



مدل سازی ذخیره کربن روی زمینی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های Sentinel 1,2 و روابط پارامتریک و ناپارامتریک (مطالعه موردی: جنگل‌های سری سه

مقاله پژوهشی

سنگده)

سیدمحمد مهدی رضایی سنگده^۱، اصغر فلاح^۲، هومن لطیفی^۳، نسترن نظریانی^۴*

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۱ / پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۳۱ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

چکیده

در پژوهش پیش‌رو هدف؛ یافتن مدل‌های آماری مناسب جهت برآورد ذخیره کربن روی زمینی به کمک تلفیق داده‌های طیفی و راداری سنجنده ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲ در قسمتی از جنگل‌های

سری سه سنگده ساری است. در این راستا تعداد ۱۵۰ قطعه نمونه دایره‌ای به روش تصادفی-منظم به مساحت ۱۰ آری انتخاب و پیاده شد. در هر قطعه نمونه مشخصه‌های نوع گونه، ارتفاع کل درختان و قطر برابرسینه درختان با بیش از ۷/۵ سانتی‌متر ثبت شد. سپس چگالی تمام گونه‌های موجود در قطعات نمونه در آزمایشگاه تعیین شد. بعد از آن میزان زی‌توده در سطح قطعات نمونه بر اساس مدل جهانی فائو و مقدار ذخیره کربن روی زمینی نیز با اعمال ضریب محاسبه گردید. بر روی تصاویر راداری و طیفی پیش‌پردازش و پردازش‌های لازم اعمال شد. سپس ارزش‌های رقومی متناظر با قطعات نمونه زمینی از باندهای طیفی استخراج و به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. مدل‌سازی با روش‌های ناپارامتری جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و نزدیکترین همسایه انجام گرفت. نتایج نشان داد به طور متوسط میانگین زی‌توده روی زمینی ۴۶۹/۰۷ تن در هکتار و ذخیره کربن ۲۳۴/۵۳ تن در هکتار به دست آمد. همچنین بیشترین همبستگی بین باندهای اصلی و مصنوعی با دو

سیدمحمد مهدی رضایی سنگده^۱، اصغر فلاح^۲، هومن لطیفی^۳، نسترن نظریانی^۴✉

۱. دانش‌آموخته دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
۲. استاد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳. دانشیار، گروه فتوگرامتری و سنجنش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۴. پژوهشگر مقطع پسا دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

DOI: 10.30495/girs.2023.690665

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: nazariani69@yahoo.com

آمده نشان داد استفاده از روش‌های جنگل تصادفی و تصاویر ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲ عملکرد مناسبی در برآورد مشخصه‌های زی‌توده و ذخیره کربن را نداشت.

واژه‌های کلیدی: اریبی، زی‌توده، سنجش از دور، شاخص‌های پوشش گیاهی، ماشین‌بردار پشتیبان.

مشخصه مورد بررسی مربوط به باند مادون قرمز نزدیک حاصل شد. نتایج اعتبارسنجی مدل‌سازی تلفیق داده‌های نوری و راداری ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲ با زی‌توده و ذخیره کربن روی‌زمینی نشان داد؛ روش جنگل تصادفی نسبت به دیگر روش‌های ناپارامتریک با درصد میانگین مجذور مربعات خطا و درصد اریبی به‌ترتیب برای مشخصه‌های زی‌توده (۳۲/۷۹ تن در هکتار و ۲/۲۴- درصد) و ذخیره کربن (۳۰/۷۹ تن در هکتار و ۰/۰۱-) در مدل‌سازی عملکرد بهتری داشته است. به‌طور کلی نتایج حاصل از اعتبارسنجی به‌دست

لطفاً به این مقاله استناد کنید: رضایی سنگدهی، س.، م.، م.، فلاح، ا.، لطیفی، ه.، نظریانی، ن. مدل‌سازی ذخیره کربن روی‌زمینی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های Sentinel 1,2 و روابط پارامتریک و ناپارامتریک (مطالعه موردی: جنگل‌های سری سه سنگده). نشریه سنجش‌از‌دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۴(۳): ۸۱-۹۸.

مقدمه

دورسنجی، پتانسیل زیادی برای تعیین محتوای کربن پوشش گیاهی دارند. علاوه بر این در مناطق غیر قابل دسترس نیز امکان چگونگی این قابلیت را برای پوشش گیاهی دارد و به این دلیل برخی مطالعات بر روی ارزیابی کربن با استفاده از روش سنجش از راه دور متمرکز شده است (۳۱) و برای تهیه اطلاعات به هنگام با تکرار بیشتر که موجب ارتقای فعالیت‌های مدیریت منابع می‌شوند، داده‌های سنجش از دور را می‌توان استفاده کرد و کیفیت پایگاه داده را افزایش داد (۲). باید یادآور شد که انتخاب روش مناسب مدل‌سازی یک چالش کلیدی است، زیرا روش مدل‌سازی اهمیتی برابر با نوع داده سنجش از دور در برآورد اندوخته کربن دارد (۱۱). در این راستا می‌توان به پژوهش صفری و همکاران (۲۴) در جنگل‌های زاگرس اشاره کرد که به بررسی نه روش مدل‌سازی شامل رگرسیون خطی (Simple Linear Regression)، مدل تجمعی تعمیم‌یافته (Generalized Additive Models)، جنگل تصادفی (Random Forest)، ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine)، درختان رگرسیون تقویت‌شده (Boosting Regression)، k-امین نزدیک‌ترین همسایه (K-Nearest Neighbor)، مدل پردازش گوسی (Gaussian Processes) و رگرسیون اسپلاین تطبیقی چندگانه (Regression/Model Multivariate Additive Regression Splines, Cubist) استفاده از فرآیند بوت استرپ برای برآورد زی‌توده روی زمینی با استفاده از تصاویرهای لندست ۸ (Landsat 8) پرداختند. نتایج برآورد با ضریب تبیین بیشتر از ۰/۷ و درصد جذر میانگین مربعات خطا ۳۲ بیانگر توانایی تصاویر لندست ۸ و روش‌های ناپارامتری شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون اسپلاین تطبیقی یافته چندگانه در برآورد اندوخته کربن بود. وفایی و همکاران (۲۸) از داده‌های راداری ماهواره آلوِس ۲- (ALOS-2) با قطبش کامل و تصویرهای نوری ماهواره سنتینل ۲- (Sentinel-2)، برای برآورد زی‌توده روی زمینی درختان در جنگل‌های سری یک حوضه ناو اسالم گیاهان استفاده کردند. در نتایج بهترین مدل شبکه عصبی نشان داد که ترکیب داده‌های نوری و راداری با مقدار ضریب تبیین و

نگرانی‌های اخیر در مورد تغییرات جهانی و بوم‌سازگان‌ها، موجب تلاش برای برآورد زی‌توده با صحت بالا و پایش پویایی آن است (۱۴). بخش اصلی زی‌توده بوم‌سازگان‌های جنگلی، زی‌توده چوبی است و برآورد و پایش این زی‌توده از جنبه‌های مختلفی از قبیل بررسی میزان کربن ذخیره شده، محاسبه میزان تولید اولیه، مطالعه رفتار و شدت آتش و ارزیابی زیست‌محیطی جنگل‌ها و طرح‌های جنگلداری اهمیت دارد (۱۶). از طرفی تولید جنگل، ذخیره و جریان کربن بر مبنای اندازه‌گیری‌های زی‌توده محاسبه می‌گردد و ذخیره کربن در قسمت‌های مختلف گیاه مانند چوب و برگ و ریشه به‌عنوان شاخصی از تولید رویشگاه محسوب می‌شوند (۵). یکی از مهم‌ترین راه‌ها برای اطلاع از میزان ذخیره کربن جنگل‌ها و ساختار جنگل استفاده از آماربرداری زمینی و عملیات میدانی است. آماربرداری زمینی و استفاده از روش‌های معمول میدانی به منظور تهیه نقشه‌های مربوط به پوشش جنگل، پرهزینه و زمان‌بر است و انجام دوره‌ای آن، بسیار کند است (۱۱). همواره روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری زمینی دقیق‌ترین نتایج را فراهم می‌کند، اما این روش با صرف هزینه و زمان بسیاری همراه است (۱۷). به‌عبارتی، دقیق‌ترین روش برآورد زی‌توده و وضعیت ذخیره کربن، قطع و برداشت درختان است، اما قطع و توزین تعداد کافی درخت که بیانگر وضعیت یک گونه در رویشگاه باشد، بسیار پیچیده، وقت‌گیر، مخرب، خسته‌کننده و هزینه‌بر است. به‌همین دلیل، بیش‌تر مطالعات به مناطق کوچک و تعداد نمونه‌های کم محدود می‌شوند (۱۰). از طرفی، روش‌های محدود به قطع درخت مناسب جنگل‌های با بوم-سازگان شکننده و دارای گونه‌های در معرض تهدید نیست (۱۸). بنابراین، بررسی شیوه‌های غیرمخرب که ضمن دربرگرفتن هزینه و وقت کم‌تر، از اعتبار و دقت بالایی برخوردار باشند، ضروری است (۳۱). با توجه به محدودیت‌های روش‌های زمینی در اندازه‌گیری جنگل، در دهه گذشته، سنجش از دور به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری زی‌توده استفاده شده است (۸). اطلاعات حاصل از داده‌های

جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۸۶ و ۳۱/۶۲ مگاگرم در هکتار (۱۵/۳۴ درصد) می‌تواند زی‌توده درختی را برآورد کند. همچنین نتایج استفاده از تصویرهای راداری و نوری به‌طور مجزا نشان داد که مقدار ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا برای مدل‌سازی زی‌توده توسط تصویرهای راداری به ترتیب ۰/۵۷ و ۴۹/۱۷ مگاگرم در هکتار (۲۳/۸۵ درصد) و برای تصویرهای نوری ۰/۷۲ و ۳۹/۵۳ مگاگرم در هکتار (۱۹/۱۷ درصد) که نشان‌دهنده برتری مدل‌سازی زی‌توده روی زمینی توسط تصویرهای نوری بود. نتایج کلی نشان از برآوردهای دقیق‌تر زی‌توده در صورت استفاده همزمان از تصویرهای راداری و نوری و استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks -ANN) داشت. لوریان و همکاران (۱۲) به پیش‌بینی زی‌توده روی زمینی با استفاده از داده‌های چند زمانه سنتینل ۱ (Sentinel-1) در قسمت مرکزی ایتالیا با ترکیب داده‌های سنتینل ۲ و آلوس ۲ پرداختند. نتایج رگرسیونی نشان داد زمانی که مقادیر بالاتر از ۴۰۰ مگاگرم در هکتار در مدل وارد شود، دقت خوبی در پیش‌بینی با ضریب تبیین (۰/۷)، حاصل می‌شود و سودمندی داده‌های سنتینل ۱ را برای تهیه نقشه زی‌توده برای مطالعات محلی و با انباشتگی کربن قابل توجه نشان می‌دهد. آگاتا و همکاران (۱) در پژوهشی، زی‌توده روی زمینی را با استفاده از ترکیب داده‌های سنتینل ۱ و ۲ در لهستان، جایی که مقادیر زی‌توده جنگل آن از ۱-۳۰۰ تن در هکتار بوده با روش رگرسیونی جنگل تصادفی برآورد نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل مورد استفاده، مقادیر کم زی‌توده روی زمینی را بیش‌تر از حد معمول و نیز مقادیر بزرگتر آن را با تخمین کمتری برآورد نمود. در مجموع مقدار جذر میانگین مربعات خطا برابر با ۶۰ تن در هکتار بوده و نتایج اعتبارسنجی بهترین حالت را برای زمانی که زی‌توده بین ۲۰۰-۱۰۰ تن در هکتار باشد، نشان داده است. چن و همکاران (۴) به کمک تصاویر سنتینل ۱ و ۲ و با استفاده از مدل‌های رگرسیونی مختلف در شانگهای چین در سطح ۵۶ قطعه نمونه به برآورد زی‌توده روی زمینی پرداختند. بررسی مدل‌های مورد استفاده، نشان داد

که ویژگی‌های بافت و متغیرهای بیوفیزیکی پوشش گیاهی از مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ها بودند و در این میان الگوریتم ماشین‌بردار بهترین روش برای پیش‌بینی و نقشه‌برداری الگوهای زی‌توده روی زمینی است. به‌طوری‌که میانگین خطا، خطای مطلق، جذر ریشه میانگین خطا و ضریب همبستگی به-ترتیب برابر با ۰/۰۴، ۰/۰۷، ۰/۰۸ مگاگرم در هکتار و ۱ است. همچنین مقادیر پیش‌بینی از چهار مدل بین ۱۱/۸۰ تا ۳۲۴/۱۲ مگاگرم در هکتار متغیر بوده و برای جنگل‌های پهن-برگ خزان‌کننده بسیار دقیق است. نوتاماچوت و همکاران (۲۱) در یک جنگل خصوصی واقع در اندونزی با ترکیب داده‌های سنتینل ۱ و ۲ جهت برآورد زی‌توده روی زمینی و برداشت ۴۵ قطعه نمونه ۲۰×۲۰ نشان دادند که ضریب تبیین در برآورد زی‌توده در صورت استفاده از سنتینل ۱ برابر با ۰/۳۴ و سنتینل ۲ برابر با ۰/۸۲ بود است. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که با ترکیب داده‌های راداری و نوری این مهم به ۰/۸۴ افزایش یافت. مرور منابع حاکی از آن است که امکان برآورد مدل‌سازی زی‌توده روی زمینی جنگل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، با دقتی قابل قبول وجود دارد. مضافاً این‌که، تحت شرایط رویشگاهی متفاوت و گونه‌های مختلف، از داده‌های ماهواره‌ای و هم‌چنین الگوریتم‌های گوناگونی برای این منظور استفاده شده که نکته حائز اهمیت کاربرد معادلات آلومتریک و از پیش آماده جهت مدل‌سازی و برآورد ذخیره کربن روی زمینی در غالب مطالعات است. از طرفی کاربرد سنجش از دور به‌دلایل مختلفی از جمله کاهش وقت و هزینه می‌تواند راهکار مناسبی در این‌گونه مطالعات باشد که در این میان بیشتر مطالعات حاکی از دقت نتایج در خصوص استفاده هم‌زمان از تلفیق سنجنده‌های نوری و راداری بوده است. با توجه به اینکه در بیشتر مطالعات مشابه از روابط آماده آلومتریک برای مدل‌سازی زیست‌توده و ذخیره کربن روی زمینی استفاده شده و علاوه بر آن مطالعه‌ای از نظر برآورد زیست‌توده و به دنبال آن ذخیره کربن روی زمینی صورت نگرفته لذا بهره‌گیری از موارد فوق یا به عبارتی تلفیق داده‌های طیفی و راداری و نقشه‌سازی ذخیره کربن روی زمینی از جنبه‌های نوآوری پژوهش پیش‌رو

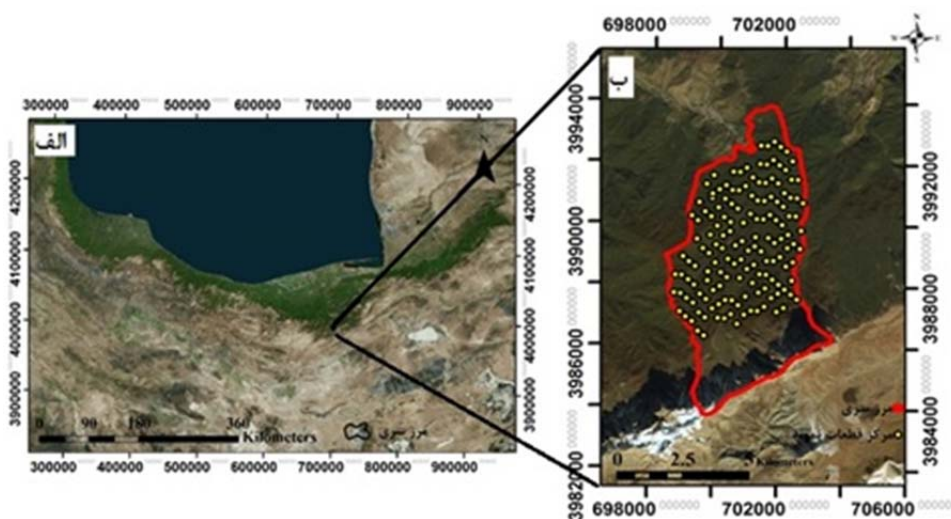
آبخیز شماره ۶۴ جنگل‌های شمال کشور و در منطقه جنگل‌های اداره کل منابع طبیعی استان مازندران منطقه ساری و در محدوده جغرافیایی "۵۳°۱۲'۱۰" تا "۵۳°۱۵'۴۰" طول شرقی و "۳۶°۴۰' تا "۳۶°۵۸'۴۰" عرض شمالی قرار دارد. تپ غالب جنگلی از گونه راش (*Fagus orientalis* Lipsky.) در حدود ۷۹٪، به همراه ممرز (*Carpinus betulus* L.) (۸٪)، توسکا (*Quercus*) (۲٪)، بلندمازو و سایر گونه‌ها از جمله گیلاس وحشی، شیردار، پلت و ون در حدود ۱۰٪ است (۲۳). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

است. در این راستا این مطالعه دارای دو هدف اصلی شامل بررسی قابلیت داده‌های طیفی، راداری و تلفیق این دو داده در برآورد ذخیره کربن در سری سه سنگده ساری و همچنین مقایسه نتایج روش‌های مختلف رگرسیونی در مدل‌سازی ذخیره کربن در منطقه مورد مطالعه است.

روش تحقیق

– موقعیت منطقه مورد مطالعه

برای انجام پژوهش حاضر قسمتی از جنگل‌های سری سه سنگده ساری با دامنه ارتفاعی ۱۴۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از سطح دریا انتخاب شد. این سری در زیر حوزه آبریز تالار سربند از حوزه



شکل ۱. موقعیت قطعات نمونه در الف) جنگل‌های شمال ایران و ب) سری سه سنگده ساری^۱

Fig. 1- Location of study area on a) forests of northern Iran and b) District 3 of Sangdeh of Sari forests

^۱نقاط روی نقشه در شکل ۱-ب مربوط به موقعیت قطعات نمونه مورد آماربرداری است.

Looking شده که با استفاده از یک بیضوی معادل مانند WGS84 به برد زمین ارجاع و از حالت برد مایل خارج گشته- اند. فرمت تصویربرداری مورد نظر مناسب کاربردهای مختلف از جمله جنگل بوده که پهنای تصویربرداری در این حالت ۲۵۰ کیلومتر، توان تفکیک مکانی ۵ متر در امتداد آزیموت و ۲۰ متر در امتداد Range است (۱۳). تصویر اخذ شده در نرم افزار تخصصی SNAP مورد پردازش قرار گرفت. بدین

– داده‌های ماهواره‌ای

تصاویر راداری مربوطه، سنتینل 1A به تاریخ ۱۹ آگوست ۲۰۱۸ بوده که با فرمت تصویربرداری IWS: Interferometric Wide Swath: نوع محصول، GRD و با قطبش‌های VV و VH از سایت سازمان فضایی اروپا (European Space: ESA Agency) اخذ گردید. داده‌های GRD، تصاویری هستند با پیکسل‌های مربعی و Multi-

صورت که ابتدا تصحیحات رادیومتریکی بر روی هر دو قطبش تصویر انجام شده و مقادیر خروجی که به عنوان مقادیر باز پخش (Backscattering) اندازه گیری شده هستند با پارامتر σ_0 برآورد می شوند. سپس تصحیح هندسی از روی تصاویر تصحیح رادیومتری شده انجام و در نهایت به منظور تصحیح خطا یا به عبارتی حذف یا کاهش خطای نویز اسپیکل با استفاده از یک فیلتر پائین گذر با ابعاد 3×3 نسبت به بهبود هر چه بهتر فرکانس های بالایی که ایجاد شدند، اقدام شد.

تصاویر نوری مورد استفاده در این پژوهش از سنتینل 2B مربوط به تاریخ ۲۹ جولای ۲۰۱۸ است که از سازمان فضایی اروپا در سطح تصحیحات LIC دریافت شد. این سطح از تصحیحات از نظر خطای هندسی به دلیل زمین مرجع بودن فاقد خطا بوده و چون انعکاس آن ها در سطح بالای اتمسفر است، باید با اعمال تصحیح اتمسفریک بر روی آن ها، انعکاس آن ها به صورت انعکاس زمینی تبدیل گردد (۶). برای این منظور و البته برای اطمینان از صحت تصحیح هندسی تصویر، در ابتدا با استفاده از نقشه وکتوری جاده و انطباق دقیق لایه جاده ها با تصویر، صحت تطابق هندسی تصویر مورد بررسی قرار گرفت. پردازش تصاویر این سنجنده در نرم افزار ENVI انجام گرفته است. با توجه به این که تعداد ۴ باند این سنجنده با قدرت تفکیک پذیری ۱۰ متری و ۶ باند با قدرت تفکیک پذیری ۲۰ متری است، هر کدام در قالب یک Stack در آمده و سپس با اعمال Rescaling انعکاس آن ها در سطح بالای اتمسفر به انعکاس زمینی تبدیل شده و در مرحله بعد با معرفی طول موج ها تصحیح اتمسفری بر روی آن ها صورت گرفته و جهت استفاده در مراحل بعدی آماده گردید.

– روش پژوهش

– آماربرداری زمینی

به منظور جمع آوری داده ها، در بهار و تابستان ۱۳۹۷ ضمن بررسی و مطالعه منطقه مورد پژوهش، نقشه مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Model) با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر که از نقشه ۱:۲۵۰۰۰ با فاصله خطوط میزان ۱۰ متر (اخذ شده

از دفتر فنی جنگل داری چالوس) تهیه شد. سپس با استفاده از شبکه آماربرداری تصادفی منظم با ابعاد 150×200 متر که در منطقه پیاده شده است تعداد ۱۵۰ قطعه نمونه دایره ای به صورت انتخابی با مساحت ۱۰ آری برداشت گردید؛ و مراکز تمام قطعات نمونه با استفاده از دستگاه GPS (سیستم موقعیت یاب جهانی: Global Positioning System) تفاضلی با روش RTK با خطای کمتر از ۱۰ سانتی متر مشخص گردید. در هر یک از قطعات نمونه مشخصه های نوع گونه، ارتفاع و قطر برابر سینه بیش از $7/5$ سانتی متر تمامی درختان ثبت شد. لازم به ذکر است که زمان آماربرداری زمینی در تابستان ۱۳۹۷ انجام شد.

پس از تعیین قطعات نمونه مورد نظر و اندازه گیری تمامی درختان با قطر بالاتر از $7/5$ سانتی متر در محدوده آن با استفاده از رابطه (۱) حجم سرپای تک درختان محاسبه شد. سپس حجم سرپای درختان ابتدا در قطعات نمونه ۱۰ آری و براساس آن، مقادیر این مشخصه ها در هر هکتار محاسبه شد.

از رابطه (۱) برای برآورد حجم درختان استفاده شد. در رابطه با جنگل های طبیعی شمال ایران و یا خارج از آن ضریب شکل (f) را به طور میانگین $0/5$ در نظر می گیرند (نمیرانیان، ۱۳۸۸):

$$V = g \times h \times f \quad [1]$$

در رابطه فوق V حجم درخت بر حسب سیلو، g سطح مقطع بر حسب متر مربع و h ارتفاع درخت بر حسب متر و f ضریب شکل درختان است.

– محاسبه چگالی گونه ها

جهت تهیه نمونه های اولیه، به دلیل ممنوعیت قطع و بهره برداری، از درختان شکسته و افتاده و یا ریشه کن استفاده شده که در مرحله بعدی ۹ عدد نمونه به ابعاد $2 \times 2 \times 2$ سانتی متر (۲۹) از هر گونه را از طریق کولیس اندازه گیری کرده سپس جرم نمونه ها توسط ترازوی حساس (با دقت $0/001$ گرم) اندازه گیری و سپس نمونه ها داخل اتوکلاو به مدت ۲۴ ساعت در دمای 2 ± 103 درجه سانتی گراد قرار داده شد تا رطوبت آنها کاملاً از بین برود (۷). پس از خارج کردن، نمونه ها را به

اولین مرحله پردازش داده‌ها مرحله پیش‌پردازش است که در آن خطاها، نویزها و اعوجاج‌های موجود در تصاویر شناسایی و تصحیح می‌شوند و سپس داده‌های تصحیح شده در مرحله پردازش مورد استفاده قرار می‌گیرند. اصلی‌ترین انجام عملیات پیش‌پردازش، تصحیح هندسی و رادیومتریک است: فرآیند پیش‌پردازش تصاویر به منظور استخراج هر چه بهتر اطلاعات انجام شد. فرآیند تصحیح اتمسفری روی تصاویر ماهواره سنتینل ۲ تا حدودی صورت گرفته اما ارزش رقومی این تصاویر بین ۰ تا ۲۸۰۰۰ متغیر است که برای پردازش تصویر، ارزش رقومی پیکسل‌ها در تصویر با استفاده از دستور QUick Atmospheric Correction (QUick) به بازه ۰ تا ۱ تبدیل شد. پردازش تصاویر نیز شامل عملیات‌های مختلف نظیر نسبت‌گیری (Ratioing)، تجزیه مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis)، تجزیه و تحلیل بافت (Texture Analysis)، ادغام باندها (Band Integration) و ساختن شاخص‌های گیاهی (Vegetation Index Making) است که با توجه به اهداف موجود بر روی داده‌های ماهواره‌ای و در راستای اهداف مختلف صورت گرفت. به منظور تصحیح هندسی نیز از روش تصحیح هندسی چند جمله‌ای درجه دو و با استفاده از ۲۰ نقطه کنترل زمینی و با خطای حدود ۰/۴۷ تصحیح استفاده شد. پردازش تصاویر در نرم‌افزار ENVI5.3 انجام گرفت. با توجه به این‌که تعداد چهار باند این سنجنده با قدرت تفکیک‌پذیری ۱۰ متری است، هر کدام در قالب یک فایل (ادغام باندهای ۲، ۳، ۴ و ۸ تصویر Sentinel 2 و تشکیل یک تصویر جدا) در آمد. علاوه بر باندهای اصلی، با اعمال پردازش‌های مناسب باندهای مصنوعی ایجاد شد که در فرآیند مدلسازی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت جهت آماده‌سازی داده‌ها برای تجزیه و تحلیل و استخراج هر چه بهتر اطلاعات ماهواره‌ای در بارزسازی مشخصه‌های کمی در روی تصاویر از پردازش‌هایی شامل، تجزیه یا تحلیل مؤلفه اصلی، آنالیز بافت، نسبت‌گیری‌های مختلف برای ایجاد شاخص‌های مهم گیاهی استفاده می‌شود. در این مطالعه نیز از پردازش‌های

مدت ۱۵ دقیقه در داخل دسی‌کاتور قرار داده تا خنک و از جذب رطوبت محیط توسط نمونه‌ها جلوگیری به عمل آید. سپس جرم خشک نمونه‌ها را یکی یکی وزن و بعد به وسیله کولیس اندازه آنها را در جهات مختلف اندازه‌گیری نموده و با استفاده از حجم و جرم محاسبه شده چگالی چوب گونه‌های مختلف طبق رابطه (۳) بدست آمد (۹).

$$WD = M/V \quad [2]$$

در رابطه (۲) Wood Density: WD چگالی چوب (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، M جرم خشک نمونه چوب (گرم) و V حجم خشک نمونه چوب (سانتی‌متر مکعب) است.

- محاسبه زی‌توده و ذخیره کربن روی زمینی جهت تعیین میزان زی‌توده روی زمینی از مدل جهانی فائو که در جنگل‌های بسته، با آب و هوای مرطوب مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده شد. برای همین منظور، پس از محاسبه چگالی تمامی گونه‌ها، با استفاده از رابطه (۳) میزان زی‌توده در سطح قطعات نمونه محاسبه شده است (فائو، ۱۹۹۷).

$$Biomass = VOB \times WD \times BEF \quad [3]$$

سپس برای محاسبه مقدار مشخصه فاکتور زی‌توده، اگر حاصل ضرب حجم در چگالی بیشتر از ۱۹۰ تن در هکتار باشد مقدار فاکتور گسترش زی‌توده (BEF: Biomass Factor Expansion)، برابر با ۱/۷۴ و اگر حاصل ضرب حجم در چگالی کمتر از ۱۹۰ تن در هکتار باشد مقدار آن ۲/۶۶ در نظر گرفته شد (فائو، ۱۹۹۷). در این رابطه (VOB: Volume Over Bark)

حجم برآورد شده برای هر اصله درخت، WD چگالی خشک محاسبه شده گونه‌های مختلف و BEF فاکتور گسترش زی‌توده است. برای محاسبه میزان ذخیره کربن، عدد زی‌توده به دست آمده را در ضریب تبدیل به ذخیره کربن که معمولاً ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود (۲۶) ضرب شد. در این مطالعه آماربرداری زمینی با روش تصادفی-منظم و برای تعیین وضعیت نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و همگن بودن داده‌ها از آزمون لون استفاده شد.

به‌عنوان متغیر مستقل و مقادیر مشخصه‌های کمی از جمله زی-توده و ذخیره کربن روی زمینی و سایر مشخصه‌ها در قطعات نمونه برداشت شده به‌عنوان متغیر وابسته استفاده شد که مدل‌سازی از روش‌های ناپارامتری جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و نزدیک‌ترین همسایه و روش پارامتری رگرسیون چندگانه خطی صورت گرفته است.

- نسبت‌گیری باندها و ایجاد شاخص‌های گیاهی

برای استخراج شاخص‌های گیاهی از تصاویر سنتینل ۲ که دارای باندهای طیفی در محدوده مرئی و مادون قرمز است، استفاده شده که شاخص‌های زیر از آن استخراج گردید (جدول ۱).

مختلفی در بارسازی مشخصه‌های کمی در روی تصاویر راداری و طیفی استفاده گردید که در ذیل آمده‌است.

- استخراج ارزش‌های طیفی

ارزش‌های طیفی معادل قطعه‌های زمینی از باندهای اصلی و مصنوعی استخراج و به‌عنوان متغیر مستقل در مدل‌ها استفاده شد.

- مدل‌سازی زی‌توده و ذخیره کربن

متغیرهای مختلف استخراج شده از تصاویر راداری (۱۶ ویژگی)، تصاویر نوری (۹۹ ویژگی) و در نهایت ترکیب تصاویر راداری و نوری (۲۱۶ ویژگی)، مانند مقادیر باندی، شاخص‌های گیاهی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و آنالیز بافت

جدول ۱. شاخص‌های گیاهی

Table 1. Plant characteristics

شاخص‌های محاسباتی از داده اپتیکال	فرمول محاسبه شاخص
DVI (Difference Vegetation Index)	$Nir - Red$
GDVI (Green Difference Vegetation Index)	$Nir - Green$
GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{Nir - Green}{Nir + Green}$
GRVI (Green Ratio Vegetation Index)	$\frac{Green}{Red}$
MSR (Modified Simple Ratio)	$\frac{(Nir/Red) - 1}{(\sqrt{Nir/Red}) + 1}$
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{(Nir - Red)}{(Nir + Red)}$
NLI (Non-Linear Index)	$\frac{(Nir^2 - Red)}{(Nir - Red)}$
RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index)	$\frac{(Nir^2 - Red)}{(\sqrt{Nir + Red})}$
RVI (SR) (Ratio Vegetation Index-Simple Ratio)	$\frac{Red}{Nir}$

وقوع، میانگین و واریانس، و بر مبنای هم‌وقوع شاخص‌های تباین، همبستگی، عدم تجانس (ناهمگنی)، آنتروپی و همگنی برای تمامی باندها استخراج گردید. هم‌چنین اندازه پنجره مورد استفاده در این مطالعه ۵×۵ انتخاب گردید که روابط آماری مشخصه‌های بافت در جدول ۲ آمده است.

- آنالیز بافت

الگوی بافتی توسط مقادیر درجه خاکستری با تغییر پذیری تن تصویر در منطقه یا در محیط همسایگی با استفاده از پنجره‌ای که بر روی تصویر قرار داده می‌شود، مشخص می‌گردد. در مطالعه پیش‌رو نیز از مشخصه‌های بافت بر مبنای ماتریس

جدول ۲. مشخصه‌های بافت

Table 2. Texture characteristics

فرمول آماری	مشخصه‌های محاسباتی از داده‌های راداری
$\mu_x = \sum_{i=0}^{N-1} i \times P_x(i) \quad \mu_y = \sum_{j=0}^{N-1} j \times P_y(j)$	میانگین

$\sigma_x^2 = \sum_{i=0}^{N-1} (i - \mu_x)^2 P_y(i)$	واریانس
$\sigma_y^2 = \sum_{j=0}^{N-1} (j - \mu_y)^2 P_y(j)$	واریانس
$CON = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2$	تباين
$COR = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} ij P_{i,j} (i - j)^2 - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \times \sigma_y}$	همبستگی
$DIS = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j} i - j $	عدم تجانس
$ENT = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j} (-\ln P_{i,j})$	آنتروپی
$HOM = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2}$	همگنی

این مطالعه استفاده شد. در این روش مقدار گاما (Gamma) معمولاً از تقسیم یک بر تعداد متغیرهای مستقل که در این جا تعداد باندهای اصلی و مصنوعی است، بدست می‌آید. برای تعیین مقادیر بهینه ظرفیت (Capacity) و اپسیلون (Epsilon) از اعتبارسنجی متقابل (Cross-Validation) و جستجوی خودکار شبکه‌ای با اعتبارسنجی ۱۰ قسمتی و تکرار ۱۰۰۰ بار استفاده گردید. مقدار ظرفیت از ۱ تا حداکثر ۵۰ و مقدار اپسیلون از ۰/۱ تا حداکثر ۰/۵ در نظر گرفته شد.

– الگوریتم نزدیکترین همسایه (k-Nearest Neighbor: kNN) در اجرای این روش از چهار معیار فاصله اقلیدسی، مربع فاصله اقلیدسی، منهن و چبیشف به صورت وزن داده شده و داده‌ها به صورت استاندارد استفاده گردید. با توجه به اهمیت تعداد همسایه، مقدار بهینه این پارامتر بین ۱ تا ۳۵ در نظر گرفته شد. در این روش نیز با جستجوی خودکار شبکه‌ای و اعتبارسنجی ۱۰ قسمتی و ۱۰۰۰ بار تکرار انجام شده است.

– اعتبارسنجی مدل

به منظور ارزیابی و برازش مدل‌های رگرسیونی، ۳۰ درصد از داده‌ها به صورت تصادفی انتخاب (۱۵) و به عنوان مجموعه داده‌های ارزیابی کنار گذاشته شدند. با استفاده از معیارهای میانگین جذر مربعات خطا (Root Mean Square of the Error) (رابطه ۵)، اریبی (رابطه ۶)، درصد میانگین جذر

– تجزیه مؤلفه اصلی

به منظور حذف اطلاعات تکراری طیفی و متمرکز کردن عمده اطلاعات باندهایی که دارای همبستگی زیادی هستند تجزیه مؤلفه اصلی بر روی تصاویر انجام گرفت. از آنجایی که انتخاب باندها برای این امر به دو صورت استاندارد و انتخابی صورت می‌گیرد، در این پژوهش از روش انتخابی (باندهای راداری سنتینل ۱ با دو قطبش افقی و عمودی، باندهای نوری سنتینل ۲ ده و بیست متری) استفاده و اطلاعات حاصل از آن‌ها استخراج گردید.

– روش‌های ناپارامتریک

– الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest:RF)

اجرای مدل‌سازی به روش جنگل تصادفی و تعیین تعداد بهینه درختان ابتدا با ۴۰۰ درخت اولیه انجام شد. سپس با مشاهده نمودار تغییرات میزان مربعات خطا برای داده‌های آزمون (Train) و آموزش (Test) در جایی که با افزایش تعداد روند افزایش مربعات خطا ثابتی پیدا نمود به عنوان تعداد درخت بهینه انتخاب گردید. به منظور تعداد بهینه برآورد گره‌ها (Predictors)، از جذر تعداد کل متغیرها استفاده شد و همچنین مقدار نسبت زیر نمونه (Subsample Proportion) از ۰/۵ تا ۰/۹ مورد آزمون و بررسی قرار گرفته است.

– الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine: SVM)

برای مدل‌سازی با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان از توابع پایه شعاعی، چندجمله‌ای درجه دو و سه، سیگموئید و خطی در

تصویر انجام و از نرم افزار STATISTICA نیز برای مدل سازی استفاده شد.

مربعات خطا (رابطه ۷) و درصد اریبی (رابطه ۸)، اعتبار مدل های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad [5]$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad [6]$$

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}}{\bar{y}} \times 100 \quad [7]$$

$$Bias\% = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) / n}{\bar{y}} \times 100 \quad [8]$$

نتایج

آمار توصیفی مربوط به مشخصه های مورد اندازه گیری در جدول ۳ آورده شده است. حداقل، حداکثر و میانگین زی توده روی زمینی ۱۲۰، ۹۵۵/۹۱ و ۴۶۹/۰۷ تن در هکتار و برای مشخصه ذخیره کربن ۶۰، ۴۷۷/۹۵ و ۲۳۴/۵۳ تن در هکتار است.

در این روابط \bar{Y} مقدار برآورد شده، \bar{Y} میانگین برآورد شده و Y مقدار مشاهده شده و همچنین n تعداد مشاهدات (قطعات نمونه) است. لازم به ذکر است؛ برای پیاده کردن قطعات نمونه بر روی تصویر از ArcGIS 10.3، سپس در محیط نرم افزارهای SNAP و ENVI 5.3 پیش پردازش و پردازش

- همبستگی باندها با زی توده و ذخیره کربن روی زمینی

جدول ۴ نشان می دهد متغیرهای زی توده و ذخیره کربن روی زمینی بیشترین همبستگی را داشته اند.

جدول ۳. آماره توصیفی زی توده و ذخیره کربن روی زمینی

Table 3. Descriptive statistics of biomass and carbon storage on land

مشخصه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	اشتباه معیار	چولگی	کشیدگی	دامنه
زی توده روی زمینی (تن در هکتار)	۱۲۰/۰۰	۹۵۵/۹۱	۴۶۹/۰۷	۱۵۳/۴۲	۱۲/۵۲	۰/۶۸	۰/۶۲	۸۳۵/۹۱
ذخیره کربن روی زمینی (تن در هکتار)	۶۰/۰۰	۴۷۷/۹۵	۲۳۴/۵۳	۷۶/۷۱	۶/۲۶	۰/۶۸	۰/۶۲	۴۱۷/۹۵

جدول ۴. همبستگی پیرسون بین باندها با زی توده و ذخیره کربن روی زمینی

Table 4. Pearson correlation between bands with biomass and ground surface carbon storage

باند	میزان همبستگی	باند	میزان همبستگی
NIR	-۰/۴۶۰**	B11	-۰/۲۷۳**
B8A	-۰/۴۴۶**	Red	-۰/۲۵۳**
B07	-۰/۴۴۱**	Entropy B11	-۰/۲۰۸*
B06	-۰/۴۳۶**	PCA _c	-۰/۱۸۲*
Blue	-۰/۴۰۶**	Distance B11	-۰/۱۶۸*
Green	-۰/۳۳۱**	Homogeneity.B11	-۰/۱۶۷*
B05	-۰/۳۲۴**		

***، **، * معنی داری در سطح به ترتیب ۹۵ و ۹۹ درصد احتمال

Mea:(میانگین)، var:(واریانس)، con:(تباين)، cor:(همبستگی)، dis:(عدم تجانس)، ent:(آنترپی)، hom:(همگنی)

مدل سازی با داده های ماهواره ای داده های راداری ماهواره سنتینل ۱ طبق جدول ۵ نشان می دهد که با در نظر گرفتن درصد جذر میانگین مربعات خطا و مقادیر اریبی، روش ناپارامتری جنگل تصادفی در مدل سازی وضعیت مناسب تری نسبت به سایر روش ها داشته است.

مدل سازی با استفاده از روش های ناپارامتری بین داده های ماهواره ای، متشکل از باندهای راداری، طیفی و تلفیقی از این دو با مشخصه های زی توده و ذخیره کربن روی زمینی صورت گرفت. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل سازی

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی مدل‌سازی داده‌های راداری ماهواره سنتینل ۱ با زی‌توده و ذخیره کربن روی‌زمینی

Table 5. Validation results of Sentinel 1 radar data modeling model with biomass and ground surface carbon storage

ذخیره کربن روی‌زمینی		زی‌توده روی‌زمینی		نوع کرنل و معیار	الگوریتم
RMSE%	Bias%	RMSE%	Bias%		
۳۲/۸۴	۲/۳۱۵	۳۲/۶۷	۵/۶۶	-	جنگل تصادفی
۴۵/۱۴	۹/۶۵	۴۴/۴۴	۳/۶۴	خطی	
۳۵/۴۸	۱۲/۹۳	۳۵/۴۹	۲۷/۵۱	چندجمله‌ای درجه دو	
۳۳/۸۴	۱۲/۴۰	۳۳/۸۴	۲۶/۳۷	چندجمله‌ای درجه سه	ماشین بردار پشتیبان
۳۵/۸۹	۱۲/۷۶	۳۵/۶۴	۲۷/۱۰	پایه شعاعی	ناپارامتریک
۳۸/۳۲	۱۴/۲۲	۳۷/۳۷	۳۱/۴۸	سیگموئید	
۳۳/۸۲	-۰/۳۱	۳۳/۸۲	-۰/۶۷	فاصله اقلیدسی	
۳۳/۶۳	-۰/۵۶	۳۳/۶۳	-۱/۱۹	مربع فاصله اقلیدسی	
۳۲/۸۹	-۱/۵۰	۳۲/۸۹	-۳/۱۹	منهتن	
۳۲/۷۹	-۰/۴۳	۳۲/۷۹	-۰/۹۲	چیبشف	

بردار پشتیبان با کرنل پایه شعاعی شرایط به‌مراتب مناسب‌تری را نشان داد.

در نهایت با تلفیق داده‌های نوری و راداری، روش جنگل تصادفی نسبت به دو روش دیگر برازش بهتری در برآورد زی-توده و ذخیره کربن روی‌زمینی داشته است (جدول ۷).

نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل‌سازی داده‌های طیفی ماهواره سنتینل ۲ طبق جدول ۶ نشان می‌دهد که در برآورد هر دو مشخصه زی‌توده و ذخیره کربن روی‌زمینی، با توجه به مقادیر درصد جذر میانگین مربعات خطا و اریبی روش ماشین-

جدول ۶. نتایج اعتبارسنجی مدل‌سازی داده‌های طیفی ماهواره سنتینل ۲ با زی‌توده و ذخیره کربن روی‌زمینی

Table 6. Validation results of Sentinel 2 satellite spectral data modeling with biomass and surface carbon storage

ذخیره کربن روی‌زمینی		زی‌توده روی‌زمینی		نوع کرنل و معیار	الگوریتم ناپارامتریک
RMSE%	Bias%	RMSE%	Bias%		
۲۹/۸۹	۳/۵۲	۳۰/۴۱	۷/۳۱	-	جنگل تصادفی
۴۵/۰۷	۲۰/۲۷	۳۸/۱۶	۳۱/۴۸	خطی	
۲۷/۴۷	۰/۱۶	۲۷/۴۷	۰/۲۸	چندجمله‌ای درجه دو	
۲۷/۶۳	۱/۰۳	۲۷/۶۳	۲/۱۹	چندجمله‌ای درجه سه	ماشین بردار پشتیبان
۲۴/۶۸	۲/۱۰	۲۴/۶۸	۳/۳۲	پایه شعاعی	ناپارامتریک
۲۶/۵۵	۱۱/۱۷	۲۶/۵۴	۲۳/۶۹	سیگموئید	
۳۰/۶۴	-۲/۶۶	۳۰/۶۴	-۵/۶۶	فاصله اقلیدسی	
۳۲/۰۲	۰/۳۳	۳۲/۰۲	۰/۷۱	مربع فاصله اقلیدسی	
۳۴/۳۹	-۱/۱۹	۳۴/۳۹	-۲/۵۴	منهتن	
۳۲/۳۸	۰/۴۴	۳۲/۳۸	۰/۹۳	چیبشف	

جدول ۷. نتایج اعتبار سنجی مدل سازی تلفیق تصاویر ماهواره سنتینل ۱ و ۲ با زی توده و ذخیره کربن روی زمینی

Table 7. Validation results of modeling integration of Sentinel 1, 2 satellite images with biomass and surface carbon storage

ذخیره کربن روی زمینی		زی توده روی زمینی		نوع کرنل و معیار	الگوریتم ناپارامتریک
RMSE%	Bias%	RMSE%	Bias%		
۳۰/۷۹	-۰/۰۱	۳۲/۷۹	-۲/۴۴		جنگل تصادفی
۵۰/۰۴	۷/۴۸۹	۵۰/۵۴	۶/۸۱۳	خطی	
۳۶/۵۲	۷/۲۹۴	۳۶/۵۲	۱۵/۵۱۲	چندجمله ای درجه دو	
۳۵/۳۳	۱۰/۵۳۶	۳۵/۳۳	۲۲/۴۱۹	چندجمله ای درجه سه	ماشین بردار پشتیبان
۳۸/۸۴	-۱/۶۶۲	۳۸/۸۴	-۳/۶۰۳	پایه شعاعی	
۳۷/۵۰	۷/۳۴۱	۳۷/۵۰	۱۵/۵۹۹	سیگموئید	
۳۳/۴	-۳/۱۹۸	۳۳/۴	-۶/۸۰۴	فاصله اقلیدسی	
۳۶/۱۱	-۶/۷۲۹	۳۶/۱۱	-۱۴/۳۱۸	مربع فاصله اقلیدسی	نزدیکترین همسایه
۴۱/۹۲	-۷/۹۱۴	۴۱/۹۲	-۱۶/۸۳۷	منهتن	
۳۳/۴۹	-۱/۷۵۸	۳۳/۴۹	-۳/۷۴۱	چیبیشف	

بهترین برازش توسط روش های ناپارامتری در برآورد مشخصه مورد بررسی در جدول ۸ آمده است. بدین ترتیب روش جنگل تصادفی زمانی که تلفیق داده های ماهواره های Sentinel 1, 2 انجام گرفته، نتایج بهتری را نشان داده و در مقابل روش ماشین بردار پشتیبان و نزدیک ترین همسایه، در استفاده از داده های طیفی، برازش مناسب تری داشت.

بهترین برازش توسط روش های ناپارامتری در برآورد مشخصه مورد بررسی در جدول ۸ آمده است. بدین ترتیب روش جنگل تصادفی زمانی که تلفیق داده های ماهواره های Sentinel 1, 2 انجام گرفته، نتایج بهتری را نشان داده و در مقابل روش ماشین بردار پشتیبان و نزدیک ترین همسایه، در استفاده از داده های طیفی، برازش مناسب تری داشت.

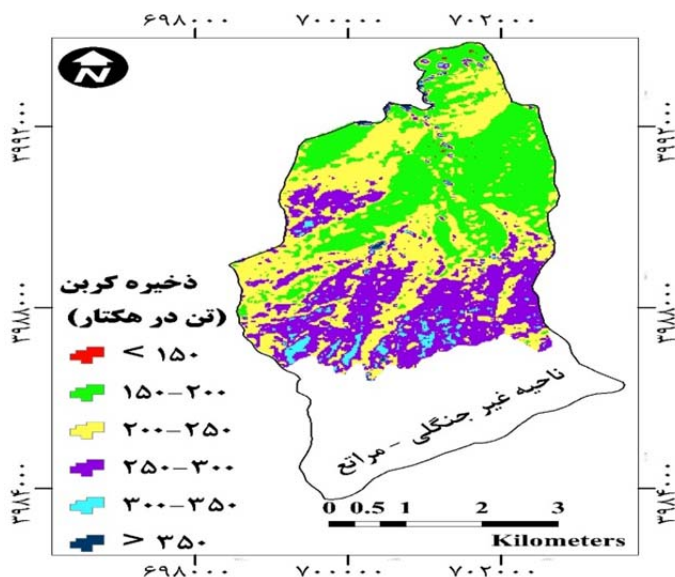
جدول ۸. نتایج اعتبار سنجی مدل سازی داده های ماهواره ای با زی توده و ذخیره کربن روی زمینی

Table 8. Validation results of modeling satellite data with biomass and surface carbon storage

نزدیکترین همسایه		ماشین بردار پشتیبان		جنگل تصادفی		روش
RMSE%	Bias%	RMSE%	Bias%	RMSE%	Bias%	
۳۲/۰۲	۰/۴۵	۲۴/۶۸	۰/۷۴	۳۲/۷۹	-۰/۵۲	مشخصه
						زی توده
۳۲/۰۲	۰/۴۵	۲۴/۶۸	۰/۹۸	۳۰/۷۹	۰/۰۱	ذخیره کربن

شکل ۲ می توان مناطق با ذخیره کربن مختلف را شناسایی نمود. به طوری که در جهت شمالی منطقه مورد مطالعه و در ارتفاعات پائین تر میزان ذخیره کربن روی زمینی اغلب مابین ۲۰۰-۱۵۰ تن در هکتار و با افزایش ارتفاع از سطح دریا و در قسمت های جنوبی تر این مهم به ۳۰۰-۲۵۰ و ۳۵۰-۳۰۰ تغییر می یابد.

نقشه پراکنش ذخیره کربن روی زمینی - برای تهیه نقشه پراکنش ذخیره کربن روی زمینی به منظور نشان دادن توزیع مکانی آن، از نتایج با توجه به نتایج اعتبارسنجی مدل سازی داده های ماهواره ای و کمی (خصوصیات توپوگرافی) با مشخصه های کمی که مناسب ترین مدل را در پیش بینی این مشخصه ارائه نموده، استفاده گردید. با توجه به



شکل ۲. نقشه پراکنش ذخیره کربن روی زمینی در منطقه مورد مطالعه

Fig. 2- Land surface carbon storage distribution map in the study area

همکاران (۲۰) مبنی بر دامنه تغییرات زیاد داده‌های زمینی مطابقت دارد.

با توجه به بررسی همبستگی میان زی توده و ذخیره کربن روی زمینی با باندهای مختلف، نتایج نشان داد که باند مادون قرمز نزدیک بیشترین همبستگی را در برآورد این دو مشخصه با مقدار 0.46 در سطح 99% احتمال داشته است. یکی از دلایل همبستگی بیشتر باند مادون قرمز در مقایسه با سایر باندهای دیگر با زی توده و یا ذخیره کربن روی زمینی این است که طیف مادون قرمز نزدیک کمتر تحت تأثیر پخش اتمسفری قرار می‌گیرد؛ لذا انرژی بازتاب شده از پوشش گیاهی با سهولت بیشتری به سنجنده می‌رسد. به عبارتی با افزایش رشد درختان و حجم توده، تاج درختان بزرگ‌تر، آب برگ‌ها بیشتر و تعداد اشکوب‌های توده نیز افزایش می‌یابد که به نوبه خود باعث ایجاد سایه بیشتر در تاج، افزایش خلل و فرج در تاج در نتیجه پخش و جذب بیشتر انرژی و در نهایت بازتاب کمتر توده می‌شود. همچنین می‌دانیم که میزان بازتابش از پوشش زنده به مقدار آب، ساختمان سلولی، مقدار کلروفیل و ساختمان گیاه و نیز اختلاف مورفولوژیکی نظیر تاج پوشش، شکل برگ و زاویه سطح برگ در باندهای مختلف بستگی

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به توانایی زیاد بوم‌سازگان‌های جنگلی در ذخیره کربن می‌توان اذعان داشت؛ این بوم‌سازگان تأثیر اساسی در ذخیره جهانی کربن در اتمسفر دارد. با توجه به اهمیت کمی کردن کربن در مقیاس‌های مختلف محلی تا جهانی، این پژوهش سعی دارد تا میزان اندوخته کربن جنگل‌های سری سه سنگده ساری را با استفاده از روش‌های کم هزینه برآورد کند. براساس اطلاعات موجود در بیشتر مطالعات برای مدل‌سازی زی توده از روابط آماده آلومتریک استفاده شده است. لذا این تحقیق در نظر دارد تا به کمک تلفیق داده‌های طیفی و راداری ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲ به یافتن مدل‌های آماری و تجربی مناسب جهت برآورد ذخیره کربن روی زمینی در منطقه مورد مطالعه بپردازد.

در مجموع نتایج به دست آمده از بررسی آماره توصیفی نشان می‌دهد که با توجه به دامنه تغییرات مشاهده شده، نمونه خوبی از توده‌های جنگلی به لحاظ دارا بودن از تمامی قطر و ارتفاع است. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن است که منطقه مورد مطالعه از نظر توزیع مکانی مشخصه مورد بررسی دارای شرایط ناهمگن است و از این منظر با نتایج مطالعه نوریان و

علت بالاتر بودن خطای آن را می‌توان به نوع پوشش جنگلی منطقه مورد مطالعه که از نوع سوزنی‌برگان است، نسبت داد. بدین ترتیب با توجه به نتایج می‌توان اذعان داشت که در منطقه مطالعاتی حاضر، اطلاعات طیفی نقش مهم و کاربردی‌تر را در برآورد زی‌توده و ذخیره کربن روی‌زمینی نسبت به تصاویر راداری داشته و در مجموع نشان از قابلیت متوسط ماهواره سنتینل در تخمین مشخصه‌ها دارد. در صورت کاربرد سنجش از دور در برآورد زی‌توده و مشخصه‌های ساختاری جنگل پیشنهاد می‌شود از داده‌های راداری با طول موج بلند، قطبش‌های چهارگانه و کاربرد تکنیک‌های تداخل‌سنجی و ترکیب با داده‌های طیفی با قدرت تفکیک مکانی بالا به‌منظور افزایش دقت و صحت ارزیابی استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود داده‌های طیفی مانند (PRISM Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping: استر و اسپات با قابلیت دید استریو جهت برآورد ساختار عمودی که از پارامترهای مهم تخمین زی‌توده است، مورد استفاده قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

در پایان نامه: این مقاله حاصل پایان نامه با عنوان مدل‌سازی ذخیره کربن روی زمینی و مشخصه‌های ساختاری جنگل با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره سنتینل ۱ و ۲ (مطالعه موردی: جنگل‌های سری سه سنگده) در مقطع (دکتر) در سال ۱۳۹۹ و کد ۲۴۵۶۰۲ است که با حمایت دانشکاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شده است.

دارد، لذا تعیین صحیح جهت این همبستگی از نظر مثبت یا منفی بودن نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد که در این زمینه می‌توان ویژگی‌هایی مانند چگونگی پوشش گیاهی، خاک، درصد تاج پوشش و ... در قطعات نمونه زمینی را برای تحلیل‌های بعدی مورد مطالعه قرار داد.

در پژوهش پیش‌رو، مدل‌سازی زی‌توده و ذخیره کربن روی‌زمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای حاکی از آن است که ترکیب داده‌های طیفی با راداری نتوانسته بهبودی در برآورد آن‌ها داشته باشد و بر اساس نتایج، داده‌های طیفی بهترین برآورد را نشان داده است. در هر دو حالت، الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان با تابع پایه شعاعی برازش مناسب‌تری داشته‌است. در هنگام استفاده تنها از داده‌های ماهواره‌ای برای زی‌توده و ذخیره کربن، درصد ارزیابی به‌ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۹۸ و مقادیر مساوی درصد جذر میانگین مربعات خطا برابر با ۲۴/۶۸ حاصل شد. نتایج به‌دست آمده نسبت به مطالعات سارکر و نیکول (۲۵) به‌خاطر بهره‌گیری از ترکیب رادارست با باندهای طیفی AVNIR-2 و روش مدل‌سازی و تبدیلات موجک بر روی تصاویر و سیواسانکار و همکاران (۲۷) به‌علت استفاده از بازپراکنش باند L با حساسیت بیشتر در برآورد زی‌توده، ضعیف‌تر نشان داده است. در تحقیق پاندیت و همکاران (۲۲) به‌خاطر آماربرداری از تمامی درختان با قطر بیش از پنج سانتی‌متر در قطعات نمونه ۵۰۰ متر مربعی و نیز محاسبه زی-توده با استفاده از روابط آلومتریک منطقه‌ای، برآورد زی‌توده نسبت به پژوهش حاضر از وضعیت بهتری برخوردار است. برآورد زی‌توده در این مطالعه نسبت به تحقیق مورین و همکاران (۱۹) تا حدودی دارای وضعیت بهتری است؛ که

References

- 1- Agata, H. A., D. Lewandowska, K. Ziolkowski, M. Sterenczak, C. Lisanczuk, Schullius, and C. Pathe. 2018. Forest Aboveground Biomass Estimation Using a Combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 9026-9029. Valencia, Spain.
- 2- Aronoff, S. 2005. Remote Sensing for GIS Managers. ESRI Press, Redlands, CA. 524pp.
- 3- Chang, J., and M. Shoshany. 2016. Mediterranean Shrublands Biomass Estimation Using Sentinel-1 and Sentinel-2. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. DOI:10.1109/IGARSS.2016.7730380.
- 4- Chen, L., R. Chunying, Z. Bai, W. Zongming, and X. Yanbiao. 2018. Estimation of Forest Above-Ground Biomass by Geographically Weighted Regression and Machine Learning with Sentinel Imagery. Forest, 9: 582-602.
- 5- Clark, D.A. S. Brown, D.W. Kicklighter, J.Q. Chambers, J.R. Tomlison, and J. Ni. 2001.

- Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecological Applications*, 11:356-370.
- 6- Egbers, R. 2016. Sentinel-2 data processing and identifying glacial features in Sentinel-2 imagery. Bachelor Thesis. TU Delft University of Technology in Netherlands, 53p.
 - 7- Enayati A.A. 2013. Wood Physics. 3086.2. University of Tehran Press. 340pp. (In Persian).
 - 8- Ghasemi, N., M.R. Sahebi, and A. Mohammadzadeh. 2013. Biomass estimation of a temperate deciduous forest using wavelet analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(2): 765-776.
 - 9- Henry, M., A. Besnard, W.A. Asante, J. Eshun, S. Adu-Bredu, R. Valentini, M. Bernoux and L. Saint-Andre, 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa, *Forest Ecology and Management*, 260: 1375–1388.
 - 10- Ketterings, Q.M., R. Coe, M.V. Noordwijk, Y. Ambagau, and C.A.Palm. 2000. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equation for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management Journal*, 146(2001): 199-209.
 - 11- Khorrami R. Darvishsefat A. A. and M. Namiranian. 2008. Investigation on the Capability of Landsat7 ETM+ data for Standing Volume Estimation of Beech Stands (Case Study: Sangdeh Forests). *Journal of the Iranian Natural Resources*. 60(40): 1289-1281 pp. (In Persian).
 - 12- Laurin, G.V., J. Balling, P. Corona, W. Mattioli, N. Puletti, M. Rizzo, J. Truckenbrodt, and M. Urban. 2018. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(1): 016008-1-016008-18.
 - 13- Lazecky, M., F.C. Comut, Y. Qin, and D. Perissin. 2017. Sentinel-1 Interferometry System in the High- Performance Computing Environment. In *The Rise of Big Spatial Data*, Springer International Publishing, 131-139.
 - 14- Le Toan, T., S. Quegan, M. W. J. Davidson, H. Balzter, P. Paillou, K. Papathanassiou, S. Plummer, F. Rocca, S. Saatchi, H. Shugart, and L. Ulander. 2011. The biomass mission: mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115: 2850-2860.
 - 15- Li, M. 2010. Estimation and analysis of forest biomass in northeast forest region using remote sensing technology. Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data. Northoest Forestry University.
 - 16- Lu, D., Q. Chen, G. Wang, L. Liu, G. Li, and E. Moran. 2014. A survey of remote sensing based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1): 1-43.
 - 17- Machar, I., J. Simon, K. Rejsek, V. Pechanec, J. Brus, and H. Kilianova. 2016. Assessment of forest management in protected areas based on multidisciplinary research. *Forests*, 7: 285, 16p. doi:10.3390/f7110285.
 - 18- Montes, N., T. Gauquelin, W. Badri, V. Bertaudiere, and El.H. Zaoui. 2000. A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threatened woodlands, *Forest Ecology and Management Journal*, 130: 37-46.
 - 19- Morin, D., M. Planells, D. Guton, L. Villard, S. Mermoz, A. Bouvet, H. Thevenon, J.F. Dejoux, T.L. Toan, and G. Dedieu. 2019. Estimation and Mapping of Forest Structure Parameters from Open Access Satellite Images: Development of a Generic Method with a Study Case on Coniferous Plantation. *Remote Sensing*, 11: 1-25.
 - 20- Noorian N. Shataee Sh. Mohammadi J. 2019. Evaluation of RapidEye satellite data for estimation some quantitative structure variables in the Caspian forests of Gorgan region. *RS & GIS for Natural Resources*. 9(4): 1-16. (In Persian).
 - 21- Nuthammachot, N., A. Askar, D. Stratoulas, and P. Wcaksono. 2020. Combined use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improving above-ground biomass estimation. *Geocarto International*. Published online. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1726507>.
 - 22- Pandit, S., T. Satoshi, and D. Timothy. 2018. Estimating Above-Ground Biomass in Sub-Tropical Buffer Zone Community Forests, Nepal, Using Sentinel 2 Data. *Remote Sensing*, 10(4):1-18.
 - 23- Revision of Sangdeh forestry plan, series three (Sarband chamber). 2010. *Forests, Rangelands and Watershed Management Organization, Wood Frame Company*. 321 pp. (In Persian).
 - 24- Safari A. Sohrabi H. 2021. Using the bootstrap approach for comparing statistical modeling methods to estimate remotely-sensed aboveground biomass in Zagros forests. *RS & GIS for Natural Resources*. 11(2): 49-67. (In Persian).
 - 25- Sarker, L.F. and J. Nichol. 2013. Forest Biomass Estimation from the Fusion of C-band SAR and Optical Data Using Wavelet Transform. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV*. 8887: 1-9.
 - 26- Singh, V., A. Tewari, S.P.S. Kushwaha, and V.K. Dadhwal. 2011. Formulating allometric equations for estimating biomass and carbon stock in small diameter trees. *Forest Ecology and Management*, 261: 1945–1949.

- 27- Sivasankar, T., J. M. Lone, K.K. Sarma, A. Qadir, and P.L.N. Raju. 2018. The potential of multi-frequency multipolarized ALOS-2/PALSAR-2 and Sentinel-1 SAR data for aboveground forest biomass estimation. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(3): 797-802.
- 28- Vafaei S., Soosani, J., Adeli, K., H. Fadaei, and H. Naghavi. 2017. Estimation of aboveground biomass using optical and radar (Case study: Nav-e Asalem forests, Gilan) images. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 25 (2): 320-331. (In Persian).
- 29- Vahedi A. A. 2014. Optimal allometric biomass equations for Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) boles within the Hyrcanian forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 22(2):225-236. Doi: 10.22092/ijfpr.2014.10668 . (In Persian).
- 30- Vicharnakorn, P., R. P. Shrestha, M. Nagai, A. P. Salam, and S. Kiratiprayoon. 2014. Carbon stock assessment using remote sensing and forest inventory data in Savannakhet, Lao PDR. *Remote Sensing*, 6:5452–5479.
- Zimble, D.A., D.L. Evans, G.C. Carlson, R.C. Parker, S.C. Grado, and P.D. Gerard. 2003. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR, *Remote Sensing of Environment Journal*, 87: 171-182.



Modeling of Biomass and Aboveground Carbon stock using Sentinel -1, 2 satellite Imagery Relationships (Case Study: Sari of District 3 of Sangdeh Forests)

Seyed Mohammad Mahdi Rezaei Sangdehi¹, Asghar Fallah², Homan Latifi³, Nastaran Nazariani^{4*}

Received: 2022-01-21 / Accepted: 2022-04-20 / Published: 2023-05-22

Abstract

In the study, the goal is; to find suitable statistical models for estimating ground carbon storage by combining spectral and radar data from Sentinel- 1, 2 satellites in a part of the Sari Sangdeh series of forests. In this regard, 150 circular plots were selected and executed in a random-regular method with an area of 10 ares (0.1ha). Species of species type, the total height of trees, and diameter equal to the chest of trees with more than 7.5 cm were recorded in each sample plot. Then the density of all species in the sample plots was determined in the laboratory.

After that, the amount of biomass at the level of sample parts was calculated based on the FAO global model and the amount of carbon storage on the ground by applying a coefficient. Necessary pre-processing and processing were applied on radar and spectral images. Then the numerical values corresponding to the ground plots were extracted from the spectral bands and considered independent variables. Modeling was performed by nonparametric methods of Random Forest, Support Vector Machine, and K-Nearest Neighbor. The results showed that the average ground biomass was 469.07 tons per hectare and carbon storage was 234.53 tons per hectare. Also, the highest correlation was obtained between the main and artificial bands with the two characteristics related to the near-infrared band. The results of modeling validation showed the combination of optical and radar data of Sentinel-1, 2 satellites with biomass and carbon storage of the ground surface; the Random Forest method compared to other non-parametric methods with average squared error percentage and sloping percentage for biomass characteristics (32.79 tons per hectare and -2.24 percent) and carbon storage (30.79 tons per hectare, 0.01) respectively, has had a better performance in modeling. In general, the results of validation showed that the use of Random Forest

Seyed Mohammad Mahdi Rezaei Sangdehi¹, Asghar Fallah², Homan Latifi³, Nastaran Nazariani⁴ (✉)

1. Ph.D.of Forestry, Department of Forestry, Faculty of Forestry, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

2. Professor, Department of Forestry, Faculty of Forestry, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

3. Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, University of K. N. Toosi University of Technology, Iran

4. Postdoctoral Researcher of Forestry, Department of Forestry, Faculty of Forestry, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

DOI: 10.30495/girs.2023.690665

e-mail: nazariani69@yahoo.com

methods and images of Sentinel-1, 2 satellites did not perform well in estimating biomass characteristics and carbon storage.

Key words: Bias, Biomass, Remote Sensing, Support Vector Machines: SVM, Vegetation Indices.

Please cite this article as: Mahdi Rezaei Sangdehi S., M., Fallah A., Latifi H., Nazariani N. Modeling of Biomass and Aboveground Carbon stock using Sentinel -1, 2 satellite Imagery Relationships (Case Study: Sari of District 3 of Sangdeh Forests). Journal of RS and GIS for Natural Resources, 14(3): 81-98.