

قابلیت داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در برآورد زی توده روی زمینی توده‌های ممرز (*Carpinus betulus* L.) در جنگل خیرود

فردین مرادی^۱، علی اصغر درویش صفت^{۲*}، منوچهر نمیرانیان^۳ و قاسم رنود^۴

۱- کارشناس ارشد جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- نویسنده مسئول، استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: adarvish@ut.ac.ir

۳- استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- دانشجوی دکتری جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۸

چکیده

در پژوهش پیش‌رو به بررسی قابلیت داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ به منظور برآورد زی توده روی زمینی توده‌های به نسبت خالص ممرز در بخشی از جنگل‌های هیرکانی پرداخته شد. برای مدل‌سازی و اعتبارسنجی نتایج، ۵۵ قطعه نمونه به طور انتخابی تعیین شد و مقدار واقعی زی توده روی زمینی در آن‌ها اندازه‌گیری شد. در هر قطعه نمونه، قطر برابر سینه تمام درختان قطورتر از ۷/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از جدول حجم محلی و چگالی بحرانی، زی توده روی زمینی این درختان محاسبه شد. پیش‌پردازش‌ها و پردازش‌های لازم بر روی داده‌های ماهواره‌ای انجام شد. مدل‌سازی به روش‌های پارامتریک رگرسیون گام به گام، رگرسیون پس‌رو و روش‌های ناپارامتریک شبکه عصبی مصنوعی، k نزدیک‌ترین همسایه و جنگل تصادفی انجام شد. بررسی ضریب همبستگی پیرسون بین زی توده روی زمینی در قطعه نمونه‌ها و ارزش‌های طیفی متناظر آن‌ها در باندهای اصلی و محاسباتی نشان داد که باند مادون قرمز نزدیک، بیشترین مقدار همبستگی را با زی توده روی زمینی داشت (۰/۵۲-). از میان روش‌های پارامتریک، رگرسیون پس‌رو با ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۲۹۵ و درصد مجذور میانگین مربع خطا ۲۸/۶۳ درصد و از میان روش‌های ناپارامتریک، شبکه عصبی مصنوعی با کمترین درصد مجذور میانگین مربع خطا (۲۳/۴۵ درصد) مناسب‌ترین عملکرد را برای برآورد زی توده روی زمینی داشتند. نتایج این پژوهش را می‌توان ضعیف دانست. از این رو، داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ را فقط می‌توان در سطوح وسیع و به صورت کوچک مقیاس برای برآورد زی توده روی زمینی توده‌های ممرز به کار برد. البته، برای کسب اطمینان از این نتیجه‌گیری کلی و تعمیم آن به جنگل‌های هیرکانی لازم است که مطالعات تکمیلی انجام شود.

واژه‌های کلیدی: تصویر ماهواره‌ای، جنگل تصادفی، جنگل‌های هیرکانی، شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌سازی، k نزدیک‌ترین همسایه.

مقدمه

جنگل‌ها نقش بسیار مهمی در ذخیره کربن به صورت زی توده در مقیاس جهانی دارند، به طوری که ۸۰ درصد زی توده روی زمینی و ۴۰ درصد زی توده زیرزمین را در

بوم‌سازگان خشکی تشکیل می‌دهند (Kim Phat *et al.*, 2004). آگاهی از مقدار زی توده و کربن آن برای مدیریت جنگل و برنامه‌ریزی‌های توسعه ملی ضروری است (Nalaka *et al.*, 2013). کسب این آگاهی از طریق

استان گلستان بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که رگرسیون درختی نسبت به رگرسیون چندمتغیره عملکرد بهتری داشت. مقدار $RMSE$ برای مشخصه‌های فوق به ترتیب ۸۸/۷ متر مکعب در هکتار، ۱۵۷ اصله در هکتار و ۱/۱۵ گزارش شد. Noorian و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER و الگوریتم CART به برآورد مشخصه‌های حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد در هکتار در جنگل شصت‌کلاته پرداختند. ضریب تعیین تعدیل‌شده برای مشخصه‌های مذکور به ترتیب ۰/۷۶، ۰/۷۳ و ۰/۸ و $RMSE$ به ترتیب ۴۰/۲۲، ۳۸/۶۷ و ۵۸/۶۸ درصد گزارش شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که این داده‌ها قابلیت متوسطی برای برآورد مشخصه‌های فوق داشتند. Rajab Pourrahmati و همکاران (۲۰۱۵) نیز قابلیت داده‌های لیزری فضایی ICESat GLAS را به منظور برآورد ارتفاع اشکوب تاج جنگل‌های هیرکانی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که بهترین مدل با مقدار معیار آکائیک (۲۰۴/۵۵)، دارای ضریب تعیین تعدیل‌شده ۰/۸۲ و $RMSE$ برابر با ۶/۱۶ متر بود. در همین راستا، Ronoud و همکاران (۲۰۱۸)، قابلیت سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ را برای برآورد زی‌توده چوبی توده‌های خالص راش در جنگل آموزشی- پژوهشی خیرود ارزیابی کردند. در این پژوهش، بیشترین همبستگی زی‌توده روی زمینی با مؤلفه اول حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی روی باندهای یک تا هفت به دست آمد ($r = ۰/۳۷۷$). مدل یک‌متغیره خطی شامل این مؤلفه دارای مقدار ضریب تعیین ۰/۱۲۲ و $RMSE$ برابر با ۱۴/۳ درصد بود. این پژوهشگران بیان کردند که می‌توان در سطوح به نسبت وسیع مانند حوضه آبخیز، خطای برآورد را قابل قبول دانست. Ronoud و Darvishsefat (۲۰۱۸) نیز زی‌توده روی زمینی را با استفاده از تصاویر سنجنده TM ماهواره لندست ۵ برآورد و نشان دادند که بیشترین مقدار همبستگی زی‌توده روی زمینی با باند مادون قرمز نزدیک ($r = ۰/۴۲۷$) در سطح اطمینان ۹۹ درصد بود و $RMSE$ در این مطالعه ۱۵/۴ درصد گزارش شد. Poorazimy و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از داده‌های ماهواره راداری Alos-Palsar، زی‌توده روی زمینی

آماربرداری زمینی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. در مقابل داده‌های ماهواره‌ای به علت امکان پردازش و تجزیه و تحلیل سریع، قابلیت یکپارچگی با سامانه اطلاعات جغرافیایی، مستمر بودن و تکرار آن‌ها، می‌تواند امکان مناسبی را برای جمع‌آوری اطلاعات در مورد جنگل‌ها فراهم کنند. نتایج به دست آمده از پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که داده‌های ماهواره‌ای به صورت یک منبع منفرد برای جمع‌آوری داده‌ها مطلوب نیستند و باید از داده‌های میدانی و غیرطیفی مانند برداشت قطعه‌نمونه نیز برای مدل‌سازی در چنین مطالعاتی استفاده شود (Holmgren et al., 2000).

پژوهش‌های زیادی در داخل و خارج کشور به منظور بررسی قابلیت داده‌های سنجنده از دوری در برآورد حجم و زی‌توده انجام شده است. Yadav و Nandy (۲۰۱۵) از داده‌های LISS-III برای برآورد زی‌توده روی زمینی جنگل‌های تیملی کشور هند با به کارگیری روش آماری k -Nearest Neighbor (k -NN) با تابع فاصله‌سنجی ماهالونوبیس به نتیجه قابل قبولی ($RMSE$ ۴۲/۲۵ مگاگرم در هکتار) رسیدند. در ایران نیز Khorrami و همکاران (۲۰۰۸) قابلیت داده‌های سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ را به منظور برآورد حجم سرپای توده‌های خالص راش را در دامنه‌های شمالی منطقه سنگده بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها حاکی از آن بود که حجم سرپای بیشترین همبستگی را با باند مادون قرمز و باند مادون قرمز نزدیک ادغام شده با باند پانکروماتیک داشت که به ترتیب ۰/۷ و ۰/۷۲- بود. دیگر نتایج نشان داد که می‌توان از این داده‌ها برای برآورد حجم سرپای استفاده کرد. در پژوهش انجام شد توسط Lu (۲۰۰۵) با استفاده از داده‌های لندست ۵، زی‌توده روی زمینی در بخشی از جنگل‌های آمازون برآورد شد. یافته‌های پژوهش مذکور نشان داد که تصاویر سنجنده TM برای برآورد زی‌توده در جنگل‌های پیشگام از نظر توالی نسبت به جنگل‌های بالغ مناسب‌تر بود. همچنین، Mohammadi و همکاران (۲۰۱۱) توانایی و قابلیت داده‌های سنجنده ETM+ ماهواره لندست را به منظور برآورد مشخصه‌های حجم سرپا، تراکم و تنوع زیستی درختان در جنگل‌های لوه

به‌کاررفته بود. Shataee و همکاران (۲۰۱۲) با روش‌های مختلف یادگیری ماشین شامل k -NN، SVR و جنگل تصادفی به برآورد مشخصه‌های جنگلی از جمله حجم سرپا پرداختند. این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره ASTER انجام شد. یافته‌ها حاکی از آن بود که سه الگوریتم به‌کار گرفته‌شده عملکرد مشابهی داشتند. هرچند SVR و جنگل تصادفی نسبت به k -NN با مقادیر $RMSE$ به ترتیب ۲۵/۸۶، ۲۶/۸۶ و ۲۸/۵۴ متر مکعب در هکتار نتایج بهتری داشتند.

نتایج مطالعات فوق که بعضی از آن‌ها حتی در جنگل‌های هیرکانی انجام شده‌اند، از نظر مثبت یا منفی بودن همبستگی داده‌های طیفی با پارامترهای حجم و زی‌توده، درصد خطای مدل‌ها و به‌دنبال آن، قابلیت داده‌های سنجش از دوری هم‌سو نبوده‌اند که می‌تواند ناشی از عوامل گوناگونی مانند نحوه پیاده‌سازی و اندازه نامناسب قطعه‌نمونه‌های زمینی، ناکافی بودن تعداد قطعه‌نمونه‌ها، فاصله زمانی میان کار میدانی و تاریخ، نوع و تفکیک مکانی تصاویر و شرایط رویشگاهی مختلف باشد. بنابراین و با توجه به اهمیت چندجانبه جنگل‌های هیرکانی ضرورت دارد که تحقیقات اصولی و منسجم در این زمینه ادامه یابد تا آشکار شود که آیا می‌توان با استفاده از تصویر ماهواره‌ای، زی‌توده روی زمینی توده‌های به‌نسبت خالص و سپس توده‌های آمیخته را برآورد کرد؟ به‌همین منظور در پژوهش پیش‌رو، قابلیت داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ به‌منظور برآورد زی‌توده روی زمینی توده‌های به‌نسبت خالص مرمر در بخشی از جنگل‌های هیرکانی بررسی شد. انتخاب توده‌های خالص به‌این دلیل بود که از نقش و تداخل طیفی دیگر گونه‌ها کاسته شود.

مواد و روش‌ها

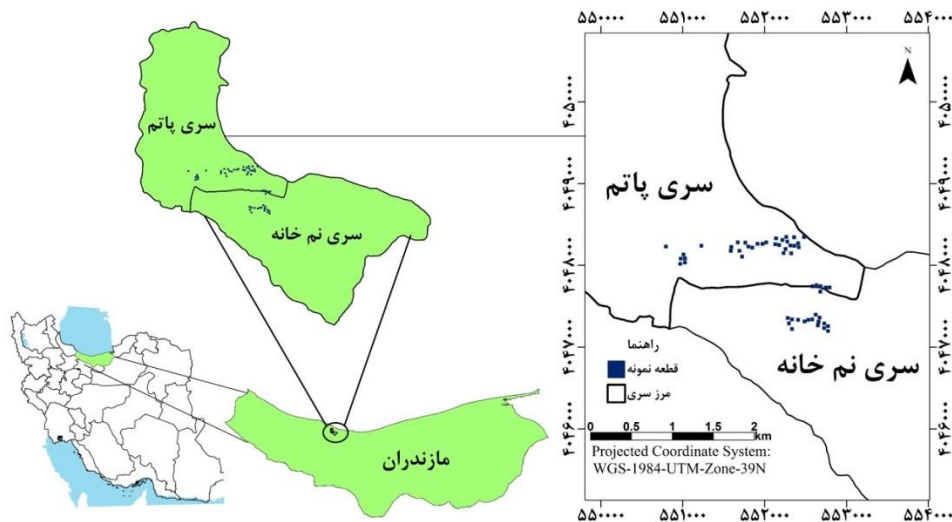
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از جنگل آموزشی - پژوهشی خیرود واقع در هفت کیلومتری شهرستان نوشهر در استان مازندران بود. پژوهش در قسمت‌هایی از دو بخش پاتم و

را در جنگل‌های شصت‌کلاته گرگان با روش‌های آماری پارامتریک و ناپارامتریک بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که الگوریتم k -NN نسبت به الگوریتم‌های دیگر عملکرد بهتری داشت. مقادیر $RMSE$ و ضریب تعیین تعدیل‌شده این مطالعه به ترتیب ۵۷/۱۸۹ درصد و ۰/۰۳۲ بود که نشان‌دهنده قابلیت ضعیف این داده‌ها برای برآورد زی‌توده روی زمینی در منطقه بود. Vafaei و همکاران (۲۰۱۷) از داده‌های راداری ماهواره Alos2 و تصاویر نوری ماهواره Sentinel-2 برای برآورد زی‌توده روی زمینی جنگل‌های ناو اسالم استفاده کردند. بر اساس این پژوهش، نتایج بهترین شبکه عصبی نشان داد که ترکیب داده‌های نوری و راداری با مقدار R^2 و $RMSE$ به ترتیب ۰/۸۶ و ۱۵/۳۴ درصد می‌تواند زی‌توده روی زمینی را برآورد کند. بررسی قابلیت هر کدام از این داده‌ها به‌طور جداگانه نشان داد که داده‌های راداری با مقدار R^2 و $RMSE$ به ترتیب ۰/۵۷ و ۲۳/۵۸ درصد و داده‌های نوری با مقادیر R^2 و $RMSE$ به ترتیب ۰/۷۲ و ۱۹/۱۷ درصد، زی‌توده روی زمین را برآورد کردند که حاکی از برتری تصاویر نوری نسبت به داده‌های راداری در پژوهش مذکور بود. Azizi و همکاران (۲۰۱۰) امکان برآورد حجم سرپای جنگل را با داده‌های سنجنده LISS_IV ماهواره IRS_P6 در جنگل‌های لیره‌سر تنکابن بررسی کردند. میانگین ارزش پیکسل‌های باند قرمز در محل قطعه‌نمونه‌ها، متغیر تأثیرگذار در برآورد حجم سرپا گزارش شد. مدل ارائه‌شده در این پژوهش دارای ضریب همبستگی ۰/۸۳، $RMSE$ برابر با ۳۲/۵ درصد و مقدار اریبی ۱۲/۶ درصد بود. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که داده‌های طیفی این سنجنده، قابلیت متوسطی برای برآورد حجم سرپای جنگل داشتند. در پژوهش انجام‌شده توسط Kalbi و همکاران (۲۰۱۴)، مشخصه‌هایی از جمله حجم در جنگل‌های دارابکلای ساری با داده‌های سنجنده SPOT5-HRG برآورد شد. نتایج نشان داد که برای برآورد حجم سرپا، ترکیب خطی باندهای NIR و SWIR با ضریب تعیین تعدیل‌شده ۷۴/۵ درصد و $RMSE$ برابر با ۷۷/۱ متر مکعب در هکتار دارای نتایج بهتری نسبت به ترکیبات دیگر

(Fageto-Carpinetum)، راش - مرزستان (Carpinetum) و راشستان با کوله‌خاس (Rusco-Fagetum) بودند (Anonymous, 1995). در بخش نم‌خانه نیز جامعه‌های بلوط - مرزستان (Querceto-Carpinetum)، راش - مرزستان (Fageto-Carpinetum)، راشستان مخلوط (Fagetum Mix) و راشستان (Fagetum-Hyrcanum) مشاهده می‌شوند (Anonymous, 2013).

نم‌خانه که در آن توده‌های به نسبت خالص وجود داشت، انجام شد. مساحت منطقه دربرگیرنده قطعه‌نمونه‌های زمینی ۱۵۰ هکتار بود. شکل ۱ موقعیت این منطقه و چگونگی پراکنش قطعه‌های نمونه را نشان می‌دهد. جامعه‌های جنگلی موجود در بخش پاتم (از پایین دست به بالا) شامل نمدار - شمشادستان (Tilio-Parrotio)، انجیلی - مرزستان (Buxetum)



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران، استان مازندران و پراکنش قطعه‌نمونه‌ها در منطقه

نقشه‌برداری تهیه شد و برای بررسی وضعیت هندسی تصاویر به کار برده شد.

بررسی کیفیت و پردازش تصاویر

با قرار دادن لایه وکتوری جاده‌ها از نقشه توپوگرافی بر روی تصویر، کیفیت داده‌های ماهواره‌ای از نظر هندسی و کیفیت رادیومتری نیز از نظر وجود ابر، خطوط اسکن و پیکسل‌های دوبله از طریق بزرگ‌نمایی تصویر بر روی صفحه نمایش رایانه بررسی شد. به منظور فراهم کردن زمینه استفاده از باند Pan با اندازه پیکسل ۱۵ متر، اندازه پیکسل دیگر باندها نیز با تابع Resample به ۱۵ متر تبدیل شد. متناسب با هدف پژوهش، پردازش‌هایی مانند تبدیل DN به

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های ۱۲ بیتی سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ به شماره گذر ۱۶۴ و ردیف ۳۵ مربوط به تاریخ ۲۲ ژوئن ۲۰۱۶ میلادی (۱۱ خرداد ۱۳۹۵) که از وب‌سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) دریافت شده بود، استفاده شد. با توجه به هدف پژوهش، فقط از باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز طول موج کوتاه (با اندازه سلول ۳۰ متر) و باند پانکروماتیک (با اندازه سلول ۱۵ متر)، برای استخراج ارزش‌های طیفی متناظر با قطعه‌نمونه‌های زمینی و تجزیه و تحلیل آماری استفاده شد. همچنین، نقشه‌های توپوگرافی رقومی جدید با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ از سازمان

و WD چگالی بحرانی متوسط چوب به تن در متر مکعب است. چگالی بحرانی چوب ممرز برابر با ۰/۶۸ است (Enayati, 2011).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور بررسی همبستگی بین زی توده روی زمینی و ارزش‌های طیفی متناظر از تحلیل همبستگی پیرسون استفاده شد. مدل‌سازی به دو روش پارامتریک و ناپارامتریک (شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و K نزدیک‌ترین همسایه) انجام شد. در روش پارامتریک، رگرسیون یک‌متغیره با مدل‌های مختلفی شامل خطی، لگاریتمی، معکوس، درجه دوم، درجه سوم، توانی، نمایی و رگرسیون چندمتغیره خطی به روش گام‌به‌گام و پس‌رو اجرا شد. آزمون شاپیرو-ویلک برای بررسی نرمال بودن متغیرها استفاده شد. شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از سه لایه مخفی که به ترتیب ۲۵، ۱۵ و ۱۰ نورون داشتند، پیاده شد. به منظور رتبه‌بندی و تعیین نقش ورودی‌ها بر خروجی شبکه از تحلیل حساسیت استفاده شد. برای مدل‌سازی، داده‌ها به سه قسمت آموزش، تست و اعتبارسنجی تقسیم شدند که نسبت هر کدام به ترتیب برابر با ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد بود. مقدار k بهینه در روش k نزدیک‌ترین همسایه با توجه به نتایج پژوهش‌های مشابه در این زمینه (McRobert, 2008; Shataee et al., 2012) یک تا ۵۰ در نظر گرفته شد و نتایج به دست آمده از مقادیر مختلف آن بررسی شد. در روش جنگل تصادفی با تفسیر نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون تعداد درخت بهینه و همچنین از جذر کل تعداد متغیرها ± 3 ، برای تعیین تعداد برآوردکننده‌های بهینه در هر گره استفاده شد. بر اساس آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$) (رابطه ۲) و درصد مجذور میانگین مربعات خطا ($\%RMSE$) (رابطه ۳)، بهترین مدل‌ها انتخاب شدند. لازم به ذکر است که در روش رگرسیون، علاوه بر $RMSE$ از دو معیار ضریب تعیین تعدیل‌شده (R^2_{adj}) و خطای معیار برآورد (SEE) نیز برای انتخاب بهترین مدل استفاده شد. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی، حدود ۳۰ درصد

رفلکتانس، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تسلدکپ، نسبت‌گیری (NDVI) و ادغام به دو روش PCA و تبدیل فضای رنگ، بر روی تصاویر انجام شد و باندهای محاسباتی حاصله به همراه باندهای اصلی در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شدند. با قرار دادن نقشه رستری قطعه‌نمونه‌ها بر روی تصاویر، میانگین ارزش‌ها در پنجره‌ای به ابعاد 3×3 پیکسل (45×45 متر و برابر با اندازه قطعه‌نمونه‌ها) در محل قطعه‌نمونه‌ها استخراج شد.

تهیه اطلاعات زمینی

در مجموع ۵۵ قطعه‌نمونه مربعی شکل با ابعاد 45×45 متر و در شرایط توپوگرافی به نسبت مشابه در منطقه مورد مطالعه برداشت شد. با توجه به هدف پژوهش، قطعه‌نمونه‌ها باید در توده‌های به نسبت خالص ممرز و در شرایط توپوگرافی (شیب و جهت) مشابه انتخاب می‌شدند. از آنجاکه این چنین توده‌هایی در جنگل مورد مطالعه در وسعت زیاد حضور نداشتند، بنابراین امکان تعیین قطعه‌نمونه‌ها به صورت تصادفی - منظم وجود نداشت. از این رو، ابتدا این توده‌ها با جنگل‌گردشی تعیین شده و سپس قطعه‌نمونه‌ها در آن‌ها پیاده شدند. در تمام قطعه‌نمونه‌ها، گونه و قطر برابر سینه کلیه درختان و درختچه‌های قطورتر از $7/5$ سانتی‌متر اندازه‌گیری و ثبت شد. حجم سریای درختان با استفاده از جدول تاريف محلی برآورد شد. پس از اینکه مقدار حجم چوب سریا در قطعه‌نمونه‌ها محاسبه شد، با استفاده از معادله تبدیل حجم به زی توده روی زمینی که توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO) ارائه شده است (رابطه ۱؛ Brown, 1997)، زی توده روی زمینی در هر قطعه‌نمونه (AGB) به تن در هکتار برآورد شد.

$$\text{AGB (ton/ha)} = \text{volume} \times \text{WD} \quad (\text{رابطه } 1)$$

که در آن: volume حجم چوب به متر مکعب در هکتار

نتایج

نتایج برداشت‌های زمینی نشان داد که کمترین و بیشترین مقدار زی توده روی زمینی به ترتیب برابر با ۹۲/۵۸ و ۳۱۴/۶۸ تن در هکتار و نیز میانگین زی توده و مقدار انحراف معیار آن به ترتیب برابر با ۲۰۶/۳۶ و ۵۶/۷۶ تن در هکتار بودند. همچنین، بررسی آماره‌های توصیفی داده‌های زی توده روی زمینی نشان داد که واریانس (۳۲۲۲/۲) و دامنه تغییرات (۲۲۲/۱۵) بین داده‌ها به نسبت زیاد بود. نتیجه آزمون شاپیرو-ویلک نشان دهنده نرمال بودن داده‌های مستقل و وابسته مورد استفاده در این پژوهش بود ($p < 0.05$) (جدول ۱)، بنابراین نیازی به نرمال‌سازی داده‌ها نبود. جدول ۱ آماره‌های تشریح‌کننده ارزش‌های طیفی متناظر استخراج‌شده از باندهای اصلی و محاسباتی در محل قطعه‌نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

داده‌ها (۱۵ قطعه‌نمونه) به صورت تصادفی انتخاب شد و به‌عنوان مجموعه داده‌های اعتبارسنجی از کلیه تجزیه و تحلیل‌ها کنار گذاشته شدند. با در اختیار داشتن مقادیر برآوردی و مقادیر واقعی زی توده روی زمینی، با استفاده از آماره $RMSE\%$ ، اعتبار مدل‌های رگرسیونی انتخاب‌شده ارزیابی شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (AGBi - \overline{AGB})^2}{n}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\%RMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (AGBi - \overline{AGB})^2}{n}}}{\overline{AGB}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن‌ها: $AGBi$ ، AGB و \overline{AGB} به ترتیب زی توده روی زمینی برآوردشده، مشاهده‌شده و متوسط نمونه‌های مشاهده‌شده و n تعداد مشاهدات است.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی ارزش‌های طیفی متناظر استخراج‌شده از باندهای اصلی و محاسباتی (DN) در محل قطعه‌های نمونه

معنی‌داری	متغیر	کمینه	بیشینه	دامنه تغییرات	میانگین	واریانس	انحراف معیار (آزمون نرمال بودن)	۰/۱۶۶
B1 (باند یک)	۱۰۶۵۵/۲۲	۱۰۷۹۱/۸۹	۱۳۶/۶۶	۱۰۷۱۶/۰۵	۶۹۸/۳۶	۲۶/۴۳	۰/۱۶۶	
B2 (باند دو)	۹۷۱۳/۱۱	۹۸۳۸/۶۷	۱۲۵/۵۵	۹۷۶۹/۸۳	۷۱۵/۳۴	۲۶/۷۵	۰/۲۲۷	
B3 (باند سه)	۹۰۴۹/۱۱	۹۲۳۶/۷۷	۱۸۷/۶۶	۹۱۴۵/۵۷	۲۳۱۹/۴۸	۴۸/۱۶	۰/۳۳۱	
B4 (باند چهار)	۷۷۸۶/۶۶	۷۹۵۲/۳۳	۱۶۵/۶۶	۷۸۵۸/۲۹	۱۱۶۰/۵۱	۳۴/۰۶	۰/۱۱	
B5 (باند پنج)	۲۰۴۹۹/۲۲	۲۳۳۴۶/۸۹	۲۸۴۷/۶۶	۲۱۸۸۸/۲	۳۷۵۳۰۲/۶	۶۱۲/۶۲	۰/۶۹	
B6 (باند شش)	۱۲۸۷۳/۲۲	۱۳۷۷۰/۳۳	۸۹۷/۱۱	۱۳۴۲۲/۷۸	۳۵۳۶۳/۸۶	۱۸۸/۰۵	۰/۴۱۳	
B7 (باند هفت)	۸۴۸۸/۸۸	۸۸۳۷/۱۱	۳۴۸/۲۲	۸۶۷۴/۰۱	۵۷۴۶/۵۵	۷۵/۸۱	۰/۹۷۷	
B8 (باند هشت)	۸۴۹۶/۵۵	۸۷۱۳/۲۲	۲۱۶/۶۶	۸۵۸۳/۹۵	۲۰۲۰/۵۹	۴۴/۹۵	۰/۱۷۸	
VI (شاخص گیاهی ساده)	۲/۶۱	۲/۹۷	۰/۳۵	۲/۷۸	۰/۰۰۵	۰/۰۷	۰/۸۴۵	

معنی‌داری	انحراف معیار	واریانس	میانگین	دامنه تغییرات	بیشینه	کمینه	متغیر
(آزمون نرمال بودن)							
۰/۹۴۲	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۴۷	۰/۰۵	۰/۴۹	۰/۴۴	NDVI (شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده)
۰/۹۲۱	۶۲۷/۶۳	۳۹۳۹۲۱/۳	۲۷۱۲۳/۵۳	۲۹۳۷/۶۳	۲۸۵۵۹/۲۸	۲۵۶۲۱/۶۴	PCA1-7 (مؤلفه اول حاصل از پردازش PCA باندهای یک تا هفت)
۰/۲۴۴	۶۰/۱۵	۳۶۱۷/۶۸	۱۷۹۸۱/۳۲	۲۶۹/۹۱	۱۸۱۰۵/۷۱	۱۷۸۳۵/۸	PCA1-4 (مؤلفه اول حاصل از پردازش PCA باندهای یک تا چهار)
۰/۸۷۲	۶۲۷/۸۲	۳۹۴۱۵۹/۶	۲۵۱۱۵/۲۴	۲۹۳۲/۵۸	۲۶۵۵۵/۰۵	۲۳۶۲۲/۴۷	PCA5-6 (مؤلفه اول حاصل از پردازش PCA باندهای پنج و شش)
۰/۴۴	۱۹۶/۹۹	۳۸۸۰۶/۰۸	۱۵۸۳۳/۴۲	۹۳۱/۲۸	۱۶۱۸۸/۴۹	۱۵۲۵۷/۱۹	PCA6-7 (مؤلفه اول حاصل از پردازش PCA باندهای شش و هفت)
۰/۱۸۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۶۷	۰/۰۱۴	۰/۰۷	۰/۰۵	Greenness (مؤلفه سبزی‌نگی تبدیل تسلدکپ)
۰/۲۱	۲۷۶/۴۱	۷۶۴۰۵/۳۵	۱۰۳۷۱/۱۹	۱۳۲۹/۸۱	۱۱۱۶۵/۲۲	۹۸۳۵/۴۱	FusB1 (مؤلفه حاصل از ادغام باندهای یک و PAN به روش PCA)
۰/۰۶۳	۱۲/۶	۱۵۸/۸۹	۷۵۵۴/۱۶	۶۵/۸۹	۷۵۹۶/۱	۷۵۳۰/۲۱	FusB2 (مؤلفه حاصل از ادغام باندهای دو و PAN به روش PCA)
۰/۳۷۷	۲۹/۹۵	۸۹۷/۰۸	۷۷۱۸/۲۱	۱۵۷/۶۲	۷۸۱۳/۴۷	۷۶۵۵/۸۵	FusB3 (مؤلفه حاصل از ادغام باندهای سه و PAN به روش PCA)
۰/۲۴۸	۲۱۸/۱	۴۷۵۶۷/۷۸	۹۵۳۷/۸	۱۱۲۷/۶۱	۱۰۱۳۳/۱۸	۹۰۰۵/۵۶	FusB4 (مؤلفه حاصل از ادغام باند چهار و PAN به روش PCA)
۰/۰۶۹	۱۷۳/۴۶	۳۰۰۹۰/۸۸	۹۱۳۱/۷	۸۴۸/۷۶	۹۶۰۴/۱۴	۸۷۵۵/۳۸	FusB5 (مؤلفه حاصل از ادغام باندهای پنج و PAN به روش PCA)

معنی‌داری	انحراف معیار (آزمون نرمال بودن)	واریانس	میانگین	دامنه تغییرات	بیشینه	کمینه	متغیر
							باندهای پنج و PAN به‌روش (PCA)
							FusB6 (مؤلفه حاصل از ادغام باندهای شش و PAN به‌روش (PCA)
۰/۵۷۵	۲۱۵/۲۵	۴۶۳۳۳/۸۹	۸۹۷۷/۹۴	۹۱۲/۳۵	۹۴۴۵/۲۲	۸۵۳۲/۸۷	
							FusB7 (مؤلفه حاصل از ادغام باندهای هفت و PAN به‌روش (PCA)
۰/۱۸۸	۱۳۸/۵۵	۱۹۱۹۷/۰۴	۸۳۶۰/۹۳	۶۰۸/۵۱	۸۷۱۲/۲۶	۸۱۰۳/۷۵	
							FusCS457-1 (مؤلفه حاصل از ادغام باندهای چهار، پنج و هفت با باند PAN به‌روش (CS)
۰/۲۰۱	۱۴۶/۸۳	۲۱۵۶۰/۲۴	۸۹۵۵/۷۹	۷۰۷/۶۶	۹۳۸۷/۷	۸۶۸۰/۰۴	
							FusCS457-2 (مؤلفه حاصل از ادغام باندهای چهار، پنج و هفت با باند PAN به‌روش (CS)
۰/۴۸۸	۱۷۰/۵۳	۲۹۰۸۰/۲۱	۹۴۶۶/۱۱	۸۶۴/۷۴	۹۸۷۱/۰۱	۹۰۰۶/۲۷	
							FusCS457-3 (مؤلفه حاصل از ادغام باندهای چهار، پنج و هفت با باند PAN به‌روش (CS)
۰/۴۳	۲۰۲/۵۹	۴۱۰۴۲/۲	۹۴۸۹/۲۹	۱۱۳۶/۶۷	۹۹۵۲/۱۸	۸۸۱۵/۵۱	
							AGB (زی‌توده روی زمینی)
۰/۲۶۳	۵۶/۷۶	۳۲۲۲/۱۹	۲۰۶/۳۶	۲۲۲/۱۵	۳۱۴/۶۸	۹۲/۵۸	

استفاده از مدل‌های رگرسیونی یک‌متغیره خطی و غیرخطی بررسی شد (جدول ۳). بهترین مدل مربوط به مدل خطی باند مادون قرمز نزدیک (B5) با ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۲۵۱ بود. در میان باندهای محاسباتی نیز مدل خطی به‌دست‌آمده از باند PCA1-7 با ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۲۴۸ بهترین مدل برای برآورد زی‌توده روی زمینی بود.

ضریب همبستگی پیرسون میان باندهای اصلی و محاسباتی با مقدار اندازه‌گیری شده زی‌توده نشان داد که ضریب همبستگی به‌جز در باند FusB7 منفی بود (جدول ۲). باند پنج بیشترین همبستگی را با زی‌توده روی زمینی (۰/۵۲) داشت.

روابط رگرسیونی میان زی‌توده روی زمینی و هر یک از ارزش‌های طیفی متناظر در قطعه‌نمونه‌های زمینی با

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون میان باندهای اصلی و باندهای محاسباتی با مقدار زی توده

متغیر ورودی	ضریب همبستگی	متغیر ورودی	ضریب همبستگی
FusB1	-۰/۱۱۲ ^{ns}	B1	-۰/۲۱۷ ^{ns}
FusB 2	-۰/۱۲۵ ^{ns}	B2	-۰/۲۵۶ ^{ns}
FusB 3	-۰/۰۵۶ ^{ns}	B3	-۰/۲۹۶*
FusB 4	-۰/۱۵۴ ^{ns}	B4	-۰/۳۳۸*
FusB 5	-۰/۴۱۹**	B5	-۰/۵۱**
FusB 6	-۰/۰۵۵ ^{ns}	B6	-۰/۳۵۱**
FusB 7	/۰۷ ^{ns}	B7	-۰/۱۵۶ ^{ns}
FUSCS457-1	-۰/۳۳۳*	B8	-۰/۳۳۱*
FUSCS457-2	-۰/۲۴۸	PCA1-7	-۰/۵۱۷**
FUSCS457-3	-۰/۱۷ ^{ns}	PCA 1-4	-۰/۳۳۶*
VI	-۰/۴۹۳**	PCA 5-6	-۰/۵۱۶**
NDVI	-۰/۴۹۳**	PCA 6-7	-۰/۳۲۹*
Greenness	-۰/۳۰۹*		

**معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد، *معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ^{ns} غیرمعنی‌دار

جدول ۳- بهترین نتایج رگرسیون یک‌متغیره میان زی توده روی زمینی و داده‌های طیفی

متغیر	نوع مدل	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	خطای معیار برآورد	رابطه
B5	خطی	۰/۲۷	۰/۲۵۱	۰/۲۵۸	$AGB = -0.040 \times B5 + 1068.938$
VI	خطی	۰/۲۴۳	۰/۲۲۳	۴۵/۹	$AGB = 1076.372 - 314.872 \times VI$
NDVI	درجه سوم	۰/۲۴۳	۰/۲۰۲	۴۵/۵۱	$AGB = -3422.445 \times NDVI^3 - 22794.949 \times NDVI + 12770.224$
PCA1-7	خطی	۰/۲۶۷	۰/۲۴۸	۴۵/۱۷	$AGB = 1243.582 - 0.038 \times PCA17$
PCA5-6	خطی	۰/۲۶۷	۰/۲۴۷	۴۵/۱۸	$AGB = 105771.84 \times PCA56 - 0.038$

شد. یافته‌ها حاکی از آن بود که رگرسیون پسر و با ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۲۹۵ عملکرد بهتری را نسبت به روش گام‌به‌گام داشت (جدول ۴).

تحلیل رگرسیون‌های گام‌به‌گام و پسر و بین زی توده روی زمینی به‌عنوان متغیر وابسته و ارزش‌های طیفی باندهای اصلی و محاسباتی به‌عنوان متغیرهای مستقل انجام

جدول ۴- مشخصات بهترین مدل‌های رگرسیونی

نوع رگرسیون	رابطه	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	خطای معیار برآورد
گام به گام	$AGB = -0.04 \times B5 + 1068.938$	۲۹/۷۳	۰/۲۷	۰/۲۵۱	۴۵/۰۷
پس رو	$AGB = (0.421 \times PCA1-4) - 1150.771NDVI + 0.031B6 - 0.641B4 - 0.221B3 - 333.634$	۲۸/۶۳	۰/۳۸۵	۰/۲۹۵	۴۳/۷۲

مجذور میانگین مربعات خطا، k بهینه انتخاب شد. در این روش، متغیرها با استفاده از چهار متریک فاصله اقلیدسی، مربع اقلیدسی، منهن و چپی شف به صورت جداگانه وزن دهی شدند (جدول ۵).

برآورد زی توده روی زمینی با استفاده از الگوریتم k -NN سه مشخصه مهم در اجرای الگوریتم k -NN عبارتند از: k بهینه، نوع متریک فاصله و وزن دهی یا عدم وزن دهی به نزدیک ترین همسایه برای تعیین دامنه k . با توجه به مقدار

جدول ۵- مقادیر محاسبه شده درصد میانگین مجذور مربعات خطا برای زی توده با استفاده از الگوریتم k -NN

دامنه k	معیار فاصله	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	مقدار k بهینه
۱-۵۰	اقلیدسی	۲۵/۶۱۳	۲۵
۱-۵۰	مربع اقلیدسی	۲۶/۴۰۸	۳۶
۱-۵۰	منهن	۲۹/۷۳۸	۲۷
۱-۵۰	چپی شف	۲۵/۴۱۷	۲۵

تعداد برآوردکننده‌ها (متغیرهای مستقل) در هر گره در اجرای بهینه مدل مهم هستند. شکل ۳ نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون در برابر تعداد درختان برای زی توده را نشان می‌دهد. در این نمودار، جایی که با افزایش تعداد درختان تغییری در کاهش مقدار میانگین مربعات خطای آموزش و آزمون مشاهده نشود، به عنوان تعداد درخت بهینه انتخاب می‌شود. با بررسی نمودار مذکور مشخص شد که ابتدا مقادیر خطا، روند نزولی داشتند و با افزایش درختان تا ۳۰۰ پایه، مقادیر میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون کاهش یافت. سپس، با افزایش بیشتر درختان، تغییری در مقادیر میانگین مربعات خطا

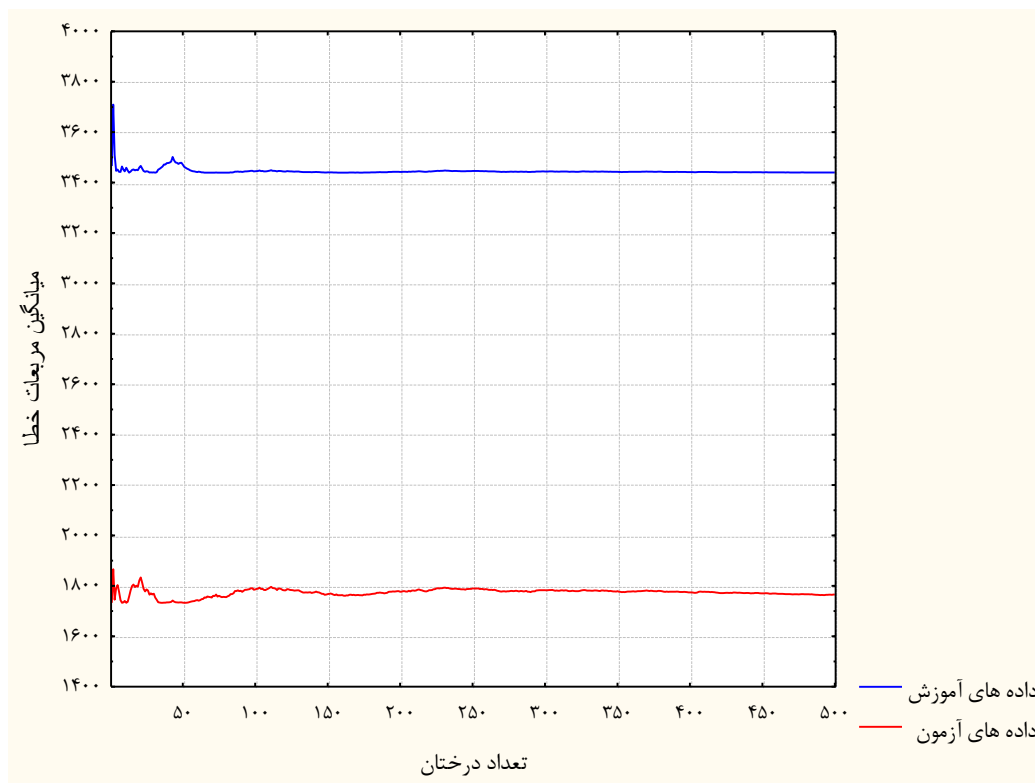
برآورد زی توده روی زمینی با روش شبکه عصبی مصنوعی

بهترین مدل خروجی بر اساس معیار $RMSE\%$ استفاده از سه لایه پنهان به ترتیب با ۱۵، ۱۰ و پنج نورون عصبی مدل سازی شد که دارای $RMSE$ برابر با ۲۳/۴۵ درصد بود. نتایج تحلیل حساسیت داده‌های مستقل نشان داد که باند محاسباتی PCA1-7 و همچنین باند پنج از بین باندهای اصلی، بیشترین تأثیر را بر مدل سازی داشتند.

برآورد زی توده روی زمینی با روش جنگل تصادفی در این الگوریتم، تعیین پارامترهای تعداد درختان بهینه و

گره، از جذر کل متغیرهای مستقل ± 3 استفاده شد. نتایج نشان داد که کمترین درصد مجذور میانگین مربعات خطا با $k = 10$ به دست آمد، بنابراین $k = 10$ به عنوان تعداد برآوردکننده بهینه در برآورد زی توده در نظر گرفته شد.

مشاهده نشد. به همین دلیل، ۳۰۰ درخت به عنوان درخت بهینه در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که باندهای VI، PCA1-7 و PCA5-6 به ترتیب بیشترین تأثیر را بر مدل داشتند. برای تعیین برآوردکننده‌ها (k) در هر



شکل ۳- میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون در برابر تعداد درختان برای زی توده برای انتخاب تعداد درخت بهینه

بحث

همه موارد، این همبستگی منفی بود. ضریب همبستگی منفی بیانگر رابطه معکوس بین ارزش‌های طیفی و زی توده است. به این مفهوم که با افزایش زی توده در قطعه نمونه، بازتاب در طول موج‌های مختلف و باندهای محاسباتی، کاهش می‌یابد. نتیجه به دست آمده با مطالعات Lu (۲۰۰۵)، Mohammadi (۲۰۰۸)، Khorrani و همکاران (۲۰۰۸)، Rostami (۲۰۰۸)، Andargoli و Mohammadi (۲۰۰۸)، Shataee (۲۰۰۹)، Fatholahi (۲۰۱۳)، Azizi و همکاران (۲۰۱۰) و Kalbi و همکاران (۲۰۱۴) همسو است، اما با نتایج Ronoud و همکاران (۲۰۱۸) و Ronoud و Darvishsefat (۲۰۱۸) که طی سال‌های اخیر در همین منطقه با داده‌های لندست و

پژوهش پیش‌رو در ادامه پژوهش‌های پیشین و به منظور بررسی قابلیت داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ برای برآورد زی توده روی زمینی توده‌های به نسبت خالص ممرز در بخشی از جنگل‌های هیرکانی انجام شد. در مجموع، ۲۵ متغیر طیفی شامل باندهای اصلی و باندهای محاسباتی در این پژوهش به کار گرفته شد. متغیرهایی که با زی توده روی زمینی همبستگی بیشتری داشتند، تأثیر بیشتری را نیز در مدل‌های به دست آمده نشان دادند. زی توده روی زمینی بیشترین همبستگی را به ترتیب با باندهای B5، PCA1-7، PCA5-6، FusB5، VI و NDVI داشت و در

مطالعات Bayati و Najaf (۲۰۱۳) که در زمینه دیگری از مدل‌سازی حجم بود نیز برتری نسبی شبکه عصبی مصنوعی را به رگرسیون چندمتغیره نشان داد. از آنجایی که روش‌های ناپارامتریک به‌طور عمده به‌سادگی مدل نهایی (فرمول) را برای پیاده‌سازی آن و تهیه نقشه زی‌توده براساس داده‌های ماهواره‌ای ارائه نمی‌کنند، تهیه این نقشه با مدل‌های به‌دست آمده از روش‌های پارامتریک اجرایی‌تر و آسان‌تر است. همچنین، مقدار خطای رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام ($RMSE$) ۲۹/۷۳ درصد بود که به‌وضوح بیشتر از خطای مدلی بود که در دو پژوهش پیشین (Darvishsefat & Ronoud, 2018; Ronoud *et al.*, 2018) در مورد توده‌های خالص راش گزارش شد (۱۴ درصد). به‌طور مسلم، مقدار خطا در مدل‌سازی توده‌های آمیخته بیشتر خواهد بود.

نتایج پژوهش پیش‌رو را می‌توان ضعیف دانست و در یک نتیجه‌گیری کلی شاید فقط بتوان داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ را در سطوح وسیع و به‌صورت کوچک‌مقیاس به‌منظور برآورد زی‌توده روی زمینی جنگل‌های به‌نسبت خالص ممرز به‌کار برد. با این حال، برای کسب اطمینان از این نتیجه‌گیری کلی و تعمیم آن به جنگل‌های هیرکانی لازم است که مطالعات مشابهی در مورد توده‌های به‌نسبت خالص گونه‌های اصلی انجام شود و در صورت کسب نتایج قابل قبول، پژوهش در توده‌های آمیخته ادامه یابد.

References

- Anonymus, 1995. The First Revision of Forest Management Plan of Patom District, Educational and Research Forest of the University of Tehran (Kheyroud Forest). Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, 500p (In Persian).
- Anonymus, 2013. The Second Revision of Forest Management Plan of the Namekhaneh District, Educational and Research Forest of the University of Tehran (Kheyroud Forest). Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, 800p (In Persian).
- Azizi, Z., Najafi, A., Fatehi, P. and Pirbavaghar, M.,

به‌روشی مشابه در توده‌های راش خالص انجام شده بود، در تضاد است. ضمن اینکه در نتایج بسیاری از منابع به مثبت و یا منفی بودن همبستگی اشاره‌ای نشده است. اگرچه منفی بودن همبستگی میان زی‌توده و ارزش‌های طیفی داده‌های ماهواره‌ای برخلاف انتظار بود، اما می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. با افزایش رشد درختان و حجم توده، تاج درختان بزرگ‌تر، آب برگ‌ها بیشتر و تعداد اشکوب‌های توده نیز افزایش می‌یابد که به‌ترتیب باعث ایجاد سایه بیشتر در تاج، پخش و جذب بیشتر انرژی و درنهایت بازتاب کمتر توده می‌شود. همچنین، زیاد بودن بازتاب در توده‌های کم‌حجم که به‌طور معمول دارای تراکم کمی هم هستند، می‌تواند ناشی از تداخل بازتاب خاک کف توده باشد (Roy & Ravan, 1996). ضمن اینکه کوچکی نسبی سطح برگ ممرز نیز می‌تواند عاملی برای کاهش بازتاب باشد (Fatehi *et al.*, 2015). در هر حال، تعیین صحیح جهت این همبستگی (مثبت/منفی) نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد و توصیه می‌شود که ویژگی‌هایی مانند درصد تاج‌پوشش، چگونگی پوشش گیاهی و خاک توده نیز در قطعه‌نمونه‌های زمینی برای تحلیل‌های بعدی ثبت شود.

بررسی نتایج تحلیل‌های رگرسیونی نشان داد که مدل‌های به‌دست‌آمده از روش‌های ناپارامتریک اختلاف زیادی با هم نداشتند (تفاوت کمتر از هفت درصد) و بهترین آن‌ها از روش شبکه عصبی مصنوعی ($RMSE = 23/45\%$) به‌دست آمد. همچنین، مدل‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم جنگل تصادفی بهتر از k -NN بود. این موارد با نتایج تحقیق Shataee و همکاران (۲۰۱۲) که در آن اختلاف $RMSE\%$ روش‌های مورد استفاده کمتر از دو درصد بود، هم‌سو است. از میان روش‌های پارامتریک انجام‌شده، روش رگرسیون چندمتغیره پس‌رو نسبت به‌روش رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام فقط دارای یک درصد خطای کمتری بود ($RMSE = 28/631\%$). مطالعات Tóth و همکاران (۲۰۰۸) نیز نشان داد که روش شبکه عصبی نسبت به رگرسیون چندگانه عملکرد بهتری داشت، زیرا شبکه عصبی مصنوعی دارای انعطاف‌پذیری و قدرت یادگیری است. نتایج

- International Journal of Remote Sensing, 26(12): 2509-2525.
- McRoberts, R.E., 2008. Using satellite imagery and the k-nearest neighbors technique as a bridge between strategic and management forest inventories. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2212-2221.
 - Mohammadi, J., 2008. Investigating estimation some quantitative characteristics for presentation location models using Landsat ETM+ satellite data. M.Sc. thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, 78p (In Persian).
 - Mohammadi, J. and Shataee, Sh., 2009. Sensitivity evaluation of spectral vegetation indices using sensitivity functions for stand volume estimation. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 16(2): 101-120 (In Persian).
 - Mohammadi, J., Shataee, Sh. and Babanezhad, M., 2011. Estimation of forest stand volume, tree density and biodiversity using Landsat ETM+ Data, comparison of linear and regression tree analyses. *Procedia Environmental Sciences*, 7: 299-304.
 - Nalaka, G.D.A., Sivananthawerl, T. and Iqbal, M.C.M., 2013. Scaling aboveground biomass from small diameter trees. *Tropical Agricultural Research*, 24(2): 150-162.
 - Noorian, N., Shataee, Sh., Mohammadi, J. and Yazdani, S., 2014. Estimating forest structural attributes by means of ASTER imagery and CART algorithm (Case study: Shastkolateh forest, Gorgan). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(3): 434-446.
 - Poorazimy, M., Shataee, Sh., Attarchi, S. and Mohammadi, J., 2017. Estimation of aboveground biomass using Alos-Palsar data in Hyrcanian forests (Case study: ShastKalateh, Gorgan). *Journal of Forest and Wood Products (Iranian Journal of Natural Resources)*, 70(3): 479-488.
 - Rajab Pourrahmati, M., Darvishsefat, A.A., Baghdadi, N., Namiranian, M. and Soofi Mariv, H., 2015. Estimation of forest canopy height in mountainous areas using ICESat-GLAS data. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 23(1): 90-103.
 - Ronoud, Gh. and Darvishsefat, A.A., 2018. Estimating aboveground woody biomass of *Fagus orientalis* stands in Hyrcanian forest of Iran using Landsat 5 satellite data (Case study: Khyroud Forest). *Geographic Space*, 17(60): 117-129.
 - Ronoud, Gh., Darvishsefat, A.A. and Namiranian, M., 2018. Estimation of aboveground woody biomass of *Fagus orientalis* stands in Hyrcanian forest of Iran using OLI data (Case study: Gorazbon and Namkhaneh Districts, Kheyroud Forest). *Journal of Forest stand volume estimation using satellite IRS_P6 (LISS-IV) data (Case study: Lirehsar, Tonekabon)*. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(1): 143-151 (In Persian).
 - Bayati, H. and Najafi, A., 2013. Performance comparison artificial neural networks with regression analysis in trees trunk volume estimation. *Journal of Forest and Wood Products (Iranian Journal of Natural Resources)*, 66(2): 177-191 (In Persian).
 - Brown, S., 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer. FAO Forestry Paper, vol. 134, Rome, 55p.
 - Cole, T.G. and Ewel, J.J., 2006. Allometric equations for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3): 351-360.
 - Enayati, A.A., 2011. Wood Physics. University of Tehran Press, Tehran, 265p (In Persian).
 - Fatehi, P., Damm, A., Schweiger, A.K., Schaeppman, M.E. and Kneubühler, M., 2015. Mapping alpine aboveground biomass from imaging spectrometer data: A comparison of two approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(6): 3123-3139.
 - Fatholahi, M., 2013. Investigation of aboveground carbon stock estimation possibility using SPOT-HRG data (Case study: Forest of Darabkola). M.Sc. thesis, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, 70p (In Persian).
 - Holmgren, J., Joyce, S. and Nilsson, M. and Olsson, H., 2000. Estimating stem volume and basal area in forest compartments by combining satellite image data with field data. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15(1): 103-111.
 - Kalbi, S., Fallah, A. and Shataei Joybari, Sh., 2014. Estimation of forest biophysical properties using SPOT HRG data (Case Study: Darabkola Experimental Forest). *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 20(4): 117-133 (In Persian).
 - Khorrami, R., Darvishsefat, A.A. and Namiranian, M., 2008. Investigation on the capability of landsat7 ETM+ data for standing volume estimation of beech stands (Case study: Sangdeh Forests). *Iranian Journal of Natural Resources*, 60(4): 1281-1289 (In Persian).
 - Kim Phat, N., Knorr, W. and Kim, S., 2004. Appropriate measures for conservation of terrestrial carbon stocks—analysis of trends of forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, 191(1-3): 283-299.
 - Lu, D., 2005. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon.

- Tóth, T., Schaap, M.G. and Molnár, Z., 2008. Utilization of soil-plant interrelations through the use of multiple regression and artificial neural network in order to predict soil properties in Hungarian Solonetzic grasslands. *Cereal Research Communications*, 36(5): 1447-1450.
- Vafaei, S., Soosani, J., Adeli, K., Fadaei, H. and Naghavi, H., 2017. Estimation of aboveground biomass using optical and radar images (Case study: Nav-e Asalem forests, Gilan). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 25(2): 320-331.
- Yadav, B.K.V. and Nandy, S., 2015. Mapping aboveground woody biomass using forest inventory, remote sensing and geostatistical techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187: 308.
- Forest and Wood Products (*Iranian Journal of Natural Resources*), 70(4): 559-568.
- Rostami Andargoli, M., 2008. Forest woody biomass estimation using SPOT 5 satellite data (Case study in seri 4 forest at Astara district). M.Sc. thesis, University of Guilan, Guilan, 94p (In Persian).
- Roy, P.S. and Ravan, S.A., 1996. Biomass estimation using satellite remote sensing data-An investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Biosciences*, 21(4): 535-561.
- Shataee, Sh., Kalbi, S., Fallah, A. and 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.

Investigating the capability of Landsat 8 OLI data for estimation of aboveground woody biomass of common hornbeam (*Carpinus betulus* L.) stands in Khyroud Forest

F. Moradi ¹, A.A. Darvishsefat ^{2*}, M. Namiranian ³ and Gh. Ronoud ⁴

1- M.Sc. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2* - Corresponding author, Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: adarvish@ut.ac.ir

3- Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 18.06.2018

Accepted: 10.10.2018

Abstract

In this research, capability of Landsat 8 OLI was studied for estimation of aboveground biomass in pure stands of the common hornbeam (*Carpinus betulus* L.) in Hyrcanian forests of Iran. In order to obtain in situ aboveground biomass, diameters at breast height (DBH) of all trees greater than 7.5 cm were measured in 55 sample plots. Then, in situ aboveground biomass was calculated using local volume table and specific gravity in each plot. About 70 percentages of in situ measurements (40 sample plots) were used for modeling aboveground biomass based on Landsat 8 OLI data using different methods of stepwise regression, backward regression, artificial neural network, *k*-nearest neighbor and random forest. Validation of the models was done using 30 percentages of in situ measurements (15 sample plots). Based on the Pearson correlation coefficient, near-infrared band showed the highest correlation with aboveground biomass (0.52). Backward regression with adjusted R^2 of 0.295 and $RMSE\%$ of 28.63%, and artificial neural network with $RMSE\%$ of 23.45% showed the best performance among parametric and non-parametric methods, respectively. Based on the results, Landsat 8 OLI data seems suitable for aboveground biomass estimation in pure stands of the common hornbeam only over large areas and small scale. Although more investigations are required to verify and generalize the results to the entire Hyrcanian forests of Iran.

Keywords: Artificial neural network, Hyrcanian forests, *k*-nearest neighbor, modeling, random forest, satellite image.