

## قابلیت‌سنجی کارایی داده‌های لیدار و اپتیک به منظور استخراج پارامترهای ساختاری جنگل

علی شمس‌الدینی\*

استادیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

پذیرش: ۹۶/۳/۲۰

دریافت: ۹۵/۶/۷

### چکیده

در سال‌های اخیر پیشرفت تکنولوژی‌های سنجش از دور و افزایش تنوع داده‌های قابل استفاده موجب شده تا ارزیابی و قابلیت‌سنجی داده‌های مختلف از اهمیت زیادی برخوردار بوده و به همین دلیل به عنوان مسأله‌ای که کمتر در تحقیقات گذشته بدان پرداخته شده است، هدف اصلی این تحقیق قرار گیرد. در این تحقیق داده‌های مستخرج از تصاویر وردیو-۲ و اسپات-۵ شامل اطلاعات بافتی این تصاویر و نیز خصوصیات آماری مستخرج از داده‌های لیدار به صورت مستقل برای تخمین پارامترهای ساختاری جنگل کاج تک‌گونه<sup>۱</sup> استفاده گردید و نتایج حاصل از هر داده با نتایج حاصل از داده‌های مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد در حالی که داده‌های وردیو-۲ برای برآورد تراکم و قطر درختان دارای بهترین عملکرد است، داده‌های لیدار برای تخمین ارتفاع میانگین و حجم درختان مناسب است. در ضمن تفاوت آماری معنی‌داری بین داده‌های مختلف سنجش از دور برای برآورد رویه سطح درختان وجود ندارد، همچنین در میان پارامترهای ساختاری، در حالی که ارتفاع میانگین و قطر درختان با خطایی قابل قبول برآورد شدند، تخمین تراکم، حجم و رویه سطح درختان با دقت کمتری انجام شد.

واژگان کلیدی: لیدار، پارامترهای ساختاری، تصاویر اپتیک، جنگل، خصوصیات بافتی

ali.shamsoddini@modares.ac.ir

\* نویسنده مسئول مقاله:

## ۱. مقدمه

آماربرداری صحیح از پارامترهای ساختاری جنگل‌ها و نیز تهیه اطلاعات قابل اعتماد از خصوصیات آن‌ها نظیر توزیع افقی این نواحی به انجام تصمیم‌گیری‌های مناسب محلی و منطقه‌ای در رابطه با حفاظت، مدیریت و برداشت چوب از این نواحی کمک می‌کند (بوید و دانسون<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵؛ رابرتز و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱). روش‌های سنتی آماربرداری از جنگل‌ها معمولاً مستلزم قطع درختان بوده و بیشتر نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی است (هیپپا و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۰). غیرقابل دسترس بودن بسیاری از نقاط جنگلی و نیز نیاز به بهنگام‌سازی اطلاعات موجب می‌شود تا با توجه به وسعت زیاد مناطق جنگلی در سطح جهان، روش‌های سنتی امروزه جای خود را به روش‌های مبتنی بر استفاده از داده‌های سنجش از دور بدهند (تیموتی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۶). هزینه پایین در مقایسه با روش‌های آماربرداری زمینی، امکان بهنگام‌سازی اطلاعات، دسترسی به مناطق صعب‌العبور و نیز وجود داده‌هایی با قدرت تفکیک‌های مکانی و طیفی متنوع موجب شده تا امروزه تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از دور به صورت وسیع در مطالعات مربوط به جنگل‌ها مورد استفاده قرار گیرند (لی‌توان و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۴). درحالی که تاکنون انواع مختلفی از داده‌های سنجش از دور شامل داده‌های اپتیک (شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۳)، داده‌های رادار (نئومن و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۰؛ شمس‌الدینی، ۱۳۹۵) و داده‌های لیدار (دین و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۹) به منظور برآورد پارامترهای ساختاری جنگل مورد استفاده قرار گرفته و مقایسه عملکرد این داده‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در میان داده‌های مختلف سنجش از دور به تازگی داده‌های لیدار و اپتیک به صورت مستقل و یا به صورت ترکیب با یکدیگر (تونولی و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۱۱؛ شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۵) به منظور برآورد پارامترهای ساختاری جنگل بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

داده‌های اپتیک شامل دامنه وسیعی از باندهای طیفی با قدرت تفکیک‌های مکانی متفاوت است که موجب شده تا این داده‌ها برای تخمین پارامترهای ساختاری جنگل مناسب باشند (والدر<sup>۹</sup>، ۱۹۹۸). داده‌های مربوط به سنجنده‌های اپتیک به ویژه برای تهیه اطلاعات مربوط به

1. Boyd and Danson
2. Roberts et al.
3. Hyypä et al.
4. Timothy et al.
5. Le Toan et al.
6. Neumann et al.
7. Dean et al.
8. Tonolli et al.
9. Wulder

توزیع افقی جنگل‌ها می‌تواند مفید باشند (لیم<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). با وجود این مزایا، داده‌های غیرفعال برای کسب اطلاعات از مناطق زیر تاج پوشش مناسب نیست به ویژه در مناطقی که تاج پوشش دارای تراکم زیادی است (وارینگ<sup>۲</sup> و همکاران ۱۹۹۵). البته باید به این نکته توجه کرد در جنگل‌هایی با تاج پوشش تنک امکان کسب اطلاعات در رابطه با پوشش تحتانی جنگل و نیز اطلاعات مربوط به ساختار عمودی درختان امکان‌پذیر است (ولتر<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۲).

داده‌های لیدار قادر به اندازه‌گیری مستقیم ارتفاع درختان بوده و از این جهت نسبت به سایر داده‌های سنجش از دور دارای عملکرد بهتری است (هاید<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۶؛ ارودی و ماسکال<sup>۵</sup>، ۲۰۱۰). اگرچه ارتفاع درختان که توسط لیدار به دست می‌آید می‌تواند برای محاسبه سایر پارامترهای جنگل از جمله حجم درختان مفید باشد، ولی نیاز به لحاظ عوامل دیگری چون تراکم تاج پوشش در محاسبه حجم درختان می‌تواند استفاده از عامل تنها ارتفاع را برای محاسبه سایر پارامترهای ساختاری را با خطای بالا همراه کند (لیم و همکاران، ۲۰۰۳). علاوه بر این جنگل‌های کاج معمولاً ارتفاع درختان از ارتفاع واقعی آن‌ها کوتاه‌تر برآورد می‌شود که دلیل اصلی آن شانس کم برخورد پالس‌های لیدار با نوک درختان به دلیل تراکم کم نقاط لیدار است (نیلسون<sup>۶</sup>، ۱۹۹۶؛ ناست<sup>۷</sup>، ۱۹۹۷). اگرچه این نقطه‌ضعف داده‌های لیدار ممکن است در آینده با افزایش تراکم نقاط لیدار تا حدودی برطرف گردد، ولی با این حال ناچیز شماری<sup>۸</sup> ارتفاع درختان می‌تواند سبب ایجاد خطا در محاسبه پارامترهای ساختاری دیگر از جمله حجم و روبه سطح<sup>۹</sup> درختان شود. علاوه بر این داده‌های لیدار معمولاً از نظر هزینه برداشت گران بوده و عملیات پردازش آن‌ها نسبت به داده‌های اپتیک زمان بیشتری به خود اختصاص می‌دهد. در ضمن برخلاف بیشتر داده‌های اپتیک که در دسترس بوده و معمولاً برای اکثر مناطق برداشت شده، داده‌های لیدار معمولاً برای مناطق محدودی برداشت شده‌اند.

با توجه به آن‌که در آماربرداری جنگل خطای استاندارد برآورد پارامترهای ساختاری بین ۱۵٪-۲۰٪ است (هولمگرن و تارسن<sup>۱۰</sup>، ۱۹۹۸)، اطلاع از این مسأله که کدام یک از داده‌های سنجش از دور می‌تواند چنین دقتی را فراهم کند دارای اهمیت بسیار زیادی است. با توجه به

1. Lim
2. Waring
3. Wolter
4. Hyde
5. Erody and Moskal
6. Nilsson
7. Næsset
8. Underestimation
9. Basal area
10. Holmgren and Thuresson

نقاط ضعف و قوت یادشده برای هریک از داده‌های اپتیک و لیدار مقایسه عملکرد این دو نوع داده برای دستیابی به دقت استاندارد از اهمیت زیادی برخوردار است. عاملی که در این بین از اهمیت زیادی برخوردار است تفاوت در عملکرد داده‌های سنجش از دور برای برآورد پارامترهای ساختاری جنگل در بخش‌های مختلف یک جنگل با سنین مختلف است. علت اصلی تفاوت در عملکرد داده‌های مختلف سنجش از دور تفاوت در اطلاعاتی است که این داده‌ها از مناطق جنگلی ارائه می‌دهند. برای نمونه داده‌های لیدار اطلاعات مربوط به ارتفاع درختان را با دقت بالا به دست می‌دهد (ارودی و ماسکال، ۲۰۱۰). علاوه بر آن که دقت داده‌های لیدار برای ارتفاع‌های مختلف درختان می‌تواند متفاوت باشد، رابطه بین ارتفاع و سایر پارامترهای ساختاری جنگل می‌تواند در یک جنگل با درختانی با سنین مختلف متفاوت باشد. بررسی عملکرد داده‌های مختلف سنجش از دور در یک جنگل با تنوع سنی درختان و برای پارامترهای مختلف می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد، در این تحقیق به عنوان یکی از اهداف اصلی مورد مطالعه قرار گرفته است. مسلم کسب اطلاع از این که کدامیک از این داده‌ها برای برآورد پارامترهای ساختاری مختلف جنگل شامل ارتفاع، متوسط قطر درخت در ارتفاع سینه، رویه سطح، حجم درخت و تعداد درخت در واحد سطح، مناسب‌تر است می‌تواند در مدیریت بهینه جنگل‌ها، انتخاب نوع داده سنجش از دور مورد نیاز و هم‌زمان هزینه‌ها و زمان لازم برای پردازش داده‌های سنجش از دور نقشی مهم ایفا نماید. علاوه بر مقایسه داده‌های اپتیک و لیدار، با توجه به تفاوت عملکرد داده‌های اپتیک در قدرت تفکیک‌های مکانی متفاوت، مقایسه عملکرد دو داده اپتیک اسپات-۵ و وردیو-۲ در رابطه با تخمین پارامترهای ساختاری جنگل جزء اهداف این تحقیق قرار گرفته است.

اگرچه خصوصیات ساختاری محدودی نظیر شاخص سطح برگ<sup>۱</sup> (LAI) وجود دارند که گاهی اطلاعات طیفی داده‌های اپتیک می‌تواند برای مدل‌سازی آن‌ها مفیدتر باشد. مطالعات متعدد نشان داده است که خصوصیات بافتی می‌تواند بهتر از خصوصیات طیفی، اطلاعات مربوط به ساختار جنگل از قبیل ارتفاع، حجم و رویه سطح را در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا نشان دهد (والدر و همکاران، ۱۹۹۸؛ سانگ، ۲۰۰۷؛ شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۳). ماتریس وقوع توام گام‌های خاکستری<sup>۲</sup> (GLCM) در مطالعات سنجش از دور به عنوان روشی رایج برای استخراج خصوصیات بافتی از تصویر شناخته می‌شود (لو<sup>۳</sup>، ۲۰۰۵). عوامل مختلفی در میزان مؤثر بودن اطلاعات بافتی به منظور مدل کردن متغیرهای ساختاری جنگل

1. Leaf Area Index  
2. Grey Level Co-occurrence Matrix  
3. Lu

نقش‌آفرینی می‌کند. مهم‌ترین این عوامل شامل خصوصیات جنگل، قدرت تفکیک مکانی و خصوصیات طیفی تصاویر، شرایط محیطی در زمان برداشت داده‌ها، اندازه پنجره مورد استفاده جهت استخراج اطلاعات بافتی و جهت محاسبه اطلاعات بافتی در آن جهت می‌شوند (لو، ۲۰۰۵؛ کاییتاکرا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۶؛ شمس‌الدینی و همکاران، ۱۳۰۱۳a). همچنین از جمله عوامل موثر دیگر که می‌تواند بر نتایج حاصل از GLCM تأثیرگذار باشد، جهت ردیف‌های کشت درختان در جنگل مصنوعی خصوصاً زمانی که درختان در ردیف‌های کشت متفاوتی قرار گرفته است.

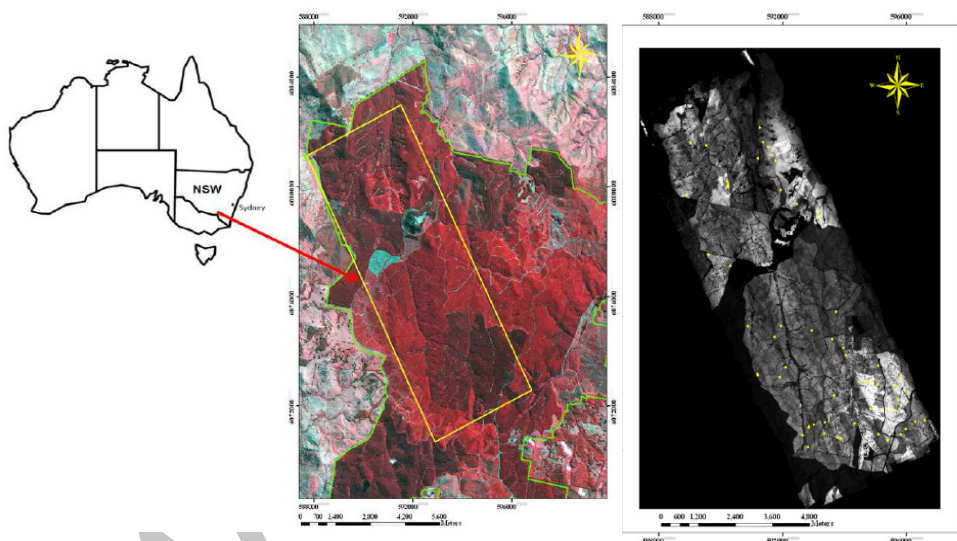
در این تحقیق قابلیت تصاویر اسپات-۵، وردیو-۲، و داده‌های لیدار جهت برآورد پارامترهای ساختاری شامل ارتفاع متوسط، قطر تنه در ارتفاع ناحیه سینه درخت<sup>۲</sup> (در این مقاله به اختصار قطر تنه نامیده می‌شود)، حجم درختان در واحد سطح<sup>۳</sup> (که در این مقاله به اختصار حجم درختان نامیده می‌شود) و تراکم درختان در واحد سطح<sup>۴</sup> (که در این مقاله به اختصار تراکم درختان نامیده می‌شود)، در یک جنگل کاج (گونه *Pinus radiata*) با تنوع جهت ردیف کشت و تنوع سن درختان، مناسب برای بررسی اهداف این تحقیق، مورد ارزیابی قرار گرفته است. گونه کاج *Pinus radiata* به عنوان مهم‌ترین گونه کاج دست کاشت در دنیا محسوب می‌گردد که در حال حاضر بیشترین وسعت زیر کشت را در دنیا در میان دیگر گونه‌های تجاری کاج به خود اختصاص داده است (یان و همکاران، ۲۰۰۶).

## ۲. منطقه مورد مطالعه و گردآوری پلات‌ها

منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. این جنگل کاج مصنوعی که تحت کشت درختان کاج (گونه *Pinus radiata*) است، بخشی از جنگل‌های منطقه گرین هیلز<sup>۶</sup> در نزدیکی شهر بتلو<sup>۷</sup> در ایالت نیوساوت ولز<sup>۸</sup> استرالیا است. وسعت منطقه مورد مطالعه ۵۰۰۰ هکتار بوده و 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 و ۳۵ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه و ۵۸ ثانیه جنوبی قرار گرفته است. در سپتامبر سال ۲۰۰۸ تعداد ۶۱ پلات به صورت تصادفی و

1. Kayitakire
2. Diameter at breast height (DBH)
3. Stand volume
4. Stocking
5. Yan et al.
6. Green Hills
7. Batlow
8. New South Wales

با فاصله حداقل ۵۰ متر از عوارض انسانی نظیر جاده‌ها و ساختمان‌ها، و درختان اکالیپتوسی که به صورت طبیعی در منطقه رویش داشتند و در دو کلاس سنی درختان شامل ۱۰-۲۰ سال و بیش از ۲۰ سال برداشت گردیدند. در این آماربرداری ۹۷۸ درخت از نظر ارتفاع و قطر اندازه‌گیری شدند و از یک تئودولیت لیزری<sup>۱</sup> (Leica 2 s T1100 total station) و سیستم تعیین موقعیت جغرافیایی تفریقی<sup>۲</sup> به منظور تعیین موقعیت جغرافیایی مراکز هر پلات و نیز موقعیت هر درخت با خطای کمتر از ۵ سانتی‌متر استفاده شد. سپس برای محاسبه حجم درختان در واحد سطح و برای هر پلات حجم هر درخت با استفاده از رابطه تبدیل ارتفاع و قطر درخت به حجم درخت (شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۵) محاسبه شد. جدول ۱ خلاصه اطلاعات آماری مربوط به پلات‌های برداشت شده را نشان می‌دهد (شمس‌الدینی، ۱۳۹۵).



شکل ۱. الف- کادر زرد نشان‌دهنده منطقه مورد مطالعه در این تحقیق بر تصویر رنگی کاذب<sup>۳</sup> ماهواره اسپات-۵؛ ب- لایه CHM به‌دست‌آمده از داده‌های لیدار، نقاط زرد رنگ بر این لایه معرف موقعیت مکانی پلات‌های برداشت شده

1. Laser Theodolite
2. Differential Global Positioning System
3. False color

جدول ۱. خلاصه اطلاعات آماری مربوط به پلات‌های برداشت شده در این تحقیق

پارامتر ساختاری	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف از معیار
ارتفاع متوسط (متر)	۱۲/۲	۳۳/۶	۲۴/۰	۵/۷
قطر متوسط تنه (سانتی‌متر)	۱۵/۴	۴۶/۴	۳۰/۱	۹/۷
حجم درختان (مترمکعب در هکتار)	۱۰۶/۵	۷۶۰/۳	۲۹۶/۰	۱۲۸/۷
رویه سطح (متر مربع در هکتار)	۱۸/۰	۶۵/۴	۳۳/۷	۱۰/۸
تراکم درختان (درخت در هکتار)	۱۲۱	۱۴۲۹	۵۹۵	۳۷۱/۱

### ۳. داده‌های سنجش از دور

در ماه جولای سال ۲۰۰۸ میلادی داده‌های لیدار این مطالعه با استفاده از اسکنر لیزری Riegl LMS-Q560 برداشت گردید که دارای سیستم ثبت چند بازگشتی<sup>۱</sup> با میدان دید کوچک<sup>۲</sup> بود. فرکانس تکرار پالس<sup>۳</sup> این سیستم ۸۸ کیلوهرتز بود و منطقه مورد مطالعه را با تراکم متوسط ۲ پالس در متر مربع برداشت کرد. پهنای برداشت این سنجنده ۵۰۰ متر و اندازه میدان دید آن ۶۰ سانتی‌متر بود. به منظور تهیه مدل رقومی ارتفاع تاج پوشش<sup>۴</sup> (CHM) ابتدا با استفاده از اعمال روش شبکه نامنظم مثلثی<sup>۵</sup> (TIN) بر نقاط مربوط به زمین در ابر نقطه‌ای<sup>۶</sup>، مدل رقومی ارتفاعی<sup>۷</sup> و با اعمال هم‌مین روش بر نقاط متعلق به عوارض سطح زمین، مدل رقومی سطح<sup>۸</sup> با اندازه سلولی ۰/۵×۰/۵ متر تهیه شد؛ سپس لایه CHM با اندازه سلول ۰/۵×۰/۵ از تفریق لایه مدل رقومی ارتفاع از لایه مدل رقومی سطح به دست آمد. معمولاً در جریان محاسبه لایه CHM پیکسل‌هایی در این لایه تشکیل می‌گردد که مقادیر ارتفاعی آن‌ها نسبت به پیکسل‌های مجاور خود به شدت کمتر

1. multiple-return
2. Small-footprint
3. Pulse Repetition Frequency
4. Canopy height model
5. Triangulated Irregular Network
6. Point cloud
7. Digital Elevation Model
8. Digital Surface Model

است. به چنین پیکسل‌هایی در اصطلاح حفره گفته می‌شود و در صورتی که این پیکسل‌ها تصحیح نگردند معمولاً منجر به کاهش قابلیت CHM برای تخمین پارامترهای ساختاری جنگل خواهند شد (شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۳b). جهت کاهش تأثیر پیکسل‌های حفره از فیلتر میانگین انطباقی<sup>۱</sup> پیشنهاد شده توسط شمس‌الدینی و همکاران (۲۰۱۳b) استفاده شد.

تصاویر اپتیک مورد استفاده در این تحقیق شامل دو تصویر توجیه ارتفاعی شده<sup>۲</sup> چندطیفی اسپات-۵ و وردیو-۲ بود که به ترتیب در اپریل ۲۰۰۸ و مارچ ۲۰۱۰ میلادی از منطقه مورد مطالعه برداشت شده بودند. اگرچه تصویر وردیو-۲ مورد استفاده در این تحقیق با ۱۷ ماه فاصله نسبت به برداشت زمینی اخذ شده بود، بازدید بصری منطقه نشان داد که تغییر مشخصی نظیر درو و قطع درختان در طی این مدت در منطقه مورد مطالعه رخ نداده است، همچنین میزان رشد درختان نیز به دلیل کاهش بارندگی زیر میزان متوسط در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ در منطقه مورد مطالعه و در این بازه زمانی محدود بوده است (ایلز و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱). به دلیل آن‌که با کاهش بارندگی کمتر از ۷۸۰ میلی‌متر در سال میزان رشد درختان *Pinus radiata* از نظر ارتفاع، قطر تنه، سطح روبه و حجم درختان در داخل پلات به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد (لیندر و همکاران<sup>۴</sup>، ۱۹۸۷) می‌توان بیان داشت میزان تغییرات آماری در سطح پلات در این ۱۷ ماه چندان بارز نبوده است و می‌توان آن را نادیده انگاشت. تصویر توجیه ارتفاعی شده اسپات-۵ دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر (باند مادون قرمز میانی از ۲۰ متر به ۱۰ متر بازنویسی مجدد<sup>۵</sup> شده بود) و تصویر توجیه ارتفاعی شده وردیو-۲ دارای قدرت تفکیک مکانی ۲ متر بود. تصویر اسپات-۵ با استفاده از تابع درجه اول چندجمله‌ای از نظر هندسی نسبت به تصویر وردیو-۲ با دقت بهتر از نصف پیکسل توجیه شد. به منظور کاهش تأثیرات توپوگرافی بر تصاویر ابتدا رادیانس مسیر با استفاده از پیکسل‌های تاریک محاسبه و از مقادیر رادیانس باندها کسر شد (وینسینی و فرازی<sup>۶</sup>، ۲۰۰۳). شیب و جهت شیب به دست آمده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه با اندازه پیکسل ۲ متر به منظور محاسبه کسینوس زاویه برخورد<sup>۷</sup> ( $\cos(i)$ ) (ریانو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳) مورد استفاده قرار گرفت.

1. Adaptive Mean Filter
2. Orthorectified image
3. Eyles et al
4. Linder et al
5. Resampling
6. Vincini and Frazzi
7. Cosine of incident angle



ضریب همبستگی بین رادیانس هر باند و  $\cos(i)$  نشان داده که میزان تأثیرپذیری باندهای مختلف تصاویر اپتیک از توپوگرافی منطقه ناچیز بوده و به همین دلیل نیازی به انجام تصحیح توپوگرافی بر آن‌ها وجود ندارد. با استفاده از روش کد 6S (ورموت و همکاران<sup>۲</sup>، ۱۹۹۷) مقدار پراکنش متمایل به پایین<sup>۳</sup> ( $E_{down}$ ) برای اتمسفر رایلی<sup>۴</sup> با عمق نوری فاقد هواویز<sup>۵</sup> در ۵۵۰ نانومتر (سانگ و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۰۱) جهت استفاده در روش DOS3<sup>۷</sup> برای تصحیح اتمسفری تصاویر محاسبه شد. مقادیر اعداد رقومی پس از تصحیح اتمسفری تصاویر به مقادیر ضریب انعکاس<sup>۸</sup> تبدیل شد.

#### ۴. روش تحقیق و مدل سازی

پس از پردازش داده‌های لیدار و تصاویر اپتیک مجموعه‌ای از خصوصیات<sup>۹</sup> از این داده‌ها از طریق میانگین‌گیری مقادیر پیکسل‌ها در داخل پلات‌هایی با شعاع ۳۰ متر استخراج شد. همان‌گونه که عنوان شد GLCM به عنوان رایج‌ترین روش استخراج اطلاعات بافتی از تصاویر سنجش از دور شناخته می‌شود و به همین دلیل برای استخراج اطلاعات بافتی از تصاویر اپتیک شاخص‌های GLCM شامل همبستگی، کنتراست، همگنی، میانگین، حداکثر احتمال، عدم تشابه، انحراف معیار، واریانس و  $ASM^{10}$  در پنجره‌هایی با چهار اندازه ۳×۳، ۵×۵، ۷×۷، ۹×۹ و نیز چهار جهت صفر، ۴۵، ۹۰، و ۱۳۵ درجه توسط نرم‌افزار MATLAB برای هر یک از باندهای تصاویر اپتیک محاسبه شد. در مطالعات گذشته تفاوت میان اطلاعات استخراج شده از داده‌های مربوط به نسبت بین باندها و مؤلفه‌های اصلی و اطلاعات حاصل از ضریب انعکاس باندها نشان داده شده است (گائو و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۰۰؛ شمس‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۳). شاخصهای بافتی GLCM علاوه بر باندها برای نسبت‌های باندی و نیز مؤلفه‌های اصلی حاصل از باندهای تصاویر اپتیک نیز محاسبه شد.

1. Riano et al
2. Vermote et al
3. Down welling scattering
4. Rayleigh atmosphere
5. Zero aerosol optical depth
6. Song et al
7. Dark object subtraction
8. Reflectance
9. Attributes
10. Angular Second Moment
11. Gao et al

خصیصه‌های نشان داده شده در جدول ۲ برای مدل‌سازی رابطه بین CHM حاصل از داده‌های لیدار و پارامترهای ساختاری جنگل از داده‌های CHM برای هر پلات استخراج گردیدند. خصیصه‌های نشان داده شده در جدول ۲ علاوه بر آن که برای تمامی پیکسل‌های موجود در یک پلات محاسبه شدند، برای پیکسل‌هایی که دارای ارتفاعی بالاتر از مقدار میانگین ارتفاعی هر پلات بودند نیز محاسبه شدند. بدین شکل قابلیت پیکسل‌های متعلق به قسمت‌های بالایی تاج پوشش برای تخمین پارامترهای ساختاری درخت مورد ارزیابی قرار گرفت. استفاده از پیکسل‌هایی که دارای ارتفاعی بالاتر از مقدار میانگین ارتفاعی هر پلات بودند، موجب شد تا تأثیر نویزها و پیت‌هایی که ممکن بود همچنان در CHM باقی مانده باشد، حذف گردد. علاوه بر این خصیصه‌ها صدک‌های<sup>۱</sup> ارتفاعی پیکسل‌های هر پلات با توالی‌های ۱۰ درصدی (صدک ۱۰٪-۹۰٪) برای هر پلات محاسبه گردید.

پس از استخراج اطلاعات یادشده برای هر یک از داده‌های سنجش از دور از روش رگرسیون چند متغیره گام به گام جهت مدل‌سازی رابطه بین این اطلاعات و پارامترهای ساختاری جنگل مورد استفاده قرار گرفت. این روش علاوه بر رایج بودن روش رگرسیون چند متغیره گام به گام در مدل‌سازی پارامترهای ساختاری جنگل به دلیل نیاز به تعداد پلات کمتر برای انجام تحقیق حاضر مناسب‌تر بود (شمس‌الدینی، ۱۳۹۵). هم‌خطی چندگانه<sup>۲</sup> و بیش برآزشی<sup>۳</sup> مدل‌ها دو مسئله مهم در رابطه با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره گام به گام است که باید در زمان مدل‌سازی با این روش به آن‌ها توجه کرد (شمس‌الدینی، ۱۳۹۵). شاخص شرطی<sup>۴</sup> و رواداری<sup>۵</sup> و نیز پی-مقدار<sup>۶</sup> مقادیری هستند که برای بررسی هم‌خطی چندگانه و بیش برآزشی مدل‌ها در هر مدل محاسبه شده و با استفاده از این مقادیر مدل‌های مناسب انتخاب گردید. مدل‌هایی که دارای شاخص شرطی کوچک‌تر از ۳۰، مقدار رواداری بزرگ‌تر از ۰/۱ و پی-مقدار کمتر از ۰/۰۵ بودند به عنوان مدل‌های شناسایی شدند که تحت تأثیر هم‌خطی چندگانه و یا بیش برآزش نبوده و سایر مدل‌ها که دارای حتی یکی از این شروط نبودند حذف گردیدند (شمس‌الدینی، ۱۳۹۵). علاوه بر این مدل‌هایی که در آن‌ها تعداد پیش‌بینی‌کننده‌ها (متغیرهای مستقلی که در مدل

1. Percentiles
2. Multicollinearity
3. Overfitting
4. Condition Index
5. Tolerance
6. p-level

برای پیش‌بینی و یا تخمین مورد استفاده قرار می‌گیرند) از تعداد پلات‌ها منهای ۵۰ بیشتر بود، به عنوان مدل‌های بیش برآزش شناخته (هریس<sup>۱</sup>، ۱۹۸۵) و حذف گردیدند.

جدول ۲. خصوصیات استخراج شده از CHM حاصل از داده‌های لیدار

علامت اختصاری	تعریف / فرمول	خصوصیت
ME	میانگین مقادیر ارتفاعی مربوط به CHM در داخل هر پلات	میانگین
M	میانه مقادیر ارتفاعی مربوط به CHM در داخل هر پلات	میانه
MIN	حداقل ارتفاع مربوط به مقادیر CHM در داخل هر پلات	کمینه
MAX	حداکثر ارتفاع مربوط به مقادیر CHM در داخل هر پلات	بیشینه
RA	تفاوت بین مقدار کمینه و بیشینه مقادیر CHM در داخل هر پلات	دامنه
ST	انحراف معیار مربوط به مقادیر CHM در داخل هر پلات	انحراف معیار
VAR	واریانس مربوط به مقادیر CHM در داخل هر پلات	واریانس
CV	$ST/ME$	ضریب تغییرات
RRA	$RA/ME$	دامنه نسبی
SEM	$ST/N^2$ در این جا N تعداد پیکسل‌های موجود در داخل هر پلات است.	خطای استاندارد میانگین
SK	در این جا $x_i$ مقادیر ارتفاعی پیکسل‌های داخل هر پلات است. $\frac{\sum_i^n (x_i - ME)^3}{N} / \left[ \frac{\sum_i^n (x_i - ME)^2}{N} \right]^{1.5}$	چولگی
KU	$\frac{\sum_i^n (x_i - ME)^4}{N} / \left[ \frac{\sum_i^n (x_i - ME)^2}{N} \right]^2$	کشیدگی

ارزیابی مدل‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش اعتبارسنجی تقاطعی<sup>۱</sup> (افرون و تیشیرانی<sup>۲</sup>، ۱۹۹۳) انجام شد. دو شاخص خطای استاندارد تخمین<sup>۳</sup> (SEE) و ضریب تشخیص<sup>۴</sup> ( $R^2$ ) برای مقایسه عملکرد هریک از مدل‌های به‌دست‌آمده برای داده‌های لیدار و اپتیک مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه بر این خطای مربوط به تخمین داده‌ها از طریق تقسیم مقادیر خطای استاندارد تخمین (SEE) برای هر یک از پارامترهای ساختاری بر مقدار میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای آن پارامتر (جدول ۱) و ضرب حاصل آن در عدد ۱۰۰ به درصد محاسبه گردید. به منظور مقایسه آماری عملکرد مدل‌های حاصل از داده‌های لیدار و مدل‌های حاصل از هر یک از داده‌های اپتیک از آزمون تی استیودنت<sup>۵</sup> (آزمون تی نمونه‌های جفت شده<sup>۶</sup>) استفاده شد. این آزمون بر مقادیر مطلق باقی‌مانده<sup>۷</sup> (بدون در نظر گرفتن این‌که مقادیر مثبت و یا منفی است)، حاصل از اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای ساختاری و مقادیری که توسط هریک از مدل‌ها برای هریک از پارامترهای ساختاری برآورد شده اعمال گردید. در این تحقیق از دو نوع آزمون تی استیودنت<sup>۸</sup> شامل آزمون تی نمونه‌های جفت شده<sup>۹</sup> و آزمون تی نمونه‌های مستقل<sup>۱۰</sup> جهت بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصله استفاده شد. جهت مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های به‌دست‌آمده از داده‌های تک زمانه با مدل‌های به‌دست‌آمده از داده‌های دو زمانه، آزمون تی نمونه‌های جفت شده بر مقادیر مطلق باقی‌مانده<sup>۱۱</sup> (بدون در نظر گرفتن این‌که مقادیر مثبت و یا منفی است) حاصل اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای ساختاری و مقادیر برآورد شده آن‌ها اعمال گردید.

## ۵. نتایج

جدول ۳ مدل‌هایی را که بهترین عملکرد را برای تخمین پارامترهای مختلف ساختاری جنگل با استفاده از داده‌های مختلف سنجش از دور در این تحقیق داشته نشان می‌دهد.

1. Leave-one-out cross-validation
2. Efron and Tibshirani
3. Standard error of estimation
4. Correlation of determination
5. Student's t-test
6. Paired-samples t-test
7. Absolute residual values
8. Student's t-test
9. Paired-samples t-test
10. Independent-samples t-test
11. Absolute residual values

جدول ۴ نشان‌دهنده مقادیر ضریب تعیین، خطای استاندارد تخمین و خطای برآورد حاصل از تخمین پارامترهای ساختاری جنگل با استفاده از مدل‌های انتخاب شده است.

جدول ۳. مدل‌هایی با بهترین عملکرد به منظور تخمین پارامترهای ساختاری جنگل

مدل انتخاب شده	داده سنجش از دور	پارامتر ساختاری
$+5/12 (SK) - 2/71 (VAR_{AM}) + 0/0003 (90^{th} \text{ percentile}) + 0/007$	لیدار	ارتفاع متوسط
$-18/37 (CONd0w3B1-7) + 6588 (MEd0w9P8) + 273/4 (DISSd0w3B1-5) + 42/0 (CORd135w3B2-4) - 4584 (MEd90w5P6) + 16/29 (CORd135w9B6-8) + 9/83 (CORd135w9P4) + 15/85$	وردیو-۲	قطر تنه
$-0/296 (60^{th} \text{ percentile}) - 0/309 (30^{th} \text{ percentile}) - 200/3 (ME_{AM}) + 0/387$	لیدار	حجم درختان
$-0/296 (60^{th} \text{ percentile}) - 0/309 (30^{th} \text{ percentile}) - 200/3 (ME_{AM}) + 0/387$	لیدار	رویه سطح
$-407327 (CONd0w3B6) - 16000 (CONd135w9B1-5) - 941/1 (CORd135w5B7-8) - 1979/9 (CORd0w5P4) + 6957 (CONd0w3B1-7) - 662/6 (CORd0w3P8) + 1876$	وردیو-۲	تراکم درختان

تذکر در جدول ۳ شاخص‌های بافتی به صورت  $HHdXwXY$  نشان داده شده که در آن  $HH$  نشان‌دهنده نوع شاخص بافتی،  $dX$  نشان‌دهنده زاویه‌ای که در آن شاخص بافتی محاسبه شده است.  $wX$  اندازه پنجره را نشان می‌دهد و  $Y$  نشان‌دهنده نوع داده‌ای که برای آن شاخص بافتی محاسبه شده است (برای نمونه  $P8$  نشان‌دهنده مؤلفه اصلی ۸،  $B1$  نشان‌دهنده باند ۱ و  $B1-5$  نسبت باندی باندهای ۱ و ۵ است).

جدول ۴. نتایج حاصل از برآورد پارامترهای ساختاری با استفاده از داده‌های لیدار و تصاویر اپتیک

پارامتر ساختاری	داده سنجش از دور	تخمین پیش از اعتبارسنجی	تخمین پس از اعتبارسنجی
-----------------	------------------	-------------------------	------------------------

خطای برآورد (%)	SEE	R <sup>2</sup>	SEE	R <sup>2</sup>		
۱۳/۰ ۸/۰ ۵/۷	۳/۱۳ ۱/۹۲ ۱/۳۶	۰/۷۵۴ ۰/۹۰۴ ۰/۹۴۶	۲/۶۲ ۱/۶۰ ۱/۲۶	۰/۸۲۶ ۰/۹۳۳ ۰/۹۵۴	اسپات-۵ وردویو-۲ لیدار	ارتفاع متوسط (متر)
۱۷/۱ ۱۳/۷ ۱۷/۷	۵/۱۴ ۴/۱۳ ۵/۳۲	۰/۷۶۸ ۰/۸۴۱ ۰/۷۰۳	۴/۱۹ ۳/۴۰ ۵/۱۷	۰/۸۴۴ ۰/۸۸۹ ۰/۷۱۹	اسپات-۵ وردویو-۲ لیدار	قطر تنه (سانتی متر)
۳۰/۲ ۳۰/۳ ۲۱/۸	۸۹/۳ ۸۹/۸ ۶۴/۴	۰/۵۹۹ ۰/۵۵۹ ۰/۷۶۲	۷۴/۹ ۸۰/۲ ۵۸/۳	۰/۷۱۲ ۰/۶۴۴ ۰/۸۰۵	اسپات-۵ وردویو-۲ لیدار	حجم درختان (مترمکعب در هکتار)
۲۳/۱ ۲۲/۹ ۲۰/۳	۷/۷۹ ۷/۷۳ ۶/۸۵	۰/۵۷۷ ۰/۵۲۵ ۰/۶۱۹	۶/۲۹ ۷/۱۰ ۶/۴۵	۰/۷۱۷ ۰/۵۹۶ ۰/۶۶۱	اسپات-۵ وردویو-۲ لیدار	رویه سطح (متر مربع در هکتار)
۳۷/۳ ۲۵/۴ ۳۹/۳	۲۲۲ ۱۵۱ ۲۳۴	۰/۷۳۷ ۰/۸۵۳ ۰/۶۱۷	۱۵۲ ۱۳۱ ۲۲۴	۰/۸۶۱ ۰/۸۸۸ ۰/۶۴۸	اسپات-۵ وردویو-۲ لیدار	تراکم درختان (درخت در هکتار)

علاوه بر این برای مقایسه آماری نتایج به دست آمده از داده های مختلف سنجش از دور، آزمون تی نمونه های جفت شده نیز بر نتایج حاصل از مدل ها پس از اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت که نتایج حاصل از این آزمون آماری در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس جدول ۴ مدل های به دست آمده از داده های لیدار و وردویو-۲ قادر به نشان دادن بیش از ۹۰٪ تغییرات ارتفاع میانگین درختان است. این در حالی است که مدل تخمین ارتفاع میانگین حاصل از داده اسپات-۵ تنها ۷۵٪ تغییرات ارتفاع میانگین را بیان می نماید. در این میان با توجه به جدول های ۴ و ۵ تخمین ارتفاع میانگین با استفاده از مدل حاصل از داده های لیدار دارای دقت به مراتب بالاتری نسبت به تخمین این پارامتر توسط مدل های حاصل از داده های اسپات-۵ و وردویو-۲ بوده و این تفاوت از نظر آماری معنادار است. با توجه به نتایج حاصله تخمین ارتفاع میانگین با استفاده از داده های وردویو-۲ از نظر آماری به مراتب دقیق تر از تخمینی است که از داده های اسپات-۵ به دست می آید.

**جدول ۵.** مقادیر پی- مقدار حاصل از آزمون تی نمونه های جفت شده جهت مقایسه نتایج حاصل از مدل های مبتنی بر داده های مختلف سنجش از دور

لیدار	وردویو-۲	اسپات-۵	مدل های حاصل از	پارامتر
-------	----------	---------	-----------------	---------

ساختاری	داده‌های سنجش از دور		
ارتفاع میانگین	اسپات-۵	_____	۰/۰۰۲
	وردیو-۲	۰/۰۰۲	_____
	لیدار	۰/۰۰۰	۰/۰۲۳
قطر تنه	اسپات-۵	_____	۰/۰۷۶
	وردیو-۲	۰/۰۷۶	_____
	لیدار	۰/۶۶۹	۰/۰۲۳
حجم درختان	اسپات-۵	_____	۰/۴۷۷
	وردیو-۲	۰/۴۷۷	_____
	لیدار	۰/۱۱۵	۰/۰۰۴
رویه سطح	اسپات-۵	_____	۰/۹۴۳
	وردیو-۲	۰/۹۴۳	_____
	لیدار	۰/۳۶۶	۰/۳۳۱
تراکم درختان	اسپات-۵	_____	۰/۰۷۰
	وردیو-۲	۰/۰۷	_____
	لیدار	۰/۲۵۹	۰/۰۰۳

تذکر درجه آزادی برای تمامی آزمون‌ها ۶۰ است.

با توجه به جدول ۴، ۸۴٪ تغییرات قطر تنه درختان با استفاده از داده‌های وردیو-۲ قابل بیان بوده و از این نظر عملکرد بهتری را از نظر آماری نسبت به داده‌های لیدار (پی-مقدار: ۰/۰۲۳) دارند. هرچند تفاوت معناداری بین عملکرد اسپات-۵ و وردیو-۲ در رابطه با تخمین قطر تنه درختان وجود ندارد (پی-مقدار: ۰/۰۷۶). مدل حاصل از داده‌های وردیو-۲ قادر به برآورد تراکم درختان با ضریب تعیین ۰/۸۵ است. دقت تخمین تراکم درختان با استفاده از داده‌های وردیو-۲ نسبت به داده‌های لیدار به صورت معناداری بهتر است (پی-مقدار: ۰/۰۰۳)، هر چند که تفاوت معناداری بین عملکرد داده‌های اسپات-۵ و وردیو-۲ برای برآورد تراکم درختان وجود ندارد (پی-مقدار: ۰/۰۷). همان‌گونه که در جدول ۴ نشان داده شده است، ۷۶٪ تغییرات حجم درختان توسط داده‌های لیدار بیان می‌شود که از این حیث نسبت به سایر داده‌های سنجش از دور دارای عملکرد بهتری است. اگرچه تفاوت معنی‌داری بین دقت به‌دست‌آمده با استفاده از داده‌های لیدار و داده‌های اسپات-۵ برای تخمین حجم درختان وجود ندارد (پی-مقدار: ۰/۱۱۵)، همچنین نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که تخمین رویه سطح درختان با استفاده از داده‌های لیدار تا حدودی بهتر از سایر داده‌های سنجش از دور انجام

می شود، هرچند نتایج جدول ۵ عدم وجود تفاوت معنی دار بین این سه دسته داده سنجش از دور را برای تخمین رویه سطح نشان می دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۴ تمامی مدل های حاصل از داده های مختلف سنجش از دور قادر به تخمین ارتفاع میانگین و قطر تنه درختان با دقتی بهتر از دقت استاندارد آماربرداری جنگل (۱۵٪-۲۰٪) است. هرچند در این میان مقادیر مربوط به ارتفاع میانگین درختان با دقت بهتری (خطای برآورد کمتر از ۱۳٪) نسبت به قطر تنه درختان (خطای برآورد کمتر از ۱۸٪) تخمین زده شده اند. نتایج نشان می دهد که تراکم درختان (خطای برآورد تا ۳۹٪) و پس از آن حجم درختان (خطای برآورد تا ۳۰٪) از جمله پارامترهای ساختاری است که تخمین آن ها با خطای به مراتب بیشتری نسبت به سایر پارامترهای ساختاری انجام شده است. به منظور تحلیل نتایج به دست آمده در این تحقیق رابطه بین پارامترهای مختلف ساختاری جنگل مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج مربوط به آن در جدول ۶ نشان داده شده است. براساس جدول ۶ سن درختان با ارتفاع میانگین و قطر درختان دارای همبستگی بالایی است.

جدول ۶. مقادیر ضرایب همبستگی بین پارامترهای ساختاری جنگل در منطقه مورد مطالعه

پارامتر ساختاری	ارتفاع میانگین	قطر درختان	حجم درختان	رویه سطح	تراکم درختان	سن درختان
ارتفاع میانگین	۱/۰۰	۰/۸۳۸	۰/۵۹۴	۰/۱۹۷°	۰/۶۹۴	۰/۹۱۲
قطر درختان	۰/۸۳۸	۱/۰۰	۰/۲۶۵	۰/۰۵۵°	۰/۸۷۲	۰/۸۴۸
حجم درختان	۰/۵۹۴	۰/۲۶۵	۱/۰۰	۰/۸۶۲	۰/۰۰۰°	۰/۵۸۶
رویه درختان	۰/۱۹۷°	۰/۰۵۵°	۰/۸۶۲	۱/۰۰	۰/۳۶۵	۰/۲۶۵
تراکم درختان	۰/۶۹۴	۰/۸۷۲	۰/۰۰۰°	۰/۳۶۵	۱/۰۰	۰/۶۹۳
سن درختان	۰/۹۱۲	۰/۸۴۸	۰/۵۸۶	۰/۲۶۵	۰/۶۹۳	۱/۰۰

تذکر \* نشان دهنده همبستگی بین پارامترهایی است که در سطح ۰/۰۵ معنی دار نیست. سایر روابط در سطح ۰/۰۵ معنی دار است.



همبستگی سن درختان با تراکم درختان، حجم درختان و رویه سطح درختان چندان بالا نیست. همبستگی بالای سن درختان با میانگین ارتفاع و قطر درختان به دلیل درو شدید در این جنگل دست کاشت بوده که منجر به عدم رسیدن بیشتر درختان به سنین بالا شده است. در صورت مقایسه جدول ۶ با جدول ۴ می‌توان دریافت تخمین ارتفاع میانگین درختان با استفاده از سن درختان می‌تواند به مراتب بهتر از استفاده از داده‌های اسپات-۵ باشد. همچنان نتایج حاصل از داده‌های لیدار و وردویو-۲ نسبت به سن درختان می‌تواند دقت بهتری را در رابطه با ارتفاع میانگین درختان ارائه دهد. استفاده از داده‌های مختلف سنجش از دور برای تخمین سایر پارامترهای ساختاری به مراتب بهتر از استفاده از داده‌های مربوط به سن درختان است. سه دلیل اصلی تراکم، حجم و سطح رویه درختان را می‌توان برای عدم وجود همبستگی بالا بین سن و پارامترهای ساختاری بیان نمود. اول ممکن است عوامل مختلفی از قبیل مرگ درختان، آفت‌های درختی، خشکی، طوفان، در درو درختان نقش داشته باشد و این عوامل معمولاً مستقل از سن درختان است. دوم درختان معمولاً با توجه به نیاز بازار قطع می‌گردند و این خود موجب می‌شود تا گاهی به سن درختان در رابطه با درو آن‌ها توجهی نشود. سومین دلیل می‌تواند به رویش دوباره درختان به صورت طبیعی و در بین درختان دیگر اشاره کرد که این امر منجر به ایجاد بخش‌هایی در جنگل می‌گردد که دارای درختانی با سنین مختلف است.

## ۶. بحث

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق جنگل تک‌گونه‌ای (*Pinus radiata*) است. مقایسه داده‌های سنجش از دور بر جنگلی تک‌گونه‌ای این امکان را فراهم می‌آورد تا با توجه به عدم اختلاط گونه ای در منطقه مورد مطالعه تنها قابلیت داده‌های سنجش از دور مورد بررسی و مقایسه قرار داده شود (لوتز<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸).

### ۶-۱- اهمیت خصیصه‌ها

در این تحقیق خصیصه‌های مختلفی از داده‌های CHM و نیز داده‌های اپتیک استخراج شد و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. روش انتخاب خصیصه گام به گام به عنوان روشی متداول برای انتخاب خصیصه‌های ورودی به مدل‌های نهایی استفاده شد و به همین دلیل خصیصه‌هایی که در مدل نهایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند می‌تواند به عنوان خصیصه‌هایی در نظر گرفته شوند که به دلیل اهمیت بیشتر و عملکرد بهتر توسط روش گام به گام انتخاب

1. Lutz

شده‌اند. با توجه به بهترین مدل‌های به‌دست‌آمده برای تخمین پارامترهای ساختاری با استفاده از داده‌های لیدار که برخی از آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است، بیشترین تعداد خصیصه‌های مستخرج از CHM که در مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت، خصیصه‌هایی بود که مربوط به قسمت فوقانی تاج پوشش جنگل است؛ از آن جمله می‌توان به  $VAR_{AM, 90^{th}}$  percentile و  $ME_{AM}$  اشاره کرد. دلیل اهمیت این خصیصه‌ها در تخمین پارامترهای ساختاری جنگل وجود نویز در خصیصه‌هایی است که مربوط به بخش‌های تحتانی جنگل است. در واقع خصیصه‌های مربوط به قسمت‌های کم ارتفاع تاج پوشش مانند خصیصه‌هایی که با استفاده از تمامی پیکسل‌های CHM محاسبه شده‌اند، می‌توانند تحت تأثیر پوشش‌های تحتانی جنگل نظیر بوته‌ها و درختچه‌های زیر تاج پوشش قرار گرفته و به همین دلیل اعداد ارتفاعی مربوط به این پیکسل‌ها، اعداد ارتفاعی تاج پوشش درختان محسوب نمی‌شود، در حالی که محاسبه خصیصه‌ها بر اساس پیکسل‌هایی که ارتفاعی بالاتر از مقدار میانگین دارند، به برطرف شدن این مسأله کمک کرده و همان‌گونه که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد می‌تواند خصیصه‌هایی با اهمیت بالاتر برای تخمین پارامترهای ساختاری ایجاد کند.

در رابطه با خصیصه‌های GLCM مستخرج از تصاویر اپتیک که در تحقیقات انجام شده توسط کاییتاکر و همکاران (۲۰۰۶) و شمس‌الدینی و همکاران (۲۰۱۳) عنوان شده است، نوع لایه طیفی که خصیصه‌های بافتی از آن استخراج شده‌اند، بر عملکرد این شاخص‌های بافتی تأثیرگذار است. نسبت‌های باندی به‌دست‌آمده از باندهای حساس به پوشش گیاهی مانند مادون قرمز نزدیک و باندهای غیرحساس به پوشش گیاهی مانند باند آبی می‌تواند تا حدود زیادی تأثیراتی که مرتبط با خصوصیات گیاهان نیستند را کاهش دهند (گانو و همکاران، ۲۰۰۰). با توجه به جدول ۳ شاخص‌های بافتی مستخرج از نسبت‌های طیفی به مراتب بیش از شاخص‌های بافتی مستخرج از سایر لایه‌های طیفی در مدل‌های نهایی تخمین پارامترهای ساختاری جنگل انتخاب و استفاده شده است. با توجه به جدول ۳ از میان شاخص‌های بافتی GLCM شاخص همبستگی بیش از سایر شاخص‌های بافتی در مدل‌های نهایی توسط روش انتخاب خصیصه گام به گام مورد استفاده قرار گرفت. شاخص همبستگی در واقع وابستگی خطی پیکسل‌های همسایه را اندازه‌گیری می‌کند و با تغییر اندازه پنجره و جهت نتایج حاصل از آن تغییر زیادی می‌نماید (کاییتاکر و همکاران، ۲۰۰۶). این شاخص با سایر شاخص‌های GLCM همبستگی چندانی ندارد؛ خصیصه همبستگی با اندازه پنجره‌ها و جهت‌های متفاوت می‌تواند به عنوان خصیصه‌هایی مکمل در مدل‌ها در کنار هم و نیز در کنار سایر خصیصه‌های GLCM عمل نماید. عملکرد خوب شاخص همبستگی در تحقیقات گذشته از جمله کاییتاکر و همکاران (۲۰۰۶) برای تخمین پارامترهای ساختاری جنگل کاج با استفاده از تصاویر

ایکونوس-۲ نشان داده شده است. به این نکته باید توجه نمود که با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق عملکرد این شاخص برای تصاویر با قدرت تفکیک مکانی کمتر نظیر داده‌های اسپات-۵ که در آن‌ها بافت تصویر کمتر به اندازه و خصوصیات شکلی تک درختان وابسته است می‌تواند تا حدودی متفاوت باشد.

#### ۶-۲- تخمین پارامترهای ساختاری

همان‌گونه که در بخش نتایج نشان داده شد به طور کلی ارتفاع میانگین درختان نسبت به سایر پارامترهای ساختاری با دقت بالاتری تخمین زده شد. براساس جدول ۴ داده‌های لیدار و وردیو-۲ نسبت به داده‌های اسپات-۵ عملکرد بهتری را برای تخمین ارتفاع میانگین درختان داراست. عملکرد بهتر داده‌های لیدار نسبت به سایر داده‌های سنجش از دور به منظور برآورد ارتفاع میانگین درختان در تحقیقات پیشین نیز نشان داده شده است (هاید و همکاران، ۲۰۰۶؛ اودی و ماسکال، ۲۰۱۰). دلیل عملکرد بهتر لیدار نسبت به سایر داده‌های سنجش از دور به فیزیک برداشت این داده‌ها مربوط است، چرا که این داده‌ها به صورت مستقیم اقدام به اندازه‌گیری ارتفاع عوارض سطح زمین مانند ارتفاع درختان می‌کند. عملکرد بهتر داده‌های وردیو-۲ نسبت به داده‌های اسپات-۵ به منظور اندازه‌گیری ارتفاع میانگین می‌تواند به دلایل متفاوتی باشد. والدر و همکاران (۱۹۹۸) دو دلیل را برای عملکرد بهتر داده‌های بافتی مستخرج از تصاویر با قدرت تفکیک بالا (نظیر وردیو-۲) نسبت به داده‌های بافتی مستخرج از تصاویر با قدرت تفکیک پایین‌تر (نظیر اسپات-۵) بیان می‌کند؛ به عنوان دلیل اول می‌توان اطلاعات ساختاری به نسبت کمی را که تصاویر با قدرت تفکیک پایین ارائه می‌دهند را یاد نمود که خود منجر به کاهش تغییرات پیکسل‌ها تحت تأثیر تغییرات ساختاری جنگل در سطح یک منطقه می‌شود. دلیل دوم می‌تواند مربوط به این مسأله باشد که در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتر معمولاً تاج پوشش تک درخت‌ها در بیش از یک پیکسل قرار می‌گیرند و تغییرات داخل تاج پوشش و در نتیجه تفاوت‌های بافتی تاج پوشش بهتر نمایش داده می‌شود؛ در حالی که درختان به صورت مجزا در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین قابل تشخیص نیستند، همچنین سانگ و وودکوک<sup>۳</sup> (۲۰۰۲) در تحقیق خود به این مسأله اشاره کردند که تغییرات بافتی تاج پوشش درختان قابل شناسایی در تصاویر اپتیک با مرحله رشد درختان در ارتباط است. براساس جدول ۶ همبستگی بالایی بین سن درختان و ارتفاع متوسط درختان در این

2. IKONOS-2

3. Song and Woodcock

جنگل کاج وجود دارد. با توجه به این مطلب خصوصیات بافتی تصاویر اپتیک، به ویژه تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا قادر به تخمین میانگین ارتفاع درختان بهتر از سایر پارامترهای ساختاری است. مطالعات دیگر نیز دقت بالاتر تخمین ارتفاع میانگین درختان را در مقایسه با دیگر پارامترهای ساختاری تأیید می‌کند (هیپیا و همکاران، ۲۰۰۰؛ کاییتاکر و همکاران، ۲۰۰۶؛ ارودی و ماسکال، ۲۰۱۰).

نتایج این مقاله نشان داد که داده‌های وردیو-۲ بهتر از سایر داده‌های سنجش از دور قطر درختان را تخمین می‌زند. دلیل این عملکرد بهتر می‌تواند مرتبط با رابطه تغییرات قطر درختان و تغییرات قطر تاج پوشش درختان باشد. مقادیر قطر تاج پوشش رابطه محکمی با سایر پارامترهای ساختاری خصوصاً قطر درختان در یک جنگل تک‌گونه‌ای کاج دارد (گیل<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۰؛ پوپسکو<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). تغییرات مربوط به تاج پوشش درختان در تغییرات بافتی مستخرج از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا نظیر وردیو-۲ قابل تشخیص است و این درحالی است که داده‌های اسپات-۵ به دلیل قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر دارا قابلیت کمتری در این رابطه است. با توجه به جدول ۴ داده‌های لیدار عملکرد ضعیف‌تری برای تخمین قطر درختان در مقایسه با داده‌های وردیو-۲ داشتند. در یک جنگل کاج با گونه *Pinus radiata* همبستگی میان ارتفاع و قطر درختان با افزایش سن درختان به بیش از ۲۰ سال رو به کاهش می‌گذارد. در درختانی که بالای ۲۰ سال سن دارند رشد عمودی درخت کاهش می‌یابد، ولی قطر درختان همچنان درحال افزایش است (وندر کالف و کیمبرلی<sup>۶</sup>، ۲۰۱۳). معمولاً یک رابطه غیرخطی برای برقراری ارتباط بین ارتفاع درختان این گونه کاج و قطر آن‌ها توصیه می‌شود (بی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). به نظر می‌رسد که رابطه خطی بین داده‌های ارتفاعی حاصل از لیدار و قطر درختان نمی‌توان به صورت مؤثری برای تخمین مقادیر قطر درختان به ویژه درختان بالای ۲۰ سال سن عمل نماید.

جدول ۶ نشان می‌دهد که همبستگی کمی بین تراکم درختان و میانگین ارتفاع آن‌ها وجود دارد. دلیل این مسأله عدم وجود رابطه بین ارتفاع درختان *Pinus radiata* و تراکم این درختان است (مگوییچ<sup>۸</sup>، ۱۹۹۴). علاوه بر این درجات متفاوت درو کردن درختان در نقاط مختلف جنگل موجب کاهش بیشتر همبستگی بین ارتفاع میانگین و تراکم درختان می‌شود.

4. Gill

5. Popescu

6. Van der Colff and Kimberley

7. Bi

8. Madgwick

رابطه ضعیف بین تراکم و میانگین ارتفاع درختان می‌تواند به تضعیف عملکرد داده‌های لیدار برای تخمین تراکم درختان انجامد. عملکرد ضعیف داده‌های لیدار برای تخمین تراکم درختان می‌تواند تا حد بسیاری به تراکم پایین نقاط لیدار و نیز به اندازه تاج پوشش درختان مرتبط باشد. تراکم پایین داده‌های لیدار و نیز اندازه کوچک تاج پوشش برخی از درختان سبب می‌شود تا برخی از این درختان در CHM قابل تشخیص نباشند.

در این تحقیق حجم درختان و رویه سطح نسبت به سایر پارامترها با ضریب تعیین پایین‌تری تخمین زده شدند که این نتایج با نتایج حاصله در سایر تحقیقات گذشته نیز مطابقت داشت (تروت<sup>۹</sup> و همکاران، ۱۹۹۷؛ پوپسکو و همکاران، ۲۰۰۴؛ کاپیتاکر و همکاران، ۲۰۰۶). در این تحقیق خطای تخمین این دو پارامتر نسبت به خطای تخمین تراکم درختان کمتر بود. برخی از محققین بر این عقیده‌اند که رابطه بین داده‌های لیدار و حجم درختان در سطوح بالاتری از حجم و توده سبز به اشباع می‌رسد، ولی نقطه اشباع برای داده‌های اپتیک پایین‌تر است (لفسکی<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۱۹۹۹؛ اسنر<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۳) و این مسأله می‌تواند عملکرد بهتر داده‌های لیدار نسبت به سایر داده‌های سنجش از دور را توجیه نماید (جدول ۴). قابلیت داده‌های اپتیک در تخمین پارامترهای مرتبط با تراکم مانند حجم و رویه سطح درختان می‌تواند در یک جنگل دست کاشت تحت تأثیر عملیات بهره‌برداری نیز قرار گیرد. همان‌گونه که کاپیتاکر و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند خصوصیات بافتی مستخرج از داده‌های اپتیک به ویژه داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی بالا قادر به تخمین پارامترهای ساختاری مرتبط با تراکم نیستند. در حقیقت عملیات درو کردن درختان ابتدایی‌ترین ابزاری است که توسط مدیران جنگل به منظور تغییر پارامترهای ساختاری وابسته با تراکم درختان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عملیات مدیریتی در واقع منجر به ایجاد بخش‌هایی در یک جنگل می‌شود که از نظر خصوصیات بافتی بر تصویر متفاوت بوده که می‌تواند حاصل عواملی نظیر سن درخت، قطر تاج، ارتفاع درخت، تراکم درختان و فضاهای خالی بین درختان باشد، ولی از نظر حجم درختان و یا رویه سطح ممکن است تفاوت چندانی با هم نداشته باشند. این مسأله می‌تواند به صورت بالعکس نیز رخ دهد. توجه به این نکته ضروری است که تأثیر عناصر بافتی بالا بیشتر بر ارزش‌های پیکسل‌هایی با قدرت تفکیک مکانی بالا بوده و کمتر بر پیکسل‌هایی با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر تأثیر می‌گذارند، زیرا مقادیر ارزش‌های روشنایی ثبت شده در پیکسل‌هایی با قدرت تفکیک پایین‌تر مجموعه‌ای از مقادیر ارزش‌های روشنایی پوشش‌های گیاهی و

9. Trotter

10. Lefsky

11. Asner

پس‌زمینه<sup>۱۲</sup> است. در نتیجه بافت پلات‌های گردآوری شده از بخش‌های مختلف جنگل در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر دارای ثبات بیشتری نسبت به آن چیزی است که در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتر ثبت می‌گردد (والدر و همکاران، ۲۰۰۴). تخمین حجم درختان با ضریب تعیین بالاتر توسط داده‌های بافتی حاصل از اسپات-۵ نسبت به داده‌های وردویو-۲ می‌تواند به این دلیل باشد.

## ۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی قابلیت داده‌های سنجش از دور شامل تصاویر وردویو-۲، اسپات-۵ و لیدار برای تخمین پارامترهای ساختاری جنگل کاج پرداخته شد. نتایج حاصل از این تحقیق به اقتصار به شرح زیر است.

- داده‌های لیدار نسبت به سایر داده‌های مورد استفاده در این تحقیق برای تخمین حجم و ارتفاع میانگین درختان مناسب‌تر است.
- جهت تخمین قطر و تراکم درختان استفاده از داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی بالا نظیر وردویو-۲ ارجحیت دارد.
- در برآورد سطح رویه درختان با توجه به هزینه پایین‌تر و نیز دسترسی آسان‌تر به داده استفاده از داده‌های اسپات-۵ می‌تواند در اولویت قرار گیرد، تفاوت آماری معنی‌داری بین استفاده از این داده‌ها و داده‌های دیگر نظیر لیدار و وردویو-۲ وجود ندارد.
- در میان پارامترهای ساختاری جنگل، ارتفاع میانگین درختان با دقتی به مراتب بیشتر از سایر پارامترها تخمین زده شد و خطای برآورد این پارامتر بین ۵/۷ درصد (با استفاده از داده‌های لیدار) تا ۱۳٪ (با استفاده از داده‌های اسپات-۵) متغیر بود. داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر نظیر وردویو-۲ می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به داده‌های اسپات-۵ با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر داشته باشند.
- قطر درختان اگرچه با دقتی کمتر از ارتفاع میانگین تخمین زده شد، ولی همچنان خطای تخمین این پارامتر با استفاده از داده‌های سنجش از دور با توجه به خطای استاندارد آماربرداری جنگل قابل قبول بوده و از ۱۳/۷ درصد (با استفاده از داده‌های وردویو-۲) تا ۱۷/۷ درصد (با استفاده از داده‌های لیدار) متغیر بود.
- پارامترهای ساختاری مرتبط با تراکم شامل حجم، رویه سطح و تراکم درختان به مراتب با خطای بالاتری نسبت به پارامترهایی نظیر ارتفاع میانگین و قطر درختان تخمین زده

می‌شوند. در این میان رویه سطح درختان با خطایی بین ۲۰/۳ تا ۲۳/۱ درصد بهتر از سایر پارامترهای مرتبط با تراکم تخمین زده شد، در حالی که تراکم درختان با خطایی بین ۲۵/۴ تا ۳۹/۳ درصد دارای کمترین دقت برآورد بود.

- عدم برآورد پارامترهای ساختاری مرتبط با تراکم با خطایی کمتر از خطای استاندارد آماربرداری جنگل (۱۵٪-۲۰٪) با استفاده از داده‌های مختلف سنجش از دور، لزوم ترکیب داده‌های سنجش از دور و بهره‌گیری از دو یا بیش از دو داده متفاوت سنجش از دور را به منظور دستیابی به دقت‌های بالاتر نشان می‌دهد که باید در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

## ۸. منابع

- شمس‌الدینی، علی، «برآورد ساختار جنگل کاج با استفاده از تصاویر راداری»، *مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ش ۱، صص ۵۳-۷۸، ۱۳۹۵.
- Asner, G. P., Bustamante, M. M. C. & Townsend, A. R. (2003), "Scale dependence of biophysical structure in deforested areas bordering the Tapajós National Forest, Central Amazon", *Remote Sensing of Environment*, 87(4), 507-520.
- Bi, H., Fox, J. C., Li, Y., Lei, Y., & Pang, Y. (2012), "Evaluation of nonlinear equations for predicting diameter from tree height", *Canadian Journal of Forest Research*, 42(4), 789-806.
- Boyd, D. S., & Danson, F. M. (2005), "Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development", *Progress in Physical Geography*, 29(1), 1-26.
- Dean, T. J., Cao, Q. V., Roberts, S. D., & Evans, D. L. (2009), "Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature, even-aged loblolly pine stand", *Forest Ecology and Management*, 257(1), 126-133.
- Efron, E., & Tibshirani, R. (1993), *An Introduction to the Bootstrap*. New York: Chapman & Hall.
- Erody, T. L., & Moskal, L. M. (2010), "Fusion of LiDAR and imagery for estimating forest canopy fuels", *Remote sensing of environment*, 114(4), 725-737.
- Eyles, A., Robinson, A. P., Smith, D., Carnegie, A., Smith, I., Stone, C. (2011), "Quantifying stem growth loss at the tree-level in a *Pinus radiata* plantation to repeated attack by the aphid, *Essigella californica*", *Forest ecology and management*, 261(1), 120-127.

- 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.
- Gill, S. J., Biging, G. S., & Murphy, E. C. (2000), "Modeling conifer tree crown radius and estimating canopy cover", *Forest ecology and management*, 126(3), 405-416.
- Harris, R. J. (1985), *A primer of multivariate statistics*, New York: Academic Press.
- Holmgren, P., & Thuresson, T. (1998), "Satellite remote sensing for forestry planning. A review", *Scandinavian journal of forest research*, 13(1-4), 90-110.
- Hyde, P., Dubayah, R., Walker, W., Blair, J. B., Hofton, M., & Hunsaker, C. (2006), "Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy", *Remote sensing of environment*, 102(1-2), 63-73.
- 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(1-2), 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(3-4), 390-401.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A. & Harding, D. (1999), "LiDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests", *Remote sensing of environment*, 70(3), 339-361.
- Le Toan, T., Shaun, Q., Woodward, I., Lomas, M., Delbart, N., & Picard, G. (2004), "Relating RADAR remote sensing of biomass to modelling of forest carbon budgets", *Climate change*, 67, 379-402.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., & Flood, M. (2003), "LiDAR remote sensing of forest structure", *Progress in physical geography*, 27(1), 88-106.
- Linder, S., Benson, M., Myers, B., & Raison, R. (1987), "Canopy dynamics and growth of Pinus radiata: I. Effects of irrigation and fertilization during a drought", *Canadian journal of forest research*, 17(10), 1157-1165.



- Lu, D. (2005), "Above-ground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon", *International journal of remote sensing*, 26(12), 2509 - 2525.
- Lutz, D. A., Washington-Allen, R. A. & Shugart, H. H. (2008), "Remote sensing of boreal forest biophysical and inventory parameters: a review", *Canadian journal of remote sensing*, 34(S2), 286-313.
- Madgwick, H. A. I. (1994), *Pinus radiata: Biomass, form, and growth*. Rotorua, Madgwick.
- Næsset, E. (1997), "Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data", *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 52(2), 49-56.
- Neumann, M., Ferro-Famil, L., & Reigber, A. (2010), "Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multi-baseline polarimetric interferometric SAR data", *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 48(3), 1086-1104.
- Nilsson, M. (1996), "Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system", *Remote sensing of environment*, 56(1), 1-7.
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Nelson, R. F. (2003), "Measuring individual tree crown diameter with LiDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass", *Canadian journal of remote sensing*, 29(5), 564-577.
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Scriver, J. A. (2004), "Fusion of small-footprint LiDAR and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA", *Forest science*, 50(4), 551-565.
- Riano, D., Chuvieco, E., Salas, J., & Aguado, I. (2003), "Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types", *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 41(5), 1056-1061.
- Roberts, J. W., Van Aardt, J. A. N., & Ahmed, F. B. (2011), "Image fusion for enhanced forest structural assessment", *International journal of remote sensing*, 32(1), 243-266.
- Shamsoddini, A. (2016), "Pine forest structural parameter retrieval using radar images", *The journal of spatial planning*, 20(1), 53-78. [In Persian]

- 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.
- Shamsoddini, A., Trinder, J. C., & Turner, R. (2013a), "Pine plantation structure mapping using WorldView-2 multispectral image", *International journal of remote sensing*, 34, 3986-4007.
- Shamsoddini, A., Turner, R. & Trinder, J. C. (2013b) "Improving LiDAR-based forest structure mapping with crown-level pit removal", *Journal of spatial science*, 58, 29-51.
- Song, C. (2007), "Estimating tree crown size with spatial information of high resolution optical remotely sensed imagery", *International journal of remote sensing*, 28(15), 3305-3322.
- Song, C. & Woodcock, C. E. (2002), "The spatial manifestation of forest succession in optical imagery: The potential of multiresolution imagery", *Remote sensing of environment*, 82(2-3), 271-284.
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001), "Classification and change detection using Landsat TM Data: When and how to correct atmospheric effects?", *Remote sensing of environment*, 75(2), 230-244.
- Timothy, D., Onisimo, M., & Riyad, I. (2016), "Quantifying aboveground biomass in African environments: A review of the trade-offs between sensor estimation accuracy and costs", *Tropical ecology*, 57(3), 393-405.
- Tonolli, S., Dalponte, M., Neteler, M., Rodeghiero, M., Vescovo, L., & Gianelle, D. (2011), "Fusion of airborne LiDAR and satellite multispectral data for the estimation of timber volume in the Southern Alps", *Remote sensing of environment*, 115, 2486-2498.
- Trotter, C. M., Dymond, J. R., & Goulding, C. J. (1997), "Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM", *International journal of remote sensing*, 18(10), 2209- 2223.
- Van der Colff, M., & Kimberley, M. (2013), "A national height-age model for Pinus radiata in New Zealand", *New Zealand journal of forestry science*, 43(4), 1-11.
- 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.
- Vincini, M., & Frazzi, E. (2003), “Multi-temporal evaluation of topographic normalization methods on deciduous forest TM data”, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 41(11), 2586-2590.
  - Waring, R. H., Way, J., Hunt, E. R., JR., Morrissey, L., Ranson, K. J., Weishampel, J. F., Oren, R. & Franklin, S. E. (1995), “Imaging radar for ecosystem studies”, *BioScience*, 45(10), 715-723.
  - Wolter, P. T., Berkley, E. A., Peckham, S. D., Singh, A., & Townsend, P. A. (2012), “Exploiting tree shadows on snow for estimating forest basal area using Landsat data”, *Remote sensing of environment*, 121, 69-79.
  - Wulder, M. A., Hall, R. J., Coops, N. C., & Franklin, S. E. (2004), “High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization”, *BioScience*, 54(6), 511-521.
  - Wulder, M. A., Ledrew, E. F., Franklin, S. E., & Lavigne, M. B. (1998), “Aerial image texture information in the estimation of Northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI)”, *Remote sensing of environment*, 64(1), 64-76.
  - Yan, H., Bi, H., Li, R., Eldridge, R., Wu, Z., Li, Y. & Simpson, J. (2006), “Assessing climatic suitability of *Pinus radiata* (D. Don) for summer rainfall environment of southwest China”, *Forest ecology and management*, 234(1-3), 199-208.