



## ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای رپید‌آی (RapidEye) در برآورد برخی مشخصه‌های کمی جنگل‌های خزری منطقه گرگان

نورالدین نوریان<sup>۱\*</sup>، شعبان شتایی جویباری<sup>۲</sup>، جهانگیر محمدی<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. استاد گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. استادیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

### مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۳۰ خرداد ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۹ دی ۱۳۹۷

دسترسی اینترنتی: ۳۰ بهمن ۱۳۹۷

واژه‌های کلیدی:

جنگل هیرکانی

الگوریتم‌های ناپارامتریک

داده‌های ماهواره‌ای رپید‌آی RapidEye

استان گلستان

### چکیده

برآورد مشخصه‌های کمی جنگل اهمیت زیادی از نظر کاربردهای آن برای آگاهی از وضعیت جنگل و نحوه عملکرد آن دارد. هدف از این پژوهش برآورد مشخصه‌های کمی (حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار) با استفاده از داده‌های طیفی ماهواره رپید‌آی RapidEye (۱۳۹۰) و الگوریتم‌های ناپارامتریک در بخشی از جنگل‌های خزری منطقه گرگان بود. به این منظور تعداد ۴۱۸ قطعه نمونه هر کدام با مساحت ۱۰۰۰ مترمربع به روش خوشه‌ای تصادفی انتخاب شد. در هر پلات قطر برابر سینه تمامی درختان و ارتفاع برخی از آن‌ها به همراه موقعیت مراکز قطعه نمونه برداشت شد. سپس حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار محاسبه گردید. پس از انجام برخی پردازش‌های تصویر رپید‌آی شامل نسبت‌گیری، تجزیه مؤلفه‌های اصلی، تحلیل بافت و تبدیل تسلدکپ، ارزش‌های رقومی متناظر با قطعات نمونه زمینی از باندهای طیفی استخراج و به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. مشخصه‌های کمی نیز به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. مدل‌سازی با روش‌های k نزدیک‌ترین همسایه، ماشین‌برداری پشتیبان و جنگل تصادفی با ۷۵ درصد از قطعات نمونه انجام گردید و نتایج با ۲۵ درصد باقیمانده قطعات نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین برآوردها با روش جنگل تصادفی برای مشخصه‌های حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار با درصد مجذور میانگین مربعات خطا برابر با ۳۹/۸۳، ۲۹/۷۱ و ۵۰/۱۱ درصد و اریبی نسبی ۰/۰۱، ۱/۶۹ و ۲/۱۱ به دست آمد که در بین روش‌های ناپارامتریک دارای بهترین عملکرد بود. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که با توجه به ناهمگنی و تراکم بودن جنگل‌های خزری داده‌های طیفی ماهواره RapidEye دارای قابلیت نسبتاً خوبی در برآورد مشخصه‌های کمی جنگل می‌باشند.

\*noorian.86@gmail.com: پست الکترونیکی مسئول مکاتبات

## مقدمه

جنگل‌ها به‌عنوان بخش مهمی از منابع تجدیدشونده، در رشد اقتصادی و توسعه پایدار هر کشور نقش مهمی ایفا می‌کنند (۲). جنگل‌های شمال ایران از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های کشور و منبع تولید چوب محسوب می‌شوند (۱۱). یکی از مهم‌ترین راه‌ها برای حفظ، مدیریت و بهره‌برداری از این جنگل‌ها داشتن اطلاع از وضعیت کمی و کیفی آن‌ها است. اطلاع از وضعیت کمی جنگل بیشتر از طریق عملیات میدانی به دست می‌آید که به دلیل هزینه و زمان‌بر بودن و عدم دسترسی به همه قسمت‌های جنگل به‌ویژه در مناطق وسیع مقرون‌به‌صرفه نیست (۲۰). داده‌های ماهواره‌ای، به دلایل برخورداری از مزایای مختلف مانند سطح پوشش وسیع، قابلیت تکرار و به‌هنگام شدن مداوم و سهولت پردازش، همراه با داده‌های میدانی، در این زمینه نقش مؤثری داشته و در جمع‌آوری اطلاعات مذکور اهمیت زیادی دارند (۲ و ۳). تاکنون در جنگل‌های شمال ایران تحقیقات زیادی در برآورد مشخصه‌های ساختاری جنگل با استفاده از داده‌های Landsat TM/ETM<sup>+</sup> (۱، ۲، ۷، ۹، ۱۰، ۲۷ و ۳۸)، ASTER (۱۲)، SPOT (۴)، IRS-P6 (۸)، QuickBird (۱۴)، Pleiades (۵)، UltraCam-X (۸)، انجام شده است. والنز و همکاران (۴۱) به برآورد مشخصه‌های ساختاری جنگل با استفاده از داده‌های ماهواره RapidEye و رگرسیون خطی پرداختند که نتایج نشان داد مقدار R<sup>2</sup> بین ۰/۳۷ تا ۰/۶۳ و مقدار RMSe بین ۲۵ تا ۱۳۱ درصد متغیر بود و بیان داشتند که این برآوردها از دقت قابل قبول برخوردار بودند. شتایی و همکاران (۳۸) قابلیت داده‌های سنجنده ASTER و سه الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه وزن‌دار، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی را برای مشخصه حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار مورد ارزیابی قراردادند. بهترین مدل برای برآورد مشخصه حجم سرپا با استفاده از روش‌های ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و روش k نزدیک‌ترین همسایه وزن‌دار به‌ترتیب دارای ریشه میانگین مجذور خطای ۲۵/۸۶ درصد، ۲۶/۸۶ درصد و ۲۸/۵۴ درصد بود، اما ریشه میانگین مجذور خطا برای بهترین

مدل در هنگام برآورد مشخصه رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار به‌ترتیب برای روش k نزدیک‌ترین همسایه وزن‌دار، روش جنگل تصادفی و ماشین‌های پشتیبان بردار، ۲۰/۲۰ درصد، ۲۱/۵۳ درصد، ۱۸/۳۹ درصد، ۲۰/۶۴ درصد، ۱۹/۳۵ درصد و ۲۲/۰۹ درصد محاسبه گردید.

مدل‌سازی تجربی به دو روش پارامتریک و ناپارامتریک انجام می‌شود. روش‌های پارامتریک و رگرسیون، روش‌هایی هستند که دارای پیش‌فرض‌هایی مانند پیروی از توزیع نرمال متغیرها، همگن بودن واریانس‌ها، تصادفی و مستقل بودن متغیرها هستند. این روش‌ها، دارای محدودیت‌هایی شامل عدم پیروی از توزیع فراوانی بعضی متغیرها از یک توزیع، ارزیابی مدل و حساسیت به تعداد زیاد متغیرها می‌باشند به‌عبارت‌دیگر توزیع فراوانی بعضی از متغیرهای کمی جنگل از هیچ توزیعی پیروی نمی‌کنند و روش‌های پارامتریک توانایی بیان کل تغییرات این مشخصه‌ها را ندارند و نتایج حاصل‌شده دارای خطای بالایی است. امروزه افزایش سریع حجم پایگاه داده‌ها به شکلی است که توانایی انسان برای درک این داده‌ها بدون به‌کارگیری روش‌های مناسب میسر نیست. در کنار روش‌های پارامتریک، روش‌های ناپارامتریک مانند نزدیک‌ترین همسایه وزن‌دار، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی وجود دارند که در دهه‌های اخیر توسعه یافته‌اند و در برآورد مشخصه‌های کمی جنگل مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳۹).

در پژوهش‌هایی که در زمینه برآورد مشخصه‌های کمی جنگل در جنگل‌های شمال کشور انجام شده است (تحقیقات ذکر شده)، از داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی متوسط (Landsat، ASTER و SPOT)، قدرت رادیومتری (۱۱ بیت) متوسط (QuickBird) و تصاویری با قدرت تفکیک مکانی (۲ متر) و رادیومتری (۱۶ بیت) بالا ولی درعین‌حال پرهزینه (Pleiades) در سطح نسبتاً کوچک و با روش‌های پارامتریک استفاده شده است. با توجه به عیب این داده‌ها و نتایج نسبتاً ضعیف آن‌ها باید از دیگر داده‌ها با قابلیت‌های مکانی و طیفی و رادیومتری بهتر درعین‌حال هزینه پایین‌تر با توجه به عرض تصویربرداری وسیع این تصویر استفاده کرده و قابلیت آن‌ها را

حفاظتی)، سری دو و سری چهار شمشک، سری هشت زیارت، طرح نهارخوران و طرح سعدآباد انتخاب گردیدند. تیپ‌های غالب منطقه انجیلی - ممرز، بلوط - ممرز و راش - ممرز است.

### داده‌های زمینی

برداشت قطعه‌نمونه‌ها با استفاده از روش خوشه‌ای با نقطه شروع تصادفی با ابعاد شبکه  $900 \times 1200$  متر انجام گرفت. این روش یک نمونه‌گیری تصادفی ساده است که هر واحد نمونه‌گیری شامل تعدادی عضو است و برآوردهای میانگین و مقدار کل جامعه مشابه نمونه‌گیری تصادفی ساده به دست می‌آید. با توجه به سطح وسیع منطقه و لزوم پراکنش منظم قطعات نمونه از این روش استفاده شد. فاصله بین هر قطعه‌نمونه در هر خوشه  $150 \times 200$  متر در نظر گرفته شد (شکل ۱). در این مطالعه تعداد ۴۱۸ قطعه‌نمونه دایره‌ای با مساحت  $1000$  مترمربع برداشت گردید. مختصات این نقاط قرائت و در دستگاه GPS وارد شد پس از پیدا کردن موقعیت مرکز خوشه در زمین، عملیات اندازه‌گیری در سطح قطعه‌نمونه انجام گرفت. به‌منظور ثبت دقیق موقعیت مکانی قطعات نمونه از سیستم تعیین موقعیت جهانی تفاضلی یا DGPS (Differential global positioning system) با دقت ۱۰ سانتیمتر و روش پردازش بعد از برداشت به‌صورت نقطه‌ای - حرکتی یا Post processing kinematic (در این روش موقعیت وسایل متحرک تعیین می‌شود) استفاده شد (۲۴). در هر قطعه‌نمونه، نوع گونه، تعداد پایه درخت و قطر برابرسینه تمام درختان با قطر بالاتر از  $7/5$  سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، در هر قطعه‌نمونه ارتفاع ۵ درخت شامل نزدیک‌ترین درخت به مرکز قطعه‌نمونه، قطورترین درخت و سه درخت که نمایشگر تیپ جنگل در پلات موردنظر می‌باشند، ثبت گردید. با داشتن قطر برابرسینه، از جدول حجم محلی (تاریف) حجم تک‌درخت محاسبه شد، سپس موجودی سرپا در قطعه‌نمونه و در هکتار برای کلیه قطعات نمونه محاسبه شد. رویه زمینی تک‌درختان با استفاده از قطر برابرسینه و سپس رویه زمینی در

بررسی نمود. علاوه بر این الگوریتم‌های پارامتریک محدودیت‌هایی مانند شرط نرمال بودن داده‌ها، یکسان بودن واریانس خطاها و حساس بودن به مشاهده‌های گم‌شده و داده‌های پرت را دارند.

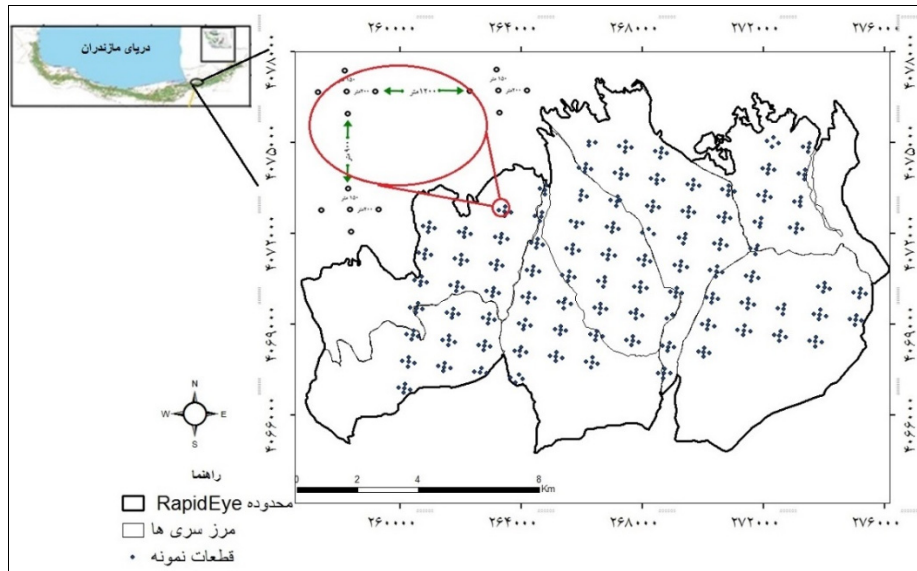
بنابراین در پژوهش حاضر سعی شد برآورد برخی مشخصه‌های کمی جنگل شامل حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار با استفاده از داده‌های طیفی ماهواره RapidEye با قدرت تفکیک مکانی (۵ متر) و رادیومتری (۱۲ بیت) بالا درعین‌حال هزینه پایین‌تر با توجه به عرض تصویربرداری وسیع این تصویر (۷۷ کیلومتر) و همچنین با الگوریتم‌های ریاضی ناپارامتریک انجام شود. با توجه به دامنه و اهمیت گسترده اخیر الگوریتم‌های درختی (جنگل تصادفی)، یادگیری ماشین (ماشین بردار پشتیبان) و فاصله‌ای (k نزدیک‌ترین همسایه) در تحقیق حاضر، کارایی الگوریتم‌های مذکور موردبررسی قرار گرفته است.

### مواد و روش

#### منطقه مورد مطالعه

جنگل موردپژوهش بخشی وسیع از جنگل‌های منطقه گرگان و محدوده‌های چند سری طرح جنگلداری را در برمی‌گیرد و در تقسیم‌بندی جامع مقدماتی جنگل‌های شمال در حوزه آبخیز شماره ۸۵ قرار دارد. این منطقه جنگلی در فاصله ۵ تا ۲۰ کیلومتری جنوب غربی شهر گرگان و بین عرض‌های جغرافیایی  $36^{\circ} 42'$  تا  $36^{\circ} 47'$  شمالی و  $54^{\circ} 16'$  تا  $54^{\circ} 27'$  شرقی قرار گرفته است. مساحت این منطقه  $10510/53$  هکتار است و در محدوده ارتفاعی ۲۲۰ تا ۱۹۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خزری با درجات حرارت معتدل است. میزان بارندگی متوسط سالیانه آن ۶۴۹ میلی‌متر بوده که بین  $528/4$  تا ۸۱۷ میلی‌متر در سال متغیر است (۱۳). برای این منظور، ۶۶۷۵ هکتار از کل حوزه آبخیز شماره ۸۵ در قالب هفت طرح متفاوت در سری یک دکتر بهرام‌نیا (دارای طرح جنگلداری ۳۰ ساله با مدیریت علمی دانشگاهی)، سری دو دکتر بهرام‌نیا (بدون اجرای طرح و

قطعه‌نمونه و در هکتار کلیه قطعات نمونه محاسبه شد. برحسب هکتار محاسبه گردید. همچنین تعداد درختان در هر قطعه‌نمونه شمارش شده است و



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و موقعیت قطعات نمونه و شبکه آماربرداری قطعات نمونه

#### داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

ماهواره است که روزانه سراسر زمین را تحت پوشش قرار می‌دهند. جزئیات مربوط به خصوصیت طیفی این ماهواره در جدول ۱ آورده شده است (۳۶).

در این پژوهش تصاویر چند طیفی ماهواره RapidEye مربوط به تاریخ ۷ اکتبر ۲۰۱۱ معادل ۱۵ مهر ۱۳۹۰ (مطابق آماربرداری زمینی) استفاده شد. برنامه RapidEye شامل ۵

جدول ۱. مشخصات ماهواره RapidEye

عرض	قدرت تفکیک رادیومتری (بیت)	قدرت تفکیک مکانی (متر)	محدوده طیفی (nm)	باند
			۵۱۰-۴۴۰	آبی
			۵۹۰-۵۲۰	سبز
۷۷ کیلومتر	۱۲	۵	۶۸۵-۶۳۰	قرمز
			۷۳۰-۶۹۰	لبه قرمز
			۸۵۰-۷۶۰	مادون قرمز نزدیک

#### پیش‌پردازش و پردازش تصاویر ماهواره‌ای

تصویر زمین مرجع شده QuickBird مربوط به منطقه مورد مطالعه و همچنین روی هم گذاری لایه‌های برداری جاده‌ها و رودخانه‌ها استفاده شد. همچنین برای اطمینان از تصحیح اتمسفری، بازتاب طیفی پیکسل‌ها از سطح آب نسبتاً عمیق در

تصاویر مورد استفاده در هنگام خرید در سطح 3A (تصحیح هندسی به صورت ارتو و تصحیح نوردی و رادیومتری) تهیه گردید. برای اطمینان از تصحیح هندسی از

است با این تفاوت که وزن دهی نمایی قطری و افزایش وزن در ناهمگنی به صورت خطی است. معیار آنتروپی میزان بی‌نظمی در تصویر را نشان می‌دهد یعنی در صورتی که تصویر همسان باشد مقدار آنتروپی کمتر است. GLDV زاویه دوم لحظه‌ای، زمانی که برخی از عناصر دارای ارزش بالا و برخی دیگر دارای ارزش پایین باشند در سطح تصویر همگن سازی می‌کند مشابه زاویه مشترک لحظه‌ای عمل می‌کند. GLDV آنتروپی زمانی که همه عناصر دارای ارزش یکسان باشند مخالف GLDV زاویه مشترک لحظه‌ای عمل می‌کند. GLDV میانگین معادل رابطه ریاضی اندازه‌گیری عدم تجانس بالا در تصویر و GLDV کنتراست نیز معادل رابطه ریاضی اندازه‌گیری کنتراست بالا را نشان می‌دهند. علاوه بر این، تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای انتخاب مهم‌ترین باند، تبدیل تسلدکپ برای استخراج مؤلفه‌های روشنایی، سبزیگی و زردی (که جهت تشخیص پوشش گیاهی مفید می‌باشند) و همچنین به منظور ایجاد شاخص‌های گیاهی، از ترکیبات نسبت‌گیری مناسب در پژوهش‌های پیشین (۴، ۱۰، ۳۰ و ۳۳) استفاده شد (جدول ۲).

محدوده باند مادون قرمز نزدیک بررسی گردید. علاوه بر باندهای اصلی، با اعمال پردازش‌های مناسب، باندهای پردازش‌شده‌ای ایجاد شدند که در فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. یکی از پردازش‌های مناسب که در بیشتر تحقیقات مربوط به برآورد مشخصه‌های ساختار جنگل مورد استفاده قرار می‌گیرد، آنالیز بافت است که به صورت تابعی از تغییرات مکانی، شدت روشنایی پیکسل‌ها که ویژگی‌های نرمی، زبری، همواری و منظم بودن هر سطح است را بیان می‌کند (۱۹). در این پژوهش از ۱۳ مشخصه تجزیه و تحلیل بافت شامل همگنی، تباین، ناهمگنی (عدم تجانس)، میانگین، واریانس، آنتروپی، همبستگی، زاویه دوم لحظه‌ای، GLDV زاویه دوم لحظه‌ای، GLDV آنتروپی، GLDV میانگین، GLDV کنتراست و تفاضل معکوس با ابعاد پنجره ۶×۶ پیکسل (مطابق با قطعات نمونه زمینی) بروی باند مادون قرمز نزدیک (در محیط نرم‌افزار PCI Geomatica) استفاده شد. معیار زاویه دوم لحظه‌ای میزان توزیع تراکم پارامترهای ماتریس هم‌اتفاقی را بیان می‌کند. همبستگی، میزان وابستگی خطی رنگ خاکستری در تصویر را نشان می‌دهد. ناهمگنی مشابه کنتراست

جدول ۲. باندهای مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق

منبع	رابطه	ترکیبات نسبت‌گیری
(۳۳)	$(\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red})$	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
(۳۳)	$(\rho_{Red\ edge} - \rho_{Green}) / (\rho_{Red\ edge} + \rho_{Green})$	NDVI2
(۳۳)	$(\rho_{Red\ edge} - \rho_{Red}) / (\rho_{Red\ edge} + \rho_{Red})$	NDVI3
(۳۵)	$(\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\sqrt{\rho_{NIR} + \rho_{Red}})$	Relative Difference Vegetation Index (RDVI)
(۴۰)	$\rho_{NIR} - \rho_{Red}$	Difference Vegetation Index (DVI)
(۴۰)	$\rho_{NIR} - \rho_{Green}$	Green Difference Vegetation Index (GDVI)
(۱۶)	$(\rho_{NIR} - \rho_{Green}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Green})$	Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)
(۳۴)	$\rho_{NIR} / \rho_{Red}$	Ratio Vegetation Index (RVI)
(۱۵)	$\sqrt{\rho_{NIR} / \rho_{Red}}$	Greenness Index (G1)
(۲۹)	$(\rho_{Red} - \rho_{Green}) / \rho_{NIR}$	Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)

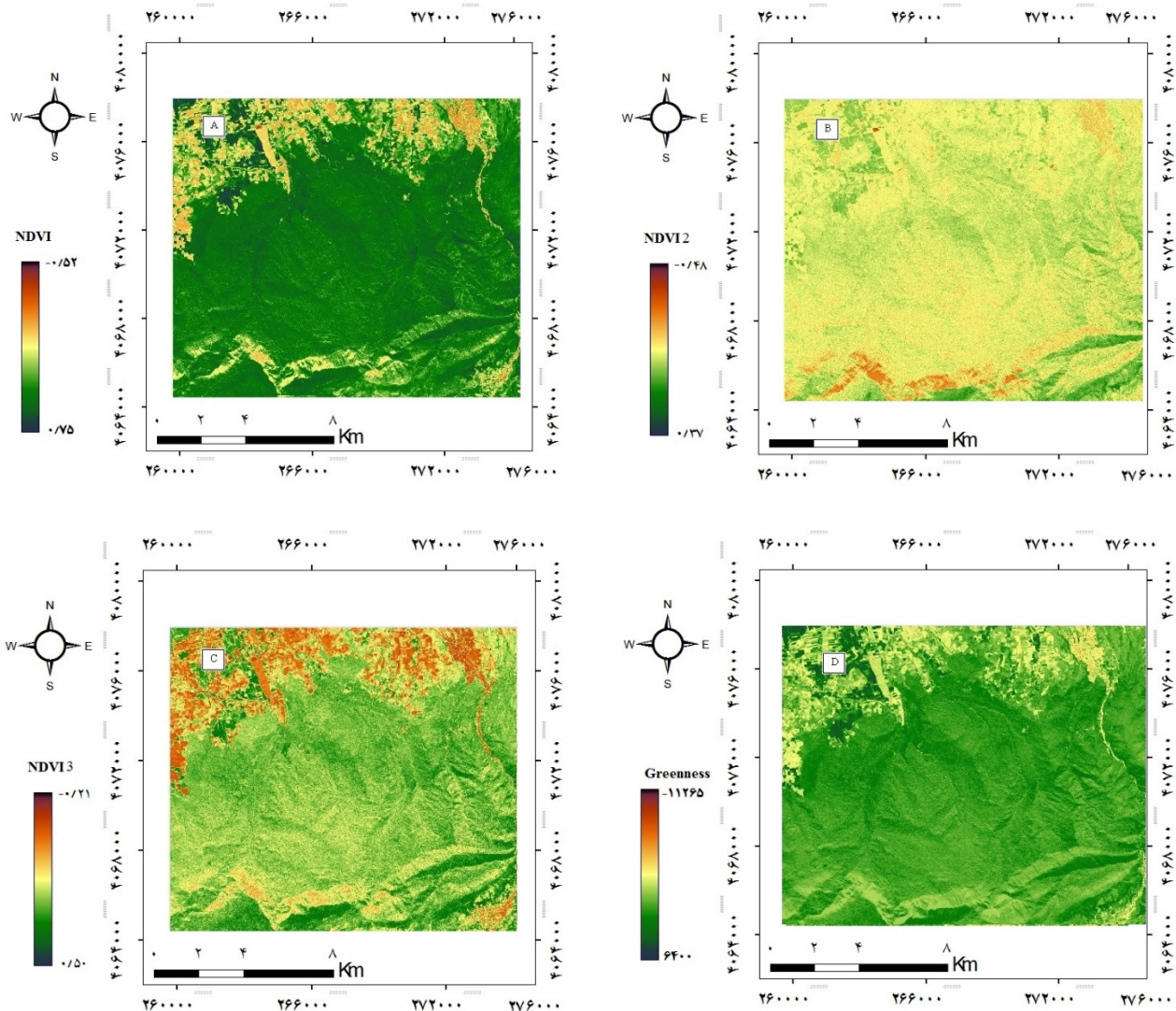
$$T.C. = B1 (\rho_{Blue}) + B2 (\rho_{Green}) + A3 (\rho_{Rededge}) + B4 (\rho_{NIR}) \quad [1]$$

معادله تبدیل تسلدکپ برای داده‌های RapidEye از رابطه ۱ و ضرایب آن در جدول ۳ ارائه شده است.

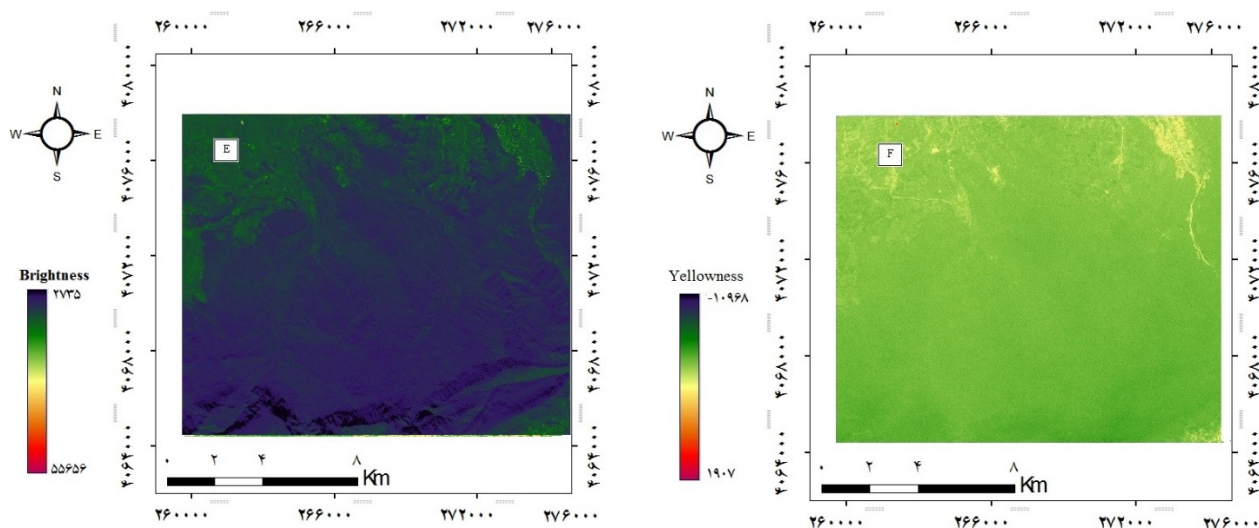
در این رابطه؛ مقادیر TC بیانگر مؤلفه‌های تبدیل تسلدکپ و B ضرایب این تبدیل است.

جدول ۳. ضرایب تبدیل تسلدکپ برای باندهای طیفی سنجنده RapidEye (۳۷)

ضریب	B1	B2	B3	B4	B5
Brightness	۰/۲۴۳۵	۰/۳۴۴۸	۰/۴۸۸۱	۰/۴۹۳۰	۰/۵۸۳۵
Greenness	-۰/۲۲۱۶	-۰/۲۳۱۹	-۰/۴۶۲۲	-۰/۲۱۵۴	۰/۷۹۸۱
Yellowness	-۰/۷۵۶۴	-۰/۳۹۱۶	۰/۵۰۴۹	۰/۱۴۰۰	۰/۰۰۶۴



شکل ۲. بخشی از پردازش‌های به دست آمده از تصویر RapidEye مطالعه شامل (A) NDVI، (B) NDVI2، (C) NDVI3، (D) Greenness



ادامه شکل ۲. بخشی از پردازش‌های به دست آمده از تصویر RapidEye مطالعه شامل Brightness (E) و Yellowness (F) در منطقه مورد مطالعه

وزن‌دهی نزدیک‌ترین همسایه‌ها اهمیت دارند (۳۸). تعداد همسایه بستگی به نوع اطلاعات دارد و توسط کاربر تعیین می‌شود. در بسیاری از پژوهش‌ها مقدار بهینه‌ی تعداد همسایه بین پنج تا ۱۰ (۲۲ و ۲۶) اما در بعضی پژوهش‌ها (۱۸) بین یک تا ۵۰ گزارش شده است. یکی از پارامترهایی که باید در این روش تعیین شود نوع فاصله است. معمول‌ترین نوع فاصله‌ها شامل فاصله اقلیدسی، مربع اقلیدسی، منهن و چیشف است (۳۸).

#### الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان از دقیق‌ترین و نیرومندترین الگوریتم داده‌کاوی به‌شمار می‌رود (۴). نتایج به‌کارگیری این الگوریتم به‌طور کامل به انتخاب بهترین پارامترها برای مدل‌سازی وابسته است (۳۸). در ایجاد این مدل باید به دو گزینه انتخاب نوع پنجره (Kernel) و تعیین پارامترهای آن دقت کرد. چهار نوع پنجره متعارف شامل پایه شعاعی، چندجمله‌ای، سیگموئید و خطی وجود دارد که معروف‌ترین و بهترین آن‌ها پایه شعاعی است (۱۰). پارامترهای پنجره نیز شامل ظرفیت (c)، گاما (γ) و اپسیلون (ε) است. برای انتخاب

#### استخراج ارزش‌های طیفی

به‌منظور تحلیل همبستگی و بررسی روابط رگرسیونی بین داده‌های ماهواره‌ای و مشخصه‌های کمی جنگل، استخراج ارزش‌های طیفی متناظر در قطعه نمونه ۰/۱ هکتاری در باندهای اصلی و مصنوعی انجام شد. این عمل از طریق میانگین‌گیری ارزش‌های طیفی واقع در محدوده قطعات نمونه زمینی از باندهای اصلی و مصنوعی در محیط ArcGIS®9.3 و با استفاده از توابع آمار منطقه‌ای (Zonal statistics) انجام شد.

#### مدل‌سازی

##### الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه

یکی از روش‌های طبقه‌بندی پرترفدار، روش الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه است. این روش متعلق به طبقه مدل‌های غیرپارامتری است. در این روش مقادیر نقاط نامعلوم از متغیر وابسته براساس شباهت و فاصله بین ارزش‌های متغیرهای مستقل متناظر با این نقطه با ارزش‌های نقاط مشاهده‌شده از متغیرها به دست می‌آید و برای برآورد اطلاعات جنگل یک ابزار مناسب محسوب می‌شود (۲۱). برای اجرای این الگوریتم سه پارامتر تعداد همسایه، اندازه فاصله و وزن‌دهی یا عدم

(مدل‌ها) انتخاب گردید. با داشتن مقادیر برآوردی (Predicted) و مقادیر مشاهده‌ای (Observed) و با استفاده از معیارهای آماری میانگین مجذور مربعات خطا (رابطه ۲)، میانگین مجذور مربعات خطای نسبی (رابطه ۳)، اریبی (رابطه ۴) و اریبی نسبی (رابطه ۵) اعتبار مدل‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفتند (۲۸).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad [2]$$

$$RMSE_{\%} = 100 \times \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad [3]$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad [4]$$

$$Bias_{\%} = 100 \times \frac{Bias}{\bar{y}} \quad [5]$$

در این رابطه‌ها؛  $\hat{y}_i$  مقدار برآورد شده مدل،  $\bar{y}$  میانگین برآورده شده،  $y_i$  مقدار مشاهده شده (اندازه‌گیری شده) و  $n$  تعداد مشاهدات است.

## نتایج

### آمار توصیفی داده‌های زمینی در مدل‌سازی

آمار توصیفی مشخصه‌های کمی جنگل نشان داد از تعداد ۴۱۸ قطعه نمونه برداشت شده برای کل منطقه ۳۱۴ قطعه نمونه برای مدل‌سازی و ۱۰۴ قطعه نمونه برای اعتبار سنجی مدل‌سازی انتخاب شدند. نتایج حاصل از بررسی داده‌های زمینی برداشت شده در منطقه نشان می‌دهد میانگین حجم، رویه زمینی و تعداد در هکتار به ترتیب ۳۲۸/۵ مترمکعب در هکتار، ۲۷/۷ مترمربع در هکتار و ۳۰۸/۲ است (جدول ۴).

بهترین مقادیر اپسیلون و ظرفیت از روش جستجوی خودکار و برای محاسبه گاما از تقسیم عدد یک به تعداد متغیرهای مستقل استفاده گردید (۴). برای جستجوی خودکار، طیف وسیعی از متغیرهای ورودی یک تا ۵۰ برای ظرفیت و ۰/۱ تا ۰/۵ برای اپسیلون در نظر گرفته شد.

## الگوریتم جنگل تصادفی

یکی از روش‌های غیرپارامتری و درخت پایه است که شامل انبوهی از درخت‌های کلاس‌بندی و رگرسیونی است و گسترش یافته مدل رگرسیون درختی است (۱۷). طبق تحقیقات شتایی و همکاران (۳۸) برای ساخت مدل جنگل تصادفی باید به سه پارامتر توجه کرد: اول نسبت زیر نمونه‌ها که برای تعیین مقدار این پارامتر نسبت‌های ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. دوم برای تعیین تعداد برآوردکننده‌ها در هر گره از جذر کل تعداد متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل  $\pm 2$  استفاده شد تا  $k$  یا تعداد برآوردکننده بهینه در هر گره انتخاب شود و سوم برای تعیین تعداد بهینه درختان، ابتدا ۴۰۰ درخت برای تولید یک گراف که نشان‌دهنده تغییرات میانگین مربعات خطا در مقابل تعداد درختان نمونه‌های آموزشی و اعتبارسنجی است، مورد استفاده قرار گرفت.

## اعتبار سنجی الگوریتم‌ها

تجزیه و تحلیل آماری بر روی داده‌های مشخصه‌های کمی در قطعات نمونه زمینی و ارزش طیفی باندهای مختلف انجام گرفت. مجموع ۴۱۸ قطعه نمونه برداشت شده، به طور تصادفی تعداد ۳۱۴ قطعه نمونه (۷۵ درصد) برای مدل‌سازی و ۱۰۴ قطعه نمونه (۲۵ درصد) برای ارزیابی یا اعتبارسنجی الگوریتم‌ها



جدول ۴. مشخصات توصیفی مراحل مدل‌سازی، اعتبارسنجی برای مشخصه‌های کمی جنگل در منطقه مورد مطالعه

مشخصه	حجم (مترمکعب در هکتار)		رویه زمینی (مترمربع در هکتار)		تعداد درختان در هکتار	
	مدل‌سازی	اعتبارسنجی	مدل‌سازی	اعتبارسنجی	مدل‌سازی	اعتبارسنجی
تعداد قطعه‌نمونه	۳۱۴	۱۰۴	۳۱۴	۱۰۴	۳۱۴	۱۰۴
میانگین	۳۲۸/۵	۳۲۸/۶	۲۷/۷۱	۲۷/۷۴	۳۰۷/۱	۳۱۱/۷
انحراف معیار	۷/۹	۱۳/۴۳	۰/۵۳	۰/۸۹	۹/۵۳	۱۷/۰۸
حداقل	۵۳/۹	۷۷/۹	۵/۲۷	۹/۶۹	۵۰	۸۰
حداکثر	۸۹۳/۷	۷۴۵/۵۷	۶۷/۴۱	۵۵/۰۸	۹۰۰	۹۲۰
دامنه تغییرات	۳۸۹/۸	۶۶۸/۷	۵۶/۲۰	۴۵/۳۹	۸۵۰	۸۴۰
چولگی	۰/۸۳	۰/۶۴	۰/۴۹	۰/۴۱	۱/۲۴	۱/۳۵
کشیدگی	۰/۵۴	۰/۰۸	۰/۳۰	-۰/۱۵	۱/۷۵	۲/۱۲

برآورد مشخصه‌های کمی ساختار جنگل با استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه

نتایج به‌کارگیری الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه با دامنه یک تا ۵۰ و با سه معیار فاصله اقلیدسی، منهتن و چیشف وزن داده‌شده در برآورد حجم سرپا نشان داد که معیار فاصله منهتن با  $K=14$  دارای کمترین مجذور مربعات خطا بود. نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه با دامنه یک تا ۵۰

و سه معیار فاصله اقلیدسی، منهتن و چیشف وزن داده‌شده در برآورد رویه زمینی نشان داد که معیار منهتن با  $K=39$  دارای کمترین میزان مجذور مربعات خطا بود. نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه با دامنه یک تا ۵۰ و سه معیار فاصله اقلیدسی، منهتن و چیشف وزن داده‌شده در برآورد تعداد در هکتار نشان داد که معیار چیشف با  $K=47$  دارای کمترین میزان مجذور مربعات خطا بود (جدول ۵).

جدول ۵. نتایج مربوط به تجزیه و تحلیل الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه برای برآورد مشخصه‌های کمی جنگل

مشخصه کمی	اندازه	مقدار k	RMSe (m <sup>3</sup> /ha)	RMSe %	Bias (m <sup>3</sup> /ha)	Bias%	K بهینه
اقلیدسی وزن‌دار	۵۰-۱	۱۳۶/۲۴	۴۱/۴۶	۷/۶	۲/۳۳	۱۴	
حجم سرپا	۵۰-۱	۱۳۴/۹۱	۴۱/۰۵	۶/۵۶	۱/۹۹	۱۴	
چیشف وزن‌دار	۵۰-۱	۱۳۶/۹۳	۴۱/۶۷	۳/۵۳	۱/۰۷	۴۳	
اقلیدسی وزن‌دار	۵۰-۱	۸/۸۳	۳۱/۸۳	۰/۹۷	۳/۵	۳۹	
رویه زمینی	۵۰-۱	۸/۷۲	۳۱/۴۴	۱/۰۲	۳/۷	۳۹	
چیشف وزن‌دار	۵۰-۱	۸/۷۹	۳۱/۷	۰/۸۰	۲/۹۱	۴۲	
اقلیدسی وزن‌دار	۵۰-۱	۱۶۸/۲	۵۳/۹۶	-۱/۱۶	-۰/۳۷	۱۱	
تعداد در هکتار	۵۰-۱	۱۶۴/۸۶	۵۲/۸۹	-۰/۷۷	-۰/۲۵	۱۴	
چیشف وزن‌دار	۵۰-۱	۱۵۶/۷۴	۵۰/۲۸	-۳/۵۸	-۱/۱۵	۴۷	

برآورد مشخصه‌های کمی ساختار جنگل با استفاده از الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان

نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان برای برآورد حجم با استفاده از پنجره‌های مختلف نشان داد که

پنجره شعاعی با  $\epsilon=7$ ،  $\sigma=0.32$  و  $c=46$  دارای کمترین مجذور مربعات خطا بود. نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان برای برآورد رویه زمینی با استفاده از پنجره‌های مختلف نشان داد که پنجره چندجمله‌ای خطی درجه

یک با  $\gamma=0.032$ ،  $\epsilon=0.032$  و  $c=44$  دارای کمترین مجذور مربعات خطا و اریبی بود. نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای برآورد تعداد در هکتار با استفاده از پنجره‌های مختلف نشان داد که پنجره سیگموئید با  $\gamma=0.032$ ،  $\epsilon=0.032$  و  $c=10$  دارای کمترین مجذور مربعات خطا و اریبی بود (جدول ۶).

جدول ۶. نتایج مربوط به تجزیه و تحلیل ماشین بردار پشتیبان برای تعیین بهترین پارامترهای مشخصه‌های کمی جنگل

مشخصه کمی	پنجره	Gama	Epsilon	Capacity	RMS <sub>e</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	RMS <sub>e</sub> %	Bias (m <sup>3</sup> /ha)	Bias%
حجم سرپا	شعاعی	0.032	0.1	46	133/93	40/76	7/9	2/4
	چندجمله‌ای	0.032	0.3	12	134/82	41/02	-2/52	0/77
	سیگموئید	0.032	0.1	3	135/59	41/26	-9/87	-3
	خطی	-	0.1	50	141/35	43/02	-16/67	-5/07
رویه زمینی	شعاعی	0.032	0.1	45	8/87	31/97	-0/16	-2/18
	چندجمله‌ای	0.032	0.4	44	8/76	31/59	0/67	2/4
	سیگموئید	0.032	0.1	9	8/86	31/96	-0/66	-2/39
	خطی	-	0.1	24	10/98	39/58	-2/15	-7/7
تعداد در هکتار	شعاعی	0.032	0.5	10	165/55	53/11	41/24	13/23
	چندجمله‌ای	0.032	0.5	50	162/18	52/02	35/48	11/38
	سیگموئید	0.032	0.1	10	162/03	51/97	19/97	-6/4
	خطی	-	0.1	41	182/06	58/40	-27/31	-8/76

### برآورد مشخصه‌های کمی ساختار جنگل با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

در برآورد مشخصه حجم با روش جنگل تصادفی، تعداد ۴۰۰ درخت اولیه در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد تعداد ۲۲۵ درخت دارای کمترین میانگین مربعات خطا بودند. نتایج معیارهای اعتبارسنجی به دست آمده از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد Kهای مختلف در برآورد حجم سرپا نشان می‌دهد که K=۵ دارای کمترین مقدار مجذور مربعات خطا است و به عنوان K بهینه در برآورد حجم سرپا با استفاده از داده‌های RapidEye انتخاب شد.

در برآورد مشخصه رویه زمینی با روش جنگل تصادفی، تعداد ۴۰۰ درخت اولیه در نظر گرفته شد که نتایج نشان داد تعداد ۲۰۰ درخت دارای کمترین میانگین مربعات خطا بودند.

نتایج معیارهای اعتبارسنجی به دست آمده از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد Kهای مختلف نشان داد که K=۷ دارای کمترین مقدار مجذور مربعات خطا است و به عنوان K بهینه در برآورد رویه زمینی با استفاده از داده‌های RapidEye انتخاب شد (جدول ۷).

در برآورد مشخصه رویه زمینی با روش جنگل تصادفی، تعداد ۴۰۰ درخت اولیه در نظر گرفته شد که نتایج نشان داد تعداد ۲۵۰ درخت دارای کمترین میانگین مربعات خطا بودند. نتایج معیارهای اعتبارسنجی به دست آمده از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد Kهای مختلف نشان داد که K=۵ دارای کمترین مقدار مجذور مربعات خطا است و به عنوان K بهینه در برآورد تعداد در هکتار درختان با استفاده از داده‌های RapidEye انتخاب شد (جدول ۸).

جدول ۷. نتایج مربوط به تجزیه و تحلیل جنگل تصادفی برای تعیین بهترین پارامترهای مشخصه‌های کمی جنگل

مشخصه کمی	تعداد درخت بهینه	تعداد برآورد کننده k	RMSe(m <sup>3</sup> /ha)	RMSe%	Bias(m <sup>3</sup> /ha)	Bias%
حجم سرپا	۳۵۰	۳	۱۳۳/۸۴	۴۰/۷۳	-۰/۶۴	-۰/۱۹
	۳۵۰	۴	۱۳۱/۶۴	۴۰/۰۶	-۰/۸۴	-۰/۲۶
	۳۵۰	۵	۱۳۰/۸۸	۳۹/۸۳	۰/۰۱	۰
	۳۵۰	۶	۱۳۰/۹	۳۹/۸۴	-۱/۴۹	-۰/۴۵
	۳۵۰	۷	۱۳۲/۸۸	۴۰/۴۴	۰/۰۳	۰/۰۱
	۲۰۰	۳	۸/۳۲	۲۹/۹۹	۰/۳۹	۱/۴۲
	۲۰۰	۴	۸/۲۴	۲۹/۷۲	۰/۵۹	۲/۱۳
رویه زمینی	۲۰۰	۵	۸/۲۶	۲۹/۷۷	۰/۴	۱/۴۴
	۲۰۰	۶	۸/۲۸	۲۹/۸۵	۰/۴۹	۱/۷۶
	۲۰۰	۷	۸/۲۴	۲۹/۷۱	۰/۴۷	۱/۶۹
	۲۰۰	۳	۱۵۸/۲۳	۵۰/۱۲	۳/۳۹	۱/۰۹
	۲۰۰	۴	۱۵۶/۴۳	۵۰/۱۸	۴/۱۲	۱/۳۲
تعداد در هکتار	۲۰۰	۵	۱۵۶/۲۱	۵۰/۱۱	۶/۵۷	۲/۱۱
	۲۰۰	۶	۱۵۸/۶۱	۵۰/۸۸	۷/۱۷	۲/۳
	۲۰۰	۷	۱۵۹/۵۵	۵۱/۱۸	۸/۱۰	۲/۶۰

جدول ۸. اعتبار سنجی الگوریتم‌ها در برآورد مشخصه‌های حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار

مدل	حجم در هکتار		رویه زمینی در هکتار		تعداد درختان در هکتار	
	Bias%	RMSe%	Bias%	RMSe%	Bias%	RMSe%
الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه	۱/۹۹	۴۱/۰۵	۳/۷	۳۱/۴۴	-۱/۱۵	۵۰/۲۸
ماشین بردار پشتیبان	۲/۴	۴۰/۷۶	۲/۴	۳۱/۵۹	-۶/۴	۵۱/۹۷
جنگل تصادفی	۰/۰۱	۳۹/۸۳	۱/۶۹	۲۹/۷۱	۲/۱۱	۵۰/۱۱

## بحث و نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر اعتبارسنجی الگوریتم‌های ناپارامتریک الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه وزن‌دار، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی در برآورد برخی مشخصه‌های ساختاری جنگل (حجم، رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار) با استفاده از داده‌های طیفی ماهواره RapidEye بود. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل توصیفی داده‌های زمینی مشخص گردید که این داده‌ها دارای واریانس و دامنه تغییرات بالا در منطقه بوده که نشان‌دهنده شرایط ناهمگن منطقه مورد مطالعه از نظر توزیع مکانی و کمی متغیرهای مورد بررسی است. به‌طوری‌که نمونه‌های زمینی از نظر حجم سرپا دارای

دامنه ۵۳/۹ تا ۸۹۳/۷ مترمکعب در هکتار، رویه زمینی برابر سینه بین ۵/۲۷ تا ۶۱/۴۷ مترمربع در هکتار و از نظر تعداد درختان در هکتار دارای دامنه بین ۵۰ تا ۹۰۰ پایه در هکتار بوده است. این وضعیت می‌تواند به دلیل ناهمگن بودن منطقه مورد مطالعه از نظر پوشش جنگلی باشد. در بین متغیرهای تخمین‌گر در این الگوریتم‌ها در برآورد مشخصه‌های کمی جنگل، شاخص گیاهی DVI و شاخص گیاهی NDVI، شاخص‌های Brightness، Yellowness از تبدیل تسلدکپ، متغیر GLDV زاویه دوم لحظه‌ای و GLDV میانگین از متغیرهای آنالیز بافت بهترین برآوردها را نمایش دادند و در مدل‌سازی نقش بسزایی داشتند که با نتایج کلبی (۶) مطابقت دارد.

درصد مجذور میانگین مربعات خطا و اریبی در برآورد رویه زمینی به ترتیب با الگوریتم نزدیکترین همسایه وزن دار برابر با  $31/44$  و  $3/7$  درصد، با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان  $31/59$  و  $2/4$  درصد و با الگوریتم جنگل تصادفی  $29/71$  و  $1/69$  درصد به دست آمد. به طور کلی، مجذور میانگین مربعات خطا بین الگوریتم‌های ناپارامتریک تفاوت زیادی نداشت (حدود دو درصد). در پژوهش حاضر الگوریتم جنگل تصادفی دارای کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا ( $29/71$  درصد) بود که در مقایسه با پژوهش پاکلن و مالتامو ( $32$ ) در توده پهن برگ با مجذور میانگین مربعات خطای  $87/76$  درصد دارای نتیجه بهتری بود. در مقایسه با پژوهش شتایی و همکاران ( $38$ ) با مجذور میانگین مربعات خطای  $18/39$  درصد، به خاطر ناهمگن بودن منطقه ضعیف تر است همچنین نسبت به نتایج محمدی ( $10$ ) و نوریان و همکاران ( $31$ ) که به ترتیب میزان رویه زمینی را برابر  $27/16$  و  $12/10$  درصد گزارش کردند، ضعیف تر است که علت آن را می توان به دلیل استفاده از داده های لیدار و QuickBird در پژوهش آن ها مرتبط دانست.

مجذور میانگین مربعات خطا و اریبی در برآورد تعداد درختان در هکتار به ترتیب با الگوریتم نزدیکترین همسایه وزن دار برابر با  $50/28$  و  $1/15$  درصد، با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان  $51/97$  و  $6/4$  درصد و با الگوریتم جنگل تصادفی  $50/11$  و  $2/11$  درصد به دست آمد. به طور کلی، مجذور میانگین مربعات خطا بین الگوریتم‌های ناپارامتریک تفاوت زیادی نداشت (حدود دو درصد). در پژوهش روبرو الگوریتم جنگل تصادفی دارای کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا ( $50/11$  درصد) بود که نسبت به پژوهش محمدی ( $30$ ) با مجذور میانگین مربعات خطای  $73$  درصد دارای نتیجه بهتری بود که علت آن را می توان بهتر بودن قدرت تفکیک مکانی ماهواره RapidEye نسبت به داده های  $ETM^+$  دانست. در مقایسه با تحقیق شتایی و همکاران ( $38$ ) و نوریان و همکاران ( $31$ ) با مجذور میانگین مربعات خطای  $20/64$  و  $30/36$  درصد ضعیف تر است که علت آن را می توان به ترتیب، همگن بودن

کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا و اریبی در برآورد حجم به ترتیب با الگوریتم نزدیکترین همسایه وزن دار برابر با  $41/05$  درصد و  $1/99$  درصد، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برابر با  $40/76$  درصد و  $2/4$  درصد و الگوریتم جنگل تصادفی برابر با  $39/83$  درصد و  $0/01$  درصد به دست آمد. در این پژوهش بین درصد مجذور میانگین مربعات خطای به دست آمده از برآورد حجم سرپا بین الگوریتم‌های ناپارامتریک تفاوت زیادی وجود نداشت (حدود دو درصد). الگوریتم جنگل تصادفی دارای کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا ( $39/83$ ) در برآورد مشخصه حجم سرپا بود که در مقایسه با پژوهش های محمدی و همکاران ( $30$ )، کاجیسا و همکاران ( $25$ )، هیویان و همکاران ( $22$ )، جی یو و همکاران ( $20$ ) و هیبا و همکاران ( $23$ ) که به ترتیب  $66/2$ ،  $88/19$ ،  $44/2$ ،  $50$  و  $43$  درصد بوده است، دارای وضعیت بهتری است که از جمله دلایل آن می توان به بهتر بودن قدرت تفکیک مکانی و رادیومتری ماهواره RapidEye اشاره کرد. نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر در مقایسه با مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا در تحقیق کلبی ( $6$ ) و شتایی و همکاران ( $38$ ) با استفاده از سنجنده ASTER که به ترتیب برابر با  $18/2$  و  $25/86$  درصد بودند ضعیف تر بود که علت آن را می توان به ناهمگن بودن منطقه از نظر بازتاب طیفی گونه ها و نوردهی و شدت آماربرداری نسبت داد. ضعیف تر بودن نتایج این تحقیق نسبت به نتیجه محمدی ( $10$ ) و نوریان و همکاران ( $31$ ) با درصد مجذور میانگین مربعات خطای  $31/42$  و  $20/35$  درصد را نیز می توان به ضعیف تر بودن قدرت تفکیک مکانی ماهواره RapidEye نسبت به داده های لیدار و QuickBird دانست.

در کل نتایج به دست آمده از داده های ماهواره RapidEye با استفاده از الگوریتم های ناپارامتریک نشان داد که استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی با مجذور میانگین مربعات خطای  $39/83$  درصد بهتر توانست حجم سرپا را برآورد کند و الگوریتم نزدیکترین همسایه وزن دار با مجذور میانگین مربعات خطای  $41/05$  درصد و اریبی  $1/99$  درصد دارای خطای نسبتاً بیشتری نسبت به دو الگوریتم دیگر بود.

۲. حسن‌زاد ناوردی، ا.، ن. سیدی و ح. سیف‌اللهیان. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات مشخصه‌های کمی و کیفی توده‌های جنگلی بعد از یک دوره جنگلداری (مطالعه موردی: سری جنبه‌سرا-گیلان). مجله جنگل ایران، ۱(۴): ۳۰۱-۳۱۱.
۳. خرمی، ر.، ع. ا. درویش‌صفت و م. نمیرانیان. ۱۳۸۶. بررسی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای Landsat7 ETM+ در برآورد حجم سرپای توده‌های راش (مطالعه موردی در جنگل‌های سنگده). مجله منابع طبیعی، ۶۰(۴): ۱۲۸۱-۱۲۸۹.
۴. رجب‌پور رحمتی، م.، ع. ا. درویش‌صفت، و ع. خلیل‌پور. ۱۳۸۹. بررسی قابلیت تصاویر سنجنده SPOT5-HRG در تهیه نقشه انبوهی جنگل‌های خزری (مطالعه موردی: جنگل‌های دیلمان گیلان). فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۸(۱): ۱۴۲-۱۳۲.
۵. ظهیریان، م.، ا. فلاح، ش. شتابی و س. کلبی. ۱۳۹۴. برآورد برخی مشخصه‌های ساختاری جنگل با استفاده از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالای Pleiades و الگوریتم‌های ناپارامتریک. فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۳(۳): ۴۷۷-۴۶۵.
۶. عزیز، ز.، ا. نجفی آشتیانی، پ. فاتحی و م. پیرباوقار. ۱۳۸۸. بررسی امکان برآورد حجم سرپای جنگل با استفاده از داده‌های سنجنده LISS\_IV ماهواره IRS\_P6 (مطالعه موردی: لیره‌سر تنکابن). فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۸(۱): ۱۵۱-۱۴۳.
۷. فاضلی فارسانی، آ.، ر. قضاوی و م. ر. فرزانه. ۱۳۹۴. بررسی عملکرد الگوریتم‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از تکنیک‌های ادغام تصاویر (مطالعه موردی: زیر حوزه بهشت‌آباد). سنجنش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۱): ۱۰۶-۹۱.
۸. قاسمی، ا.، ا. فلاح و ش. شتابی جویباری. ۱۳۹۵. ارزیابی چهار الگوریتم پیش‌بینی سطح تاج‌پوشش جنگل‌های مانگرو با استفاده از تصاویر دوربین هوایی. سنجنش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷(۲): ۱۵-۱.
۹. کلبی، س. ۱۳۹۰. بررسی امکان برآورد مشخصه‌های ساختاری جنگل با استفاده از داده‌های سنجنده SPOT- و ASTER HRG (مطالعه موردی: جنگل دارابکلا). پایان‌نامه کارشناسی

منطقه و استفاده از داده‌های QuickBird در این پژوهش‌ها دانست.

## نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر برآورد برخی مشخصه‌های کمی ساختار جنگل با استفاده از داده‌های طیفی ماهواره RapidEye موردبررسی قرار گرفت. از نقاط قوت این تحقیق می‌توان به قدرت تفکیک مکانی و رادیومتری نسبتاً بالا و مهم‌تر از همه هزینه کمتر این داده‌ها نسبت به داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا و عرض تصویربرداری وسیع این داده و وجود باند لبه قرمز به‌عنوان یکی از باندهای مناسب برای بررسی‌های پوشش گیاهی و عدم وجود این باند در تصاویر سنجنده‌های رایج نوری اشاره کرد. از بین الگوریتم‌های ریاضی ناپارامتریک مورداستفاده در این پژوهش، الگوریتم جنگل تصادفی بهترین نتیجه را در برآورد مشخصه‌های کمی جنگل نشان داد. دقت و صحت نسبتاً خوب برآورد با این الگوریتم با استفاده از تصاویر ماهواره RapidEye می‌تواند برای مدیران قابل‌استفاده باشد. از طرفی چون پژوهش پیش‌رو در یک منطقه بزرگ شامل چند سری جنگلداری انجام‌شده و با توجه به ناهمگنی و متراکم بودن جنگل‌های خزری داده‌های طیفی ماهواره RapidEye دارای قابلیت نسبتاً خوبی در برآورد مشخصه‌های کمی جنگل بودند. در پایان اگرچه روش آماربرداری زمینی نسبت به برآورد داده‌های سنجنش‌ازدور دقیق‌تر است ولی با توجه به هزینه پایین‌تر و صرف زمان استفاده از سنجنش‌ازدور می‌تواند روشی جایگزین و حتی در برخی موارد بهتر باشد.

## منابع مورد استفاده

۱. احمدی، م. و م. نارنگی‌فرد. ۱۳۹۴. برآورد کیفیت و آشکارسازی تغییرات پهنه‌های جنگلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: شهرستان رستم، فارس). سنجنش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۳): ۸۷-۱۰۰.

21. Holmström H, Fransson JE. 2003. Combining remotely sensed optical and radar data in k NN-estimation of forest variables. *Forest Science*, 49(3): 409-418.
22. Huiyan G, Dai L, Wu G, Xu D, Wang S, Wang H. 2006. Estimation of forest volumes by integrating Landsat TM imagery and forest inventory data. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 49(1): 54-62.
23. 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.
24. Kaartinen H, Hyypä J, Vastaranta M, Kukko A, Jaakkola A, Yu X, Pyörälä J, Liang X, Liu J, Wang Y. 2015. Accuracy of kinematic positioning using global satellite navigation systems under forest canopies. *Forests*, 6(9): 3218-3236.
25. Kajisa T, Murakami T, Mizoue N, Kitahara F, Yoshida S. 2008. Estimation of stand volumes using the k-nearest neighbors method in Kyushu, Japan. *Journal of Forest Research*, 13(4): 249-254.
26. Kutzer C. 2008. Potential of the K-NN method for estimation and monitoring off-reserve forest resources in Ghana. Ph.D. thesis, Department of Forestry and Environmental Sciences, Germany University of Albert-Ludwigs, 145 pp.
27. 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(1-3): 149-167.
28. McRoberts RE, Tomppo EO, Finley AO, Heikkinen J. 2007. Estimating areal means and variances of forest attributes using the k-nearest neighbors technique and satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 111(4): 466-480.
29. Merzlyak MN, Gitelson AA, Chivkunova OB, Rakitin VY. 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106(1): 135-141.
30. Mohammadi J, Shataee Joibary S, Yaghmaee F, Mahiny A. 2010. Modelling forest stand volume and tree density using Landsat ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 31(11): 2959-2975.
31. Nourian N, Joibary SS, Mohammadi J. 2016. Assessment of different remote sensing data for forest structural attributes estimation in the Hyrcanian forests. *Forest Systems*, 25(3): 9-21.
32. Packalén P, Maltamo M. 2007. The k-MSN method for the prediction of species-specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment*, 109(3): 328-341.
- ارشد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۱۰۷ صفحه.
۱۰. محمدی، ج. ۱۳۹۲. بهبود برآورد مشخصه‌های کمی ساختار جنگل با استفاده از تلفیق داده‌های لیدار و تصاویر رقومی هوایی در جنگل‌های پهن‌برگ شصت کلاته گرگان. رساله دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۲۴۱ صفحه.
۱۱. مروی مهاجر، م. ۱۳۸۴. جنگل‌شناسی و پرورش جنگل. انتشارات دانشگاه تهران، ۳۸۷ صفحه.
۱۲. نوریان، ن.، ش. شتایی جویباری، ج. محمدی و س. یزدانی. ۱۳۹۳. برآورد مشخصه‌های کمی جنگل با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER و الگوریتم CART (منطقه مورد مطالعه: جنگل شصت کلاته گرگان). فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۲(۳): ۴۴۶-۴۳۴.
۱۳. نوریان، ن. ۱۳۹۲. بررسی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی متفاوت با تأکید بر شاخص‌های طیفی در تفکیک توده‌های خالص جنگل کاری. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۲۱(۳): ۱۶۶-۱۴۹.
۱۴. یزدانی، س. ۱۳۹۰. برآورد برخی مشخصه‌های کمی جنگل با استفاده از داده‌های ماهواره Quickbird. پایان‌نامه کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۵۶ صفحه.
15. Bhatti A, Mulla D, Frazier B. 1991. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. *Remote Sensing of Environment*, 37(3): 181-191.
16. Bell GE, Howell BM, Johnson GV, Raun WR, Solie JB, Stone ML. 2004. A comparison of measurements obtained using optical sensing with turf growth, chlorophyll content and tissue nitrogen. *Horticultural Science*, 39(5): 1130-1132.
17. Breiman L. 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45(1): 5-32.
18. Finley AO, McRoberts RE, Ek AR. 2006. Applying an efficient k-nearest neighbor search to forest attribute imputation. *Forest Science*, 52(2): 130-135.
19. Gonzales RC, Woods RE. 2002. *Digital Image processing*. Prentice Hal, 750 pp.
20. Gu H, Dai L, Wu G, Xu D, Wang S, Wang H. 2006. Estimation of forest volumes by integrating Landsat TM imagery and forest inventory data. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 49(1): 54-62.

33. Rana P, Tokola T, Korhonen L, Xu Q, Kumpula T, Vihervaara P, Mononen L. 2014. Training area concept in a two-phase biomass inventory using airborne laser scanning and RapidEye satellite data. *Remote Sensing*, 6(1): 285-309.
34. Richardson AJ, Wiegand C. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(12): 1541-1552.
35. Roujean J-L, Breon F-M. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote sensing of Environment*, 51(3): 375-384.
36. Sandau R. 2010. Status and trends of small satellite missions for Earth observation. *Acta Astronautica*, 66(1-2): 1-12.
37. Schönert M, Weichelt H, Zillmann E, Jürgens C. 2014. Derivation of tasseled cap coefficients for RapidEye data. In: *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications V. International Society for Optics and Photonics*, p 92450Q.
38. Shataee S, Kalbi S, Fallah A, Pelz D. 2012. Forest attribute imputation using machine-learning methods and ASTER data: comparison of k-NN, SVR and random forest regression algorithms. *International Journal of Remote Sensing*, 33(19): 6254-6280.
39. Tomppo EO, Gagliano C, De Natale F, Katila M, McRoberts RE. 2009. Predicting categorical forest variables using an improved k-Nearest Neighbour estimator and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 113(3): 500-517.
40. Tucker CJ. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
41. Wallner A, Elatawneh A, Schneider T, Knoke T. 2014. Estimation of forest structural information using RapidEye satellite data. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 88(1): 96-107.



## Evaluation of RapidEye satellite data for estimation some quantitative structure variables in the Caspian forests of Gorgan region

N. Noorian<sup>1\*</sup>, Sh. Shataee<sup>2</sup>, J. Mohammadi<sup>3</sup>

1. PhD Graduated Student of Forestry, Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
2. Prof. College of Forest Science, Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
3. Assis. Prof. College of Forest Science, Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

### ARTICLE INFO

#### *Article history:*

Received 20 June 2018  
Accepted 9 January 2019  
Available online 19 February 2019

#### *Keywords:*

Hyrcaian forest  
Non-parametric methods  
RapidEye satellite data  
Golestan province

### ABSTRACT

Estimation of quantitative forest attributes is important for its applications in order to understand the forest condition and performance. The aim of this study was the estimation of some quantitative forest attributes (stand volume, basal area, and tree stem density) using the RapidEye satellite data (2011) and non-parametric algorithms in the part of Hyrcanian forests in the Gorgan region. For this purpose, 418 plots each with an area of 1000m<sup>2</sup> were established using a simple random sampling method. In each plot, information including a position of plot center, diameter at breast height of all trees and height of selected trees were recorded. Based on which the standing volume and basal area per ha were derived. A RapidEye image was processed by different synthetic bands derived from rationing, principal component analysis, texture analysis, and Tasseledcap, and the pixel gray values corresponding to the ground samples were extracted from spectral bands. These were further considered as the independent variables to predict the Quantitative characteristics. Modeling was carried out based on 75% of sample plots as training set using K-Nearest Neighbor, support vector machine, and random forest methods. The predictions were cross-validated using the left-out 25% samples. The results showed Random forest comparatively returned the best estimates for stand volume, basal area and tree stem density with root mean square error of 39.83%, 29.71%, and 50.11% and relative bias of 0.01, 1.69 and 2.11 as well, respectively. The results of this study also showed that due to the heterogeneity and density of Caspian forests, RapidEye satellite spectral data have a moderate ability to estimate the quantitative forest attributes.

\* Corresponding author e-mail address: noorian.86@gmail.com