                                 | ۱۴/۰۱۱   | ۵/۰۵                 |

جدول ۵- نتایج مدل رگرسیونی با استفاده از داده های بافتی برای تخمین میانگین سن و ارتفاع توده های درختان

| پارامترهای ساختاری   | $R^2$ | RMSE | (/RMSE) | ویژگی ها                                                                                               | $\beta$  | $\beta$ Std.error.of |
|----------------------|-------|------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------|
| میانگین سن (سال)     | ۰/۴۷۵ | ۴/۳  | ٪۲۰     | Mean(3,0)<br>Cor(5,135)<br>Cor(5,90)<br>Cor(7,135)<br>Cor(7,90)<br>Cor(9,135)<br>Hom(7,0)<br>Cor(9,90) | -۲/۰۷۴   | ۰/۴۴                 |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۱۴۹/۳۳۹ | ۶۷/۷۲۴               |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۱۱۷/۶۸۸ | ۷۵/۷۳                |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | ۳۴۹/۵۳۵  | ۱۳۹/۰۷۸              |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | ۲۹۹/۲۲   | ۱۵۸/۸۱               |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۱۷۳/۳۵  | ۸۲/۴۶۳               |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۸۵/۶۱۲  | ۱۲/۹۵۵               |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۱۹۲/۶۱  | ۱۰۰/۲۴۶              |
| میانگین ارتفاع (متر) | ۰/۴۳  | ۳/۸۳ | ٪۱۷     | Cor(3,90)<br>Cor(5,135)<br>Cor(5,90)<br>Hom(5,0)<br>Cor(7,135)<br>Cor(7,90)<br>Cor(9,135)<br>Cor(9,90) | -۱۸/۷۵۵  | ۲۵/۴۴۹               |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۱۲۸/۹۱۵ | ۶۱/۳۸۳               |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۴۶/۶۷۴  | ۹۳/۴۷۲               |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۳۸/۹۳۳  | ۹/۵۷                 |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | ۲۷۲/۰۶۲  | ۱۲۵/۰۱۳              |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | ۲۵۴/۶۷   | ۱۵۵/۳۱۱              |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۱۱۶/۵۷۵ | ۷۳/۶۹                |
|                      |       |      |         |                                                                                                        | -۱۹۲/۵۹  | ۹۱/۹۴۳               |

تذکر: اعداد داخل پرانتز نشان دهنده اندازه پنجره و زاویه در فیلتر بافتی ماتریس وقوم توام گام های خاکستری می باشد.

مطابق جدول (۵) پارامتر بافتی همبستگی بالاترین مقدار  $\beta$  را نشان می‌دهد، این یعنی اینکه تغییرات این متغیر بیشترین تاثیر را در تغییرات متغیر پاسخ یعنی سن و ارتفاع درختان دارد. همچنین نتایج این جدول نشان می‌دهد دقت حاصل از مدلسازی با استفاده از داده های بافتی تصویر پانکروماتیک نسبت به داده های طیفی تصویر چند طیفی پایین تر می باشد. به منظور بهبود نتایج حاصل از مدلسازی سن و ارتفاع درختان، داده های طیفی و بافتی با دو رویکرد ترکیب ساده و نسبت گیری داده های طیفی و بافتی با هم ترکیب شدند.

## ۸-۲- ترکیب داده‌های طیفی و بافتی در سطح ویژگی

جدول ۶ مقادیر  $R^2$  و RMSE حاصل از مدل های رگرسیونی خطی را به منظور تخمین سن و ارتفاع توده‌های درختان با استفاده از ترکیب داده‌های طیفی و بافتی نشان می‌دهد. مطابق با جدول (۶) میانگین سن و ارتفاع توده‌های درختان با استفاده از ترکیب ساده داده‌های طیفی و بافتی و نسبت گیری داده‌های طیفی و بافتی تخمین زده شد. براساس نتایج بیان شده در جدول (۶)، مدل رگرسیونی حاصل از نسبت گیری داده‌های طیفی و بافتی بهترین دقت را در تخمین میانگین سن و ارتفاع نشان می‌دهد. (میانگین سن  $R^2=0.70$  و  $RMSE=3/4$  و میانگین ارتفاع  $R^2=0.70$  ,  $RMSE=2/9$ ). این در حالی است که ترکیب ساده داده های طیفی و بافتی، میزان تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان را به میزان محدودی بهبود داد.

جدول ۶- مقایسه تخمین میانگین سن و ارتفاع توده‌های درختان با داده‌های مختلف

| ویژگی ها                                    | داده‌های پیمایشی | $R^2$ | RMSE | (/RMSE) |
|---------------------------------------------|------------------|-------|------|---------|
| ترکیب ساده طیفی و بافتی (تعداد=۶)           | سن               | ۰/۶۸  | ۳/۶  | ٪۱۸     |
| ترکیب ساده طیفی و بافتی (تعداد=۸)           | ارتفاع           | ۰/۶۵  | ۳/۱۴ | ٪۱۴     |
| نسبت گیری داده‌های طیفی به بافتی (تعداد=۱۴) | سن               | ۰/۷۰  | ۳/۴  | ٪۱۷     |
| نسبت گیری داده‌های طیفی به بافتی (تعداد=۱۴) | ارتفاع           | ۰/۷۰  | ۲/۹  | ٪۱۳     |

به منظور ارزیابی و مقایسه آماری نتایج حاصل از داده‌های طیفی، بافتی، ترکیب ساده طیفی و بافتی و نسبت گیری داده‌های طیفی و بافتی، آزمون تی نمونه های جفت شده بر روی نتایج هر یک از آنها اعمال گردید. نتایج حاصل از این آزمون در جدول (۷) آورده شده است. مقایسه نتایج جدول (۴) و (۵) نشان می‌دهد؛ داده های طیفی تصاویر چند طیفی اسپات-۵ دقت بالاتری نسبت به داده های بافتی تصویر پانکروماتیک دارند، ولی آزمون تی نشان داد این اختلاف دقت، از لحاظ آماری معنی دار نمی باشد. همچنین نتایج آزمون تی برای مقایسه آماری مدلسازی حاصل از ترکیب داده های طیفی و بافتی نشان می‌دهد نسبت گیری داده های طیفی و بافتی به طور معنی داری باعث بهبود تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان می‌شود.

جدول ۷- مقادیر پی- مقدار حاصل از آزمون تی نمونه های جفت شده جهت مقایسه نتایج حاصل از مدل های رگرسیونی مختلف

| P-value              |                                  |                |                                  |                                 | پارامترهای ساختاری |
|----------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| میانگین ارتفاع (متر) | داده های طیفی                    | داده های بافتی | ترکیب ساده داده های طیفی و بافتی | نسبت گیری داده های طیفی و بافتی |                    |
|                      | .....                            | ۰/۱۳           | ۰/۴۱                             | ۰/۰۰۸۴                          |                    |
|                      | داده های بافتی                   | ۰/۱۳           | .....                            | ۰/۰۰۱۳                          |                    |
|                      | ترکیب ساده داده های طیفی و بافتی | ۰/۴۱           | ۰/۰۰۱۳                           | .....                           |                    |
| میانگین سن (سال)     | نسبت گیری داده های طیفی و بافتی  | ۰/۰۰۸۴         | ۰/۰۰۲۴۳                          | ۰/۰۰۹                           |                    |
|                      | P-value                          |                |                                  |                                 | پارامترهای ساختاری |
|                      | داده های طیفی                    | داده های بافتی | ترکیب ساده داده های طیفی و بافتی | نسبت گیری داده های طیفی و بافتی |                    |
|                      | .....                            | ۰/۴            | ۰/۱۰۵                            | ۰/۰۱                            |                    |
| میانگین سن (سال)     | داده های بافتی                   | ۰/۴            | .....                            | ۰/۰۰۳۰۸۵                        |                    |
|                      | ترکیب ساده داده های طیفی و بافتی | ۰/۴            | ۰/۰۰۶                            | .....                           |                    |
|                      | نسبت گیری داده های طیفی و بافتی  | ۰/۰۱           | ۰/۰۰۳۰۸۵                         | ۰/۰۳۵                           |                    |
|                      | .....                            | .....          | .....                            | .....                           |                    |

تذکر: آزمون تی نمونه های جفت شده در سطح معنی داری ۹۵٪ انجام شد.

## ۹- بحث

در تحقیق حاضر تخمین میانگین سن و ارتفاع توده‌های درختان *Pinus radiata* با استفاده از داده‌های طیفی مستخرج از تصاویر چند طیفی و همچنین داده‌های بافتی مستخرج از تصویر پانکروماتیک سنجنده HRG2 ماهواره اسپات-۵ مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های طیفی این سنجنده دارای قدرت تفکیک مکانی متوسط می‌باشند. داده‌های با قدرت تفکیک مکانی کم تا متوسط توانایی نسبتاً محدودی در بازیابی پارامترهای ساختاری جنگل‌ها در مقیاس و دقت مورد نیاز عملیات جنگلداری را دارند، و این محدودیت در مناطق جنگلی با تاج پوشش متراکم و توده‌های جنگلی، که پارامترهای ساختاری (سن، ارتفاع، قطر برابر سینه و غیره) آن‌ها نامرتبط با تغییرات پاسخ‌های طیفی غالب ویژگی‌های تاج پوشش می‌باشد، شدیدتر است [۱۷،۴۰،۴]. نتایج مدل‌سازی میانگین ارتفاع و سن درختان با داده‌های طیفی نشان داد که شاخص گیاهی MCARI2 بیشترین میزان تاثیر را در تغییرات مربوط به داده‌های ارتفاع و سن درختان *Pinus radiata* دارد. نسبت باندهای غیر حساس به پوشش گیاهی و باندهای حساس به پوشش گیاهی شاخصی موثر برای بیان تغییرات پوشش گیاهی و محتوای کلروفیل گیاهان می‌باشد و تا حدود زیادی تأثیراتی که مرتبط با مشخصه‌های گیاهان نیستند را کاهش می‌دهند [۴۱،۴۲،۴۳،۴۴]. به همین خاطر با توجه به جدول (۳) شاخص‌های طیفی GNDVI، MCARI2، OSVI و SVR مهم‌ترین شاخص‌های گیاهی در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان می‌باشند. با توجه به جدول ۳- این شاخص‌ها از ترکیب باندهای حساس به محتوای کلروفیل گیاهان و غیر حساس به پوشش گیاهی ایجاد شده‌اند. در تخمین میانگین ارتفاع و سن با داده‌های بافتی، پارامتر همبستگی با اندازه پنجره  $9 \times 9$  و زاویه  $90^\circ$  درجه بالاترین تاثیر را در برآورد داده‌های ارتفاع و سن درختان *Pinus radiata* نشان داد. عملکرد مطلوب این پارامتر در تحقیقات گذشته نیز نشان داده شده است [۱۰،۴۵،۴]. مقایسه داده‌های حاصل از فیلتر بافتی ماتریس وقوع توأم گام‌های خاکستری (GLCM) با عملکرد شاخص‌های طیفی نشان می‌دهد که هیچ اختلاف معنی‌داری بین عملکرد داده‌های بافتی و طیفی اسپات-۵ در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان وجود ندارد. دلیل یکسان بودن میزان خطای این

داده‌ها، قدرت تفکیک مکانی متوسط تصاویر چند طیفی این ماهواره می‌باشد. در این تصاویر هر پیکسل نماینده مساحتی است، که بزرگتر از تاج یک درخت و کوچکتر از تاج پوشش یک توده جنگلی می‌باشد. براین اساس در این تصاویر یک پیکسل تنها نمی‌تواند مشخصات طیفی یک توده جنگلی و حتی یک درخت تنها را نشان دهد [۴۵]. به همین خاطر است که داده‌های طیفی و بافتی این تصاویر نسبت به تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا در تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها عملکرد ضعیف‌تری دارند [۱۷،۴]. خواص طیفی توده‌های درختی در این تصاویر به علت تداخل با بازتاب طیفی عوارض دیگر (سایه‌ها، گیاهان زیر آشکوب و حتی خاک‌های کف جنگل‌ها) ضعیف‌تر نشان داده می‌شود [۴۵]. همچنین به علت بزرگ‌تر بودن اندازه پیکسل‌های این تصاویر نسبت به تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا، این تصاویر، اطلاعات ساختاری کمتری را ارائه می‌کنند [۴]. یکی از مؤلفه‌های مهم در ارزیابی عملکرد داده‌های بافتی، در زمینه تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها، قدرت تفکیک مکانی تصاویر مورد استفاده می‌باشد [۴]، همان‌طور که قدرت تفکیک مکانی تصاویر کاهش می‌یابد میزان تغییرات بین پیکسل‌ها کاهش یافته و اطلاعات ساختاری کمتری را این تصاویر ارائه خواهند کرد [۳،۴۵]. مطابق با نتایج سوهن<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۲ در زمینه بررسی دقت داده‌های طیفی و بافتی تصاویر ۳۰ متر TM و ۱۰ متر SPOT HRV به‌منظور تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها، نتایج نشان داد، داده‌های طیفی تصاویر TM نسبت به داده‌های بافتی این تصاویر همبستگی بالاتری با پارامترهای ساختاری جنگل‌ها دارند و همچنین داده‌های بافتی تصاویر SPOT HRV نسبت به داده‌های طیفی این تصاویر دقت بالاتری را نشان می‌دهند. در مطالعه‌ای دیگر که توسط شمس‌الدینی و همکاران در سال ۲۰۱۳ صورت گرفت، نتایج نشان داد که داده‌های بافتی مستخرج از تصاویر چند طیفی با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا، ۲ متر (World-View2) در تخمین پارامترهای ساختاری به علت وجود جزئیات بیشتر بر روی تصویر، از دقت بالاتری نسبت به داده‌های طیفی این تصاویر برخوردار می‌باشند. با تأیید برتری داده‌های بافتی

<sup>۱</sup> Cohen

تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا نسبت داده‌های طیفی این تصاویر و همچنین برتری داده‌های طیفی تصاویر با قدرت تفکیک مکانی کم نسبت به داده‌های بافتی این تصاویر، عملکرد مشابه داده‌های بافتی و طیفی تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک اسپات-۵ که دارای قدرت تفکیک مکانی بین لندست و WorldView-2 می باشد، قابل توجیه است.

مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی میانگین سن و ارتفاع با داده‌های بافتی، طیفی، ترکیب ساده داده‌های طیفی و بافتی و نسبت گیری طیفی و بافتی نشان می‌دهد؛ استفاده از نسبت گیری داده‌های طیفی و بافتی تخمین پارامترهای ساختاری را به طور معنی داری بهبود می‌دهد. مطالعات زیادی در زمینه ترکیب داده‌های بافتی و طیفی سنجنده های مختلف به منظور بهبود تخمین پارامترهای ساختاری جنگل‌ها صورت گرفته است که نشان دهنده بهبود تخمین ها از طریق ترکیب داده‌های طیفی و بافتی می باشند [۲۲، ۱۳، ۱۱، ۱۶، ۲۳، ۴۵]. در تمامی این مطالعات، داده های طیفی و بافتی به صورت مستقیم و درکنار هم به منظور مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته اند. تحقیق حاضر، نشان داد که استفاده از نسبت گیری بین داده های طیفی و بافتی پیش از مدل‌سازی، می تواند به کاهش خطای مدل‌سازی پارامترهای سن و ارتفاع درختان بیانجامد. دلایل عملکرد مطلوب روش نسبت گیری را می توان، کاهش هم خطی بین متغیرهای حاصل از این روش و افزایش نقطه اشباع مدل های ایجاد شده از متغیرهای حاصل از نسبت گیری عنوان نمود [۲۴]. شمس الدینی و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که نسبت گیری بین داده های اپتیک و لیدار می تواند منجر به ایجاد متغیرهای جدیدی شده که نسبت به هم دارای همبستگی داخلی کمتری می باشند ولذا اثر همخطی در مدل‌سازی این متغیرها کمتر است. همچنین متغیرهای حاصل از نسبت گیری منجر به ایجاد مدلهایی می گردند که نقطه اشباع بالاتری نسبت به مدلهای حاصل از استفاده مستقیم از متغیرهای حاصل از لیدار و اپتیک و بدون استفاده از نسبت گیری داشتند [۲۴].

## مراجع

با توجه به اینکه میزان خطای قابل قبول در آمار برداری جنگل‌ها به منظور تخمین پارامترهای ساختاری، بین ۱۵ تا ۲۰ درصد می‌باشد [۴۶]، در این مطالعه سن و ارتفاع درختان با استفاده از مدلهای حاصل از روش نسبت گیری نتایج قابل قبولی را ارائه می دهد. میزان خطای تخمین در بهترین حالت یعنی نسبت گیری اطلاعات طیفی و بافتی، برای میانگین سن و ارتفاع درختان نشان می‌دهد، میانگین ارتفاع درختان با خطای ۱۳ درصد بهتر از سن درختان با خطای ۱۷ درصد تخمین زده شد. مطالعات محققین دیگر نیز دقت بالای تخمین ارتفاع درختان نسبت به سایر پارامترهای ساختاری جنگل‌ها را تأیید می کنند [۴، ۱۰، ۱۷، ۶].

## نتیجه گیری

به طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد؛ داده‌های ماهواره اسپات-۵ کارایی نسبتاً خوبی در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان دارند. این مطالعه همچنین نشان داد؛

- داده‌های طیفی و بافتی مستخرج از تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک اسپات-۵، در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان عملکرد یکسانی دارند.
- شاخص همبستگی از میان سایر شاخص های بافتی ماتریس وقوع توأم گام های خاکستری بیشتری همبستگی را با پارامترهای سن و ارتفاع درختان نشان داد.
- شاخص گیاهی MCARI2 نسبت به سایر شاخص های گیاهی مورد استفاده در این مطالعه بیشترین همبستگی را با پارامترهای سن و ارتفاع درختان نشان داد.
- در حالت ترکیب داده‌های طیفی و بافتی در سطح ویژگی، نسبت گیری داده‌های طیفی و بافتی کارایی بهتری نسبت به ترکیب ساده داده‌های بافتی و طیفی در تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان نشان داد.
- با مقایسه خطای تخمین میانگین سن و ارتفاع درختان، میانگین ارتفاع با درصد خطای ۱۳٪ نسبت به سن درختان با درصد خطای ۱۷٪ بهتر تخمین زده شد.

- [1] Shamsoddini, A. (2016). Pine forest structural parameter retrieval using radar images. Journal of Spatial Planning, 20(1), 53-78.
- [2] Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. Forest ecology and management, 198(1), 149-167.

- [3] Wulder, M. (1998). Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. *Progress in physical Geography*, 22(4), 449-476.
- [4] Shamsoddini, A., Trinder, J. C., & Turner, R. (2013a). Pine plantation structure mapping using WorldView-2 multispectral image. *International Journal of Remote Sensing*, 34(11), 3986-4007.
- [5] Ozdemir, I., & Karnieli, A. (2011). Predicting forest structural parameters using the image texture derived from WorldView-2 multispectral imagery in a dryland forest, Israel. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(5), 701-710.
- [6] 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.
- [7] Leboeuf, A., Beaudoin, A., Fournier, R. A., Guindon, L., Luther, J. E., & Lambert, M. C. (2007). A shadow fraction method for mapping biomass of northern boreal black spruce forests using QuickBird imagery. *Remote Sensing of Environment*, 110(4), 488-500.
- [8] Proisy, C., Coutron, P., & Fromard, F. (2007). Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sensing of Environment*, 109(3), 379-392.
- [9] López-Serrano, P. M., Corral-Rivas, J. J., Díaz-Varela, R. A., Álvarez-González, J. G., & López-Sánchez, C. A. (2016). Evaluation of radiometric and atmospheric correction algorithms for aboveground forest biomass estimation using Landsat 5 TM data. *Remote Sensing*, 8(5), 369.
- [10] 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.
- [11] Gómez, C., Wulder, M. A., Montes, F., & Delgado, J. A. (2012). Modeling forest structural parameters in the Mediterranean pines of central Spain using QuickBird-2 imagery and Classification and Regression Tree Analysis (CART). *Remote Sensing*, 4(1), 135-159.
- [12] Running, S. W., Peterson, D. L., Spanner, M. A., & Teuber, K. B. (1986). Remote sensing of coniferous forest leaf area. *Ecology*, 273-276.
- [13] Kimes, D. S., Holben, B. N., Nickeson, J. E., & McKee, W. A. (1996). Extracting forest age in a Pacific Northwest forest from Thematic Mapper and topographic data. *Remote Sensing of Environment*, 56(2), 133-140.
- [14] Jensen, J. R., Qiu, F., & Ji, M. (1999). Predictive modelling of coniferous forest age using statistical and artificial neural network approaches applied to remote sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(14), 2805-2822.
- [15] Chubey, M. S., Franklin, S. E., & Wulder, M. A. (2006). Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(4), 383-394.
- [16] Wunderle, A. L., Franklin, S. E., & Guo, X. (2009). Age class estimation of western red cedar using SPOT-5 pan-sharpened imagery in British Columbia, Canada. *Geocarto International*, 24(1), 47-63.
- [17] 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.
- [18] Hall, R. J., Skakun, R. S., Arsenault, E. J., & Case, B. S. (2006). Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest ecology and management*, 225(1), 378-390.
- [19] Gebreslasie, M. T., Ahmed, F. B., & Van Aardt, J. A. (2010). Predicting forest structural attributes using ancillary data and ASTER satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S23-S26.
- [20] Coburn, C. A., & Roberts, A. C. (2004). A multiscale texture analysis procedure for improved forest stand classification. *International journal of remote sensing*, 25(20), 4287-4308.
- [21] Shang, D., & Waite, M. L. (1991). Utilization of textural and spectral features from Landsat TM imagery for stratifying forest sample plots. University of Helsinki.
- [22] Cohen, W. B., & Spies, T. A. (1992). Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and SPOT imagery. *Remote Sensing of Environment*, 41(1), 1-17.
- [23] Nichole, J. E., and Sarker, L. R. (2011). "Improved biomass estimation using the texture parameters of two high-resolution optical sensors". *IEEE transaction on geoscience and remote sensing*. 49: 930-948.

- [24] Shamsoddini, A., Trinder, J. C., & Turner, R. (2015). Paired-data fusion for improved estimation of pine plantation structure. *International Journal of Remote Sensing*, 36(8), 1995-2009.
- [25] 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.
- [26] Pinty, B., & Verstraete, M. M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Plant ecology*, 101(1), 15-20.
- [27] Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote sensing of Environment*, 58(3), 289-298.
- [28] Wolter, P. T., Townsend, P. A., & Sturtevant, B. R. (2009). Estimation of forest structural parameters using 5 and 10 meter SPOT-5 satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 2019-2036.
- [29] Rouse Jr, J. W. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.
- [30] Nemani, R., Pierce, L., Running, S., & Band, L. (1993). Forest ecosystem processes at the watershed scale: sensitivity to remotely-sensed leaf area index estimates. *International journal of remote sensing*, 14(13), 2519-2534.
- [31] Kimes, D. S., Markham, B. L., Tucker, C. J., & McMurtrey, J. E. (1981). Temporal relationships between spectral response and agronomic variables of a corn canopy. *Remote Sensing of Environment*, 11, 401-411.
- [32] Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 55(2), 95-107.
- [33] Roujean, J. L., & Breon, F. M. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51(3), 375-384.
- [34] Brown, L., Chen, J. M., Leblanc, S. G., & Cihlar, J. (2000). A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis. *Remote sensing of environment*, 71(1), 16-25.
- [35] Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- [36] Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 48(2), 119-126.
- [37] Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote sensing of environment*, 90(3), 337-352.
- [38] Shamsoddini, A., Trinder, J. C., & Turner, R. (2013b). Non-Linear Methods for Inferring Lidar Metrics Using SPOT-5 Textural Data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, 259-264.
- [39] Shamsoddini, A. (2017). LiDAR and optical data capability assessment for plantation structural parameter estimation. *Journal of Spatial Planning*, 21(2), 119-145.
- [40] Franklin, S. E., & McDermid, G. J. (1993). Empirical relations between digital SPOT HRV and CASI spectral response and lodgepole pine (*Pinus contorta*) forest stand parameters. *International Journal of Remote Sensing*, 14(12), 2331-2348.
- [41] Carter, G. A., & Knapp, A. K. (2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American journal of botany*, 88(4), 677-684.
- [42] Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 18(12), 2691-2697.
- [43] Gao, X., Huete, A. R., Ni, W., & Miura, T. (2000). Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment*, 74(3), 609-620.
- [44] Castro, K. L., Sanchez-Azofeifa, G. A., & Rivard, B. (2003). Monitoring secondary tropical forests using space-borne data: implications for Central America. *International Journal of Remote Sensing*, 24(9), 1853-1894.
- [45] Tuominen, S., & Pekkarinen, A. (2005). Performance of different spectral and textural aerial photograph features in multi-source forest inventory. *Remote sensing of Environment*, 94(2), 256-268.
- [46] Holmgren, P., & Thuresson, T. (1998). Satellite remote sensing for forestry planning—a review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 13(1-4), 90-110.