ارایه مدل عددی برای برآورد وزن تنه درخت صنوبر (*Popolus Deltoids*)، بر پایه رگرسیون خطی چند متغیره

سینا پوررجبعلی‌معافی [۱]، وحید همتی [۲*]، علیرضا اسلامی [۳] ، سید آرمین هاشمی [۴] و سید یوسف ترابیان [۵]

۱) دانشجوی دکترای جنگلداری، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران
۲) استادیار گروه جنگلداری، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران. رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: vahidhemmatiliau@gmail.com
۳) دانشیار گروه باغبانی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران
۴) دانشیار گروه جنگلداری، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران
۵) استادیار گروه جنگلداری، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

چکیده

اندازه‌گیری وزن چوب درختان همواره پس از قطع درختان میسر بوده و با سختی‌ها و مشکلات زیادی همراه می‌باشد. پژوهش جاری با هدف ارایه مدل عددی جهت تخمین وزن تنه درخت پیش از قطع طراحی گردید. در این راستا ٤٠٠ اصله درخت در مناطق جنگل‌کاری‌شده غرب استان گیلان مورد بررسی قرار گرفت. پیش از قطع آنها، ۱۱ متغیر از هر درخت اندازه‌گیری شد که به‌عنوان متغیر مستقل یا ورودی در مدل‌سازی در نظر گرفته شدند. پس از قطع درختان، وزن تنه درختان با اندازه‌گیری مستقیم از طریق ترازو به‌دست آمد. آزمون همبستگی پیرسون نشان داد متغیرهای قطر برابرسینه، قطر در ارتفاع ۳ متر، قطر در ارتفاع ٤ متر، قطر یقه و ارتفاع تنه موثرترین متغیرها برروی وزن تنه درختان می‌باشند. سپس بر اساس این ۵ متغیر، ترکیب‌های ورودی به مدل چیده شد و مدل رگرسیون خطی چندمتغیره مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد مدل ارایه شده قادر است تنها با در دست داشتن دو متغیرِ قطر برابرسینه و ارتفاع تنه، وزن تنه درختان را با ریشه میانگین مربعات خطا = ٦٥/٩٨ کیلوگرم و ضریب تعیین = ۰/۹۱۹ تخمین زند. با توجه به معیارهای NS و همچنین NRMSE که به‌ترتیب برابر با ۰/۹۰۹ و ۰/۰۸۰ گزارش شدند، کیفیت برآوردهای این مدل بسیار عالی ارزیابی گشتند. این دستاورد می‌تواند برای مدیران، برنامه‌ریزان و بهره‌وران صنعت چوب این امکان را فراهم سازد که پیش از قطع درختان با خطایی قابل‌قبول، وزن تنه هر درخت را برآورد نمایند.

واژه‌های کلیدی: تخمین وزن تنه درخت، درخت صنوبر، رگرسیون خطی چندمتغیره، مدل‌سازی عددی.

مقدمه

درختان نقش بسیار مهم و حیاتی را در زندگی بشر ایفا می‌کنند و جز باارزش‌ترین منابع طبیعی هستند. آنها با جذب گازهای سمی از جمله دی‌اکسیدکربن و تولید اکسیژن که یکی از اساسی‌ترین نیازهای حیات انسان‌ها و حیوانات است، باعث دوام حیات انسان و سلامت چرخه طبیعت می‌شوند. امروزه نیاز به چوب درختان موجب شده که در دنیا جنگل‌کاری درختان سریع‌الرشد از اهمیت و جایگاه به‌سزایی برخوردار باشد. درختان سریع‌الرشد و خزان‌کننده همچون صنوبر که اکثرا دارای تنه‌هایی بزرگ، تنومند و منفرد هستند، با توجه به دوره بهره‌برداری کوتاه‌شان می‌توانند گزینه بسیار مناسبی جهت تامین نیازهای چوبی جوامع بشری به‌شمار آیند (Nelson *et al.*, 2019; Guo & Zhang, 2010; Guillemette & Desrochers, 2008; Welham *et al.*, 2007; Malcom, 1970). صنوبرها از جمله درختانی هستند که به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد نظیر امکان کشت در شرایط اقلیمی مختلف، قابلیت کشت در سطوح کوچک، بزرگ، تک درخت، توده‌ای، ردیفی و همچنین کشت به‌عنوان بادشکن، همواره مورد توجه روستاییان و باغداران بومی بوده‌اند (Cleugh., 2004; Woodruff & Zingg, 1952). همچنین به‌دلیل سهولت تکثیر و امکان کشت توام آن با محصولات کشاورزی، قابلیت استفاده برگ‌های آن در تغذیه دام، امکان بهره‌برداری در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت، مورد توجه تولیدکنندگان چوب و صاحبان صنایع مختلف چوبی و سایر بهره‌وران این زمینه بوده‌اند (Szekai, Lefroy, 1991; 1998).به‌طور کلی برای تخمین مقدار چوب درختان روش‌های زیادی معرفی شده‌اند. مدل‌های زیادی همچون نیوتن، اسمالین، پرسلر و هوبر، مدل‌هایی هستند که به‌منظور برآورد حجم تنه درخت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Bayati & Najafi, 2011; Bayati & Najafi, 2013)، اما تمامی باغداران صنوبر و همین‌طور سایر درختان، چوب حاصله از زراعت صنوبر را بر مبنای مولفه وزن آن به فروش می‌رسانند. از این رو وزن درختان مولفه‌ای بسیار مهم‌تر از حجم برای صنوبرکارها به‌شمار می‌آید که بهروران این زمینه می‌توانند از روی آن به میزان درآمد خود نیز پی ببرند. این مولفه برای صنوبرکاران، پیمانکارهای چوب، کارخانه‌دارها، مدیران، برنامه‌ریزان منابع طبیعی و صنعت چوب بسیار حایز اهمیت می‌باشد. اندازه‌گیری وزن چوب درختان برای بهره‌وران این صنعت همواره پس از قطع درختان و اندازه‌گیری مستقیم آن از طریق باسکول امکان‌پذیر می‌باشد. این روش با سختی‌ها و مشکلات زیادی همراه بوده و همچنین قادر نبوده در دوره پیش از قطع درختان اطلاعاتی را در زمینه میزان چوب حاصله از درخت‌کاری در اختیار باغداران و بهره‌وران صنایع چوب قرار دهد. از این‌رو جهت گذر از این محدودیت‌ها، همواره محققین به دنبال روش‌های غیرمستقیم برای اندازه‌گیری وزن چوب تنه درختان بوده‌اند.

در سال‌های اخیر روش‌های یادگیری ماشین، گسترش و عملکردهای بسیار خوبی در تخمین متغیرها در علوم و مهندسی جنگل‌داری داشتند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به شبکه‌های عصبی نظیر پرسپترون چندلایه[1] و تابع شعاعی پایه[2] اشاره کرد. Ghanbari و همکاران (۲۰۰۹) طی مطالعه‌ای در سری یک جنگل آموزشی و پرورشی شصت‌کلاته گرگان با توجه به رابطه بین تعداد در هکتار جنگل و خصوصیات توپوگرافی به بررسی دو شبکه عصبی RBF و MLP پرداختند. نتایج نشان داد هر دو مدل شبکه عصبی دارای عملکرد مطلوب در این زمینه می‌باشند. علاوه بر آن، آنالیز رگرسیون خطی چندمتغیره[3] برای مقایسه نتایج آن با مدل‌های هوش مصنوعی انجام شد که نتایج آن حاکی از برتری شبکه‌های عصبی نسبت به MLR در تخمین تعداد درختان در هکتار بود. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد تکنیک شبکه عصبی می‌تواند ٦٥ درصد تغییرات تعداد در هکتار جنگل را با استفاده از خصوصیات توپوگرافی با دقت تخمین زند. در مطالعه‌ای دیگر Bayati و Najafi (۲۰۱۱ و ۲۰۱۳) از درختان نشانه‌گذاری‌شده جنگل آموزشی- پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس، انتخاب و قطر برابرسینه، قطر در ارتفاع کنده، قطر انتهای تنه، ارتفاع تنه و ارتفاع کل درخت را با دقت بالا مورد اندازه‌گیری قرار دادند، سپس با استفاده از این متغیرها به‌عنوان ورودی دو مدل RBF و MLP، به برآورد حجم تنه درختان پرداختند. نتایج آنان نشان داد مدل RBF نسبت به MLP دارای دقت نسبی بیشتری در برآورد حجم تنه درخت

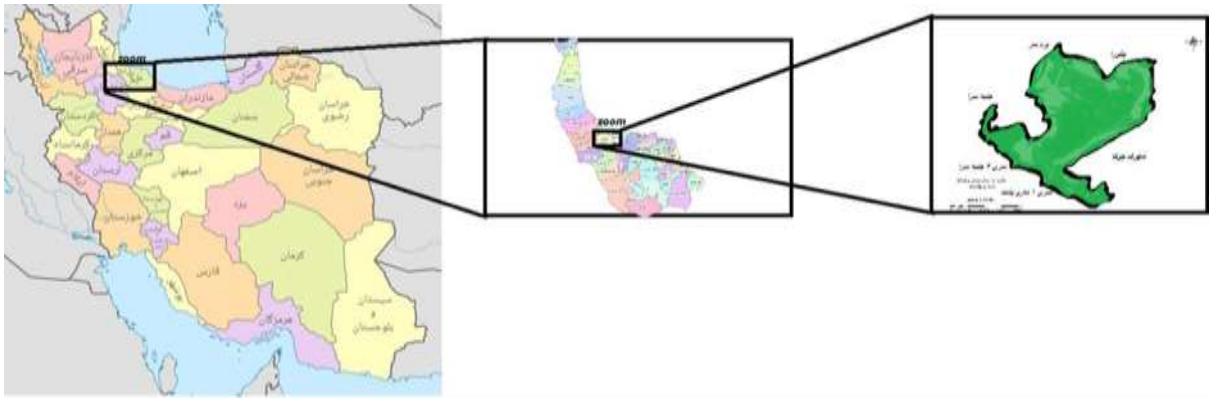
1. Multi Layer Perceptron (MLP)
2. Radial Basis Function (RBF)
3. Multiple Linear Regression (MLR)

می‌باشد. در مطالعه Peyrov و همکاران (۲۰۱٤) به بررسی امکان پیش‌بینی عرض عملیات خاکی جاده‌های جنگلی سوردار–واتاشان پرداختند که مدل‌های MLP و MLR به‌ترتیب در محیط نرم‌افزارهای MATLAB و R ساخته شدند و آزمون‌های همبستگی و تجزیه واریانس نیز در محیط SPSS صورت گرفتند. ارزیابی نتایج مدل‌سازی نشان داد مدل MLP قادر است تخمین‌های موفق‌تری نسبت به MLR ارایه کند. در مطالعه‌ای Gorzin و همکاران (۲۰۱۷)، مدل MLP را برای تخمین حجم‌های صنعتی و هیزمیِ چوب درختان به‌کار گرفتند. نتایج این ارزیابی حاکی از دقت قابل‌قبول مدل MLP در تخمین هر دو نوع حجم بود. Bayat (۲۰۱۷) طی مطالعه‌ای از مدل MLP برای تخمین بقا و مرگ‌ومیر درختان شمال ایران استفاده کرد. تخمین‌های این مدل با مدل MLR مقایسه گردید و نتایج حاکی از برتری شبکه عصبی در تخمین احتمال بقا درختان بود. Mostaffaei و Jahani (۲۰۲۱) طی مطالعه‌ای عملکرد مدل‌های MLP و MLR را در تخمین ضخامت پوست و متغیرهای موثر در جنگل‌داری مورد آزمایش و ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نیز حاکی از برتری دقت مدل MLPنسبت به MLR در تخمین ضخامت پوست درختان بود. بر اساس مطالعات پیشین، تاکنون روشی برای اندازه‌گیری غیرمستقیم مولفه وزن درختان ارایه نشده و مدل‌های مورد آزمایش غالبا در راستای تخمین مولفه‌هایی نظیر حجم تنه درخت، ضخامت پوست درخت، بقا و مرگ‌ومیر درختان بوده‌اند. بنابراین پژوهش جاری برای اولین بار به ارزیابی مدل‌های عددی در برآورد وزن تنه درختان پرداخت. نکته قابل تامل دیگر که از این مطالعات حاصل می‌شود این است که در روش‌های شبکه عصبی در یادگیری ماشین (نظیر MLP و RBF)، مدل به‌صورت جعبه سیاه[1] بوده و در نهایت حالت ریاضیاتیِ مدل قابل استخراج نخواهد بود، در نتیجه استفاده از آن برای سایر محققین دشوار خواهد بود. اما MLR روشی است که مدلِ مستخرج از آن در نهایت به‌صورت ریاضیاتی ارایه می‌گردد که در تحقیق جاری تنها از این مدل بهره گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از سری ۱۹ پیلمبرا درحوزه ۹ شفارود می‌باشد که با جنگل‌های دست‌کاشت جلگه‌ای در شمال شهرستان رضوان‌شهر و در ٤ کیلومتری شرکت شفارود قرار گرفته است. این منطقه زیر نظر اداره منابع طبیعی از حوزه استحفاظی شهرستان رضوان‌شهر و زیر نظارت طرح‌های در محدوده UTMگیسوم و با توجه به سیستم Y=41641225, X=356600, Y=4157928, X=331941 قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان گیلان

سری مورد نظر از شمال به بخش پره‌سر و آبادی جنبه‌سرا، از جنوب به شهرک چوکا، از شرق به ساحل دریا و از غرب به سری ۱۸ جنبه‌سرا محدود شده است. کل مساحت این سری چیزی حدود ۱۵۹٤/٦ هکتار است که از این میزان ۱۲۸۱/۵ هکتار قابل بهره‌برداری، ٦۱/۵ هکتار نقاط خالی جنگلی، ۱۰/۱ هکتار نقاط مزروعی و متصرفات، ٦۵/۹ هکتار نقاط حفاظتی، ۷۱/۵ هکتار مساحت جاده‌های موجود، ۱/۱ هکتار مساحت مسیر برق فشار قوی، ۱۰ هکتار جنگل‌کاری تحقیقاتی، ۱٤/۵

1. Black-Box

هکتار آتش‌بر و ۷۸/۵ هکتار جنگل‌کاری سنواتی که غیرمستتر در مساحت قابل بهره‌برداری بوده است، می‌باشند. میزان بارندگی متوسط سالیانه منطقه ١٤٨٤ میلی‌متر است. سنگ‌های مادری این منطقه ترکیبی از نهشته‌های زمان کواترنری (دوران چهارم) می‌باشند و اغلب‌شان از جنس واریزه‌ها و قلوه‌سنگ-های مادری این ناحیه از نوع ماسه‌ای هستند که به دوره اول مزوزوییک تعلق دارند. لایه فوقانی آن به‌طور کلی از سنگ‌های ماسه‌ای و لایه زیرین آن از لایه‌های متناوب شیست و ماسه تشکیل یافته است. این منطقه دارای خاک قهوه‌ای و قهوه‌ای خاکستری بوده که دارای خاصیت اسیدی است و اقلیم منطقه خزری دارد.

محدوده جنگل‌کاری سنواتی سری ۱۹ پیلمبرا جز قسمت‌های جلگه‌ای جنگل‌های هیرکانی هستند. به‌طور طبیعی در گذشته جامعه اصلی این مناطق بلوطستان بوده و با گونه‌های ممرز، توسکا، انجیلی، سفید پلت و اوجا همراه بودند که به علت تخریب‌هایی که در گذشته انجام گرفته است، در سه دهه گذشته با گونه‌های چون صنوبر، توسکای ییلاقی، توسکای قشلاقی، کاج تدا، افرا و ون مورد بازسازی و و جنگل‌کاری قرار گرفته‌اند.

جمع‌آوری و اندازه‌گیری داده‌ها

پس از انجام جنگل گردشی و تعیین محل قطعه نمونه مورد نظر، تعداد ٤٠٠ اصله صنوبر (*Populus deltoids*) به‌طور تصادفی از جنگلکاری‌های منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. در تحقیقات مذکور در ادبیات پژوهش غالبا از تعداد ٤٠٠ اصله درخت جهت مدل‌سازی استفاده می‌گردد، اما از آنجایی که تعداد نمونه بیشتر همواره منجر به ارایه مدلی معتبرتر می‌گردد، در این تحقیق سعی بر آن شد که تعداد نمونه‌های بیشتری برای این امر در نظر گرفته شود. برای انجام این مطالعه مشخصه‌های مد نظر مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند:

١. اندازه‌گیری قطر برابرسینه (۱/۳۰ سانتی‌متر)، قطر در یک، دو، سه و چهار متر با استفاده از خط‌کش دوبازو (کالیپر) انجام شد.
٢. اندازه‌گیری قطر کنده و قطر یقه توسط نوار قطرسنج انجام شد.
٣. اندازه‌گیری ارتفاع کل، ارتفاع تاج و تنه قبل از عملیات قطع توسط دستگاه بلوم‌لیس انجام شد واندازه‌گیری ارتفاع کنده بعد از عملیات قطع توسط نوار متری صورت گرفت.
٤. اندازه‌گیری وزن تک‌تک درختان بعد از عملیات قطع توسط باسکول محاسبه (شکل ۲) و به‌عنوان متغیر وابسته در تعیین رابطه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

شکل ۲. مراحل اندازه‌گیری وزن تنه درختان قطع شده

در آخر نیز نتایج خلاصه آماری داده‌ها در جدول (۱) نشان داده شد.

جدول ۱. مشخصات آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده از درختان

متغیر (واحد)	اختصار	میانگین	انحراف‌معیار	ضریب‌تغییرات (٪)	کمینه	بیشینه	چولگی
ارتفاع کل (متر)	Htot	۲۳/٤٥	۳/٤۸	۱٤/۸٥	۲/٤۸	۳۲/۹٤	−۰/۸۲
قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	D1.3	۲٦/۷۳	٤/۸۳	۱۸/۰۸	۰/۹۰	٤۷/٦۰	۰/۱۱
قطر در ارتفاع ۱ متری (سانتی‌متر)	D1	۲۷/۱۹	٤/۷۸	۱۷/٥۷	۱٦/۳۰	٤۸/٦۰	۰/٥۳
قطر در ارتفاع ۲ متری (سانتی‌متر)	D2	۲٥/۹۳	٤/٦۸	۱۸/۰٥	۳/٥۰	٤٦/۰۰	۰/۲۰
قطر در ارتفاع ۳ متری (سانتی‌متر)	D3	۲٤/۹۱	٤/٤٦	۱۷/۸٤	۱٥/۲۰	٤٤/٥۰	۰/٤۷
قطر در ارتفاع ٤ متری (سانتی‌متر)	D4	۲۳/۹۱	٤/۳۸	۱۸/۳۳	۱٤/۳۰	٤۳/۱۰	۰/٥۰
قطر یقه (سانتی‌متر)	Dc	۳۳/٤۳	۷/۷٦	۲۳/۲۲	۱۷/۹۰	۷٤/۹۰	۱/۱۷
قطر کنده (سانتی‌متر)	Ds	۳۰/۳۷	٦/۳۹	۲۱/۰٥	۱۷/۰۰	٦٥/٥۰	۱/۰۲
ارتفاع تاج (متر)	Hc	۱۱/۲٦	۱/۹٦	۱۷/٤۳	۳/٦۰	۱٦/۹٤	−۰/٤۱
ارتفاع تنه (متر)	Htr	۱۲/۲۹	۲/٥۸	۲۱/۰۱	۷/۱٤	۲۰/۰۰	۰/٤۷
ارتفاع کنده (سانتی‌متر)	Hs	۹/۲۲	۲/٦۳	۲۸/٤۹	۳/٥۰	۱٦/٥۰	۰/٦۹
وزن (کیلوگرم)	W	٥٥۸/٦۰	۲۰۳/۷۰	۳٦/٤۸	۹۸/۹۰	۱۲٥٦/۰۰	۰/۱۹

رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR)

رگرسیون خطی چندمتغیره، رابطه‌ای خطی است که میان چند سری از متغیرهای مستقل (ورودی)، برای مدل‌سازی یک متغیر وابسته (هدف) ایجاد می‌گردد. اساس این مدل بهینه‌سازی ضرایب رگرسیونی برای هر متغیر ورودی است که این بهینه‌سازی توسط الگوریتم Least Squares انجام می‌گیرد (رابطه ۱):

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n + c \qquad \text{رابطه (۱)}$$

y متغیر هدف، $\boldsymbol{x_i}$ ها متغیرهای ورودی، $\boldsymbol{b_i}$ ها ضرایب رگرسیونی و c ضریب ثابت مدل می‌باشند (Ober, 2013).

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

برای سنجش اعتبار پیش‌بینی ارایه شده توسط مدل‌ها باید خروجی‌های مدل با مقادیر واقعی آنها مقایسه گردد که برای این امر از معیارهای ارزیابی استفاده می‌گردد. معیارهایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند عبارتند از: ریشه میانگین مربعات خطا[1] ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده[2] ضریب تبیین[3] شاخص ویلموت[4] و ضریب نش ساتکلیف[5] که معادلات آنها در ادامه آمده‌اند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - f_i)^2} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \qquad \text{رابطه (۳)}$$

$$\boldsymbol{R^2} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{y_i} - \bar{\boldsymbol{y}})\,(\boldsymbol{f_i} - \bar{\boldsymbol{f}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{y_i} - \bar{\boldsymbol{y}})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{f_i} - \bar{\boldsymbol{f}})^2}}\right]^2 \qquad \text{رابطه (٤)}$$

$$WI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(|f_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \qquad \text{رابطه (٥)}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{f}\right)^2} \qquad \text{رابطه (٦)}$$

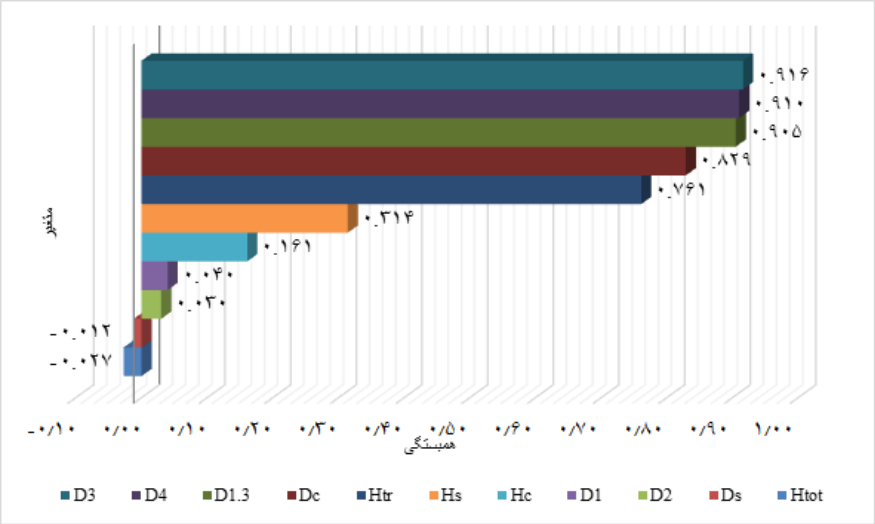
در روابط بالا $\mathbf{y_i}$ و $\bar{\mathbf{y}}$ به‌ترتیب داده‌های مشاهده‌ای و میانگین آنها؛ f_i و $\bar{f}$ داده‌های پیش‌بینی شده و میانگین آنها؛ y_{max} و y_{min} به‌ترتیب بیشینه و کمینه داده‌های مشاهده‌ای و n تعداد داده‌ها می‌باشند.

1. Root Mean Square Error (RMSE)
2. Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)
3. R2
4. Willmott Index (WI)
5. Nash Sutcliff (NS)

مقادیر نزدیک‌تر به صفر برای RMSE و NRMSE و مقادیر نزدیک به یک برای ضرایب NS، WI و R^2، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر برای مدل می‌باشند. همچنین NRMSE دارای ٤ بازه کیفی برای عملکرد مدل‌ها است: الف. ۰/۳ < NRMSE عملکرد مدل ضعیف؛ ب. ۰/۳> NRMSE >۰/۲ عملکرد مدل متوسط؛ ج. ۰/۲> NRMSE >۰/۱ عملکرد مدل خوب؛ و د. ۰/۱ > NRMSE ۰ عملکرد مدل عالی ارزیابی می‌گردد (Aghelpour & Varshavian, 2020).

یافته‌ها

پس از اندازه‌گیری میدانی مولفه های درختان و مرتب سازی داده‌ها، برای انتخاب ترکیب‌های ورودی به مدل‌ها، مولفه‌های درخت از نظر میزان همبستگی شان با وزن درخت مورد ارزیابی قرار گرفتند. این کار با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون[1] در نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. نتایج این ارزیابی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. نتایج آزمون همبستگی بین وزن درخت و سایر متغیرهای اندازه‌گیری‌شده از درخت

ارزیابی‌ها حاکی از آن است که همبستگی متغیرهای Htot، D1، D2 و Ds با وزن تنه درختان بسیار ضعیف و دارای عدم معنی‌داری است، بنابراین منطقی است که از استفاده از آنها به‌عنوان متغیر ورودی در مدل‌سازی اجتناب گردد. سایر متغیرهای درخت شامل D1.3، D3، D4، Dc، Htr، Hc و Hs دارای همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ با وزن تنه درخت می‌باشند. با توجه به شدت متفاوت همبستگیِ متغیرها با وزن تنه درخت، می‌توان دریافت که متغیرهای Hc و Hs علی‌رغم معنی‌داری همبستگی‌شان، شدت همبستگی نسبتا پایینی با وزن تنه درختان دارند، بنابراین استفاده از این متغیرها به‌عنوان ورودی نیز قطعا موجب کاهش دقت مدل‌ها در تخمین وزن تنه درختان خواهد شد. در نتیجه تنها پنج متغیر D1.3، D3، D4، Dc و Htr که بالاترین شدت همبستگی را داشتند به‌عنوان ورودی‌های موثر انتخاب شدند. با در نظر داشتن این متغیرها، ترکیب‌های ورودی به مدل‌ها تنظیم گردیدند (جدول ۲).

1. Pearson correlation test

جدول ۲. سناریوها (ترکیب متغیرها) ورودی به مدل رگرسیون خطی چندمتغیره

سناریوی ورودی	توضیح	نام سناریو	ترکیب متغیرهای ورودی	متغیر هدف
کل متغیرها (SC1)	در این سناریو تمامیِ متغیرهای اثرگذار بر وزن تنه درخت به‌عنوان ترکیب ورودی در برآورد وزن تنه درخت مد نظر قرار خواهند گرفت.	SC1	$D_{1.3}, D_3, D_4, D_c, H_{tr}$	W
سادگی در اندازه‌گیری (SC2)	در این سناریو آن دسته از متغیرهایی که اندازه‌گیری آنها از درختان ساده‌تر است به‌عنوان ترکیب ورودی در برآورد وزن تنه درخت مد نظر قرار خواهند گرفت.	SC2	$D_{1.3}, D_c, H_{tr}$	W
حداقل متغیرهای موثر (SC3)	در این سناریو تنها ترکیب‌های دوتایی از متغیرهای موثر به‌عنوان ورودی در برآورد وزن تنه درخت مد نظر قرار خواهند گرفت.	SC3-1	D_c, H_{tr}	W
		SC3-2	$D_{1.3}, H_{tr}$	W
		SC3-3	D_3, H_{tr}	W
		SC3-4	D_4, H_{tr}	W

در جدول (۲) سه سناریو مد نظر قرار داده شد. در سناریوی اول (SC1) کل متغیرهای ورودی موثر به‌عنوان ورودی مدل اعمال شدند. در سناریوی دوم (SC2) متغیرهایی که در نظر گرفته شدند، اندازه‌گیری میدانی آنها ساده‌تر انجام گرفت. به‌عنوان مثال متغیرهایی نظیر D3 و D4 (که در سناریوی SC2 از آنها صرف‌نظرشده)، برای انده‌گیری نیاز به نردبان داشته و برای پژوهشگر موجب اتلاف وقت می‌گردند. سناریوی سوم (SC3) بر اساس اصل امساک[1] یعنی حداقل تعداد متغیرهای موثر تنظیم شد. در این سناریو تنها دو متغیر به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد تا مدل بتواند بر اساس حداقل متغیرهای موثر، وزن تنه درخت را تخمین بزند. این سناریو شامل ٤ ترکیب دوتایی متفاوت از متغیرهای ورودی موثر است (SC3-1، SC3-2، SC3-3 و SC3-4) که در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

پس از تنظیم سناریوها و ورودی‌های آنها، ابتدا داده‌ها به دو بخش واسنجی و اعتبارسنجی تقسیم گردید که به‌ترتیب شامل ۳۰۰ درخت (۷۵ درصد) و ۱۰۰ درخت (۲۵ درصد) می‌شود. سپس مدل MLR بر روی داده‌ها اجرا گردید که نتایج ارزیابی این مدل در جدول (۳) نشان داده شده است.

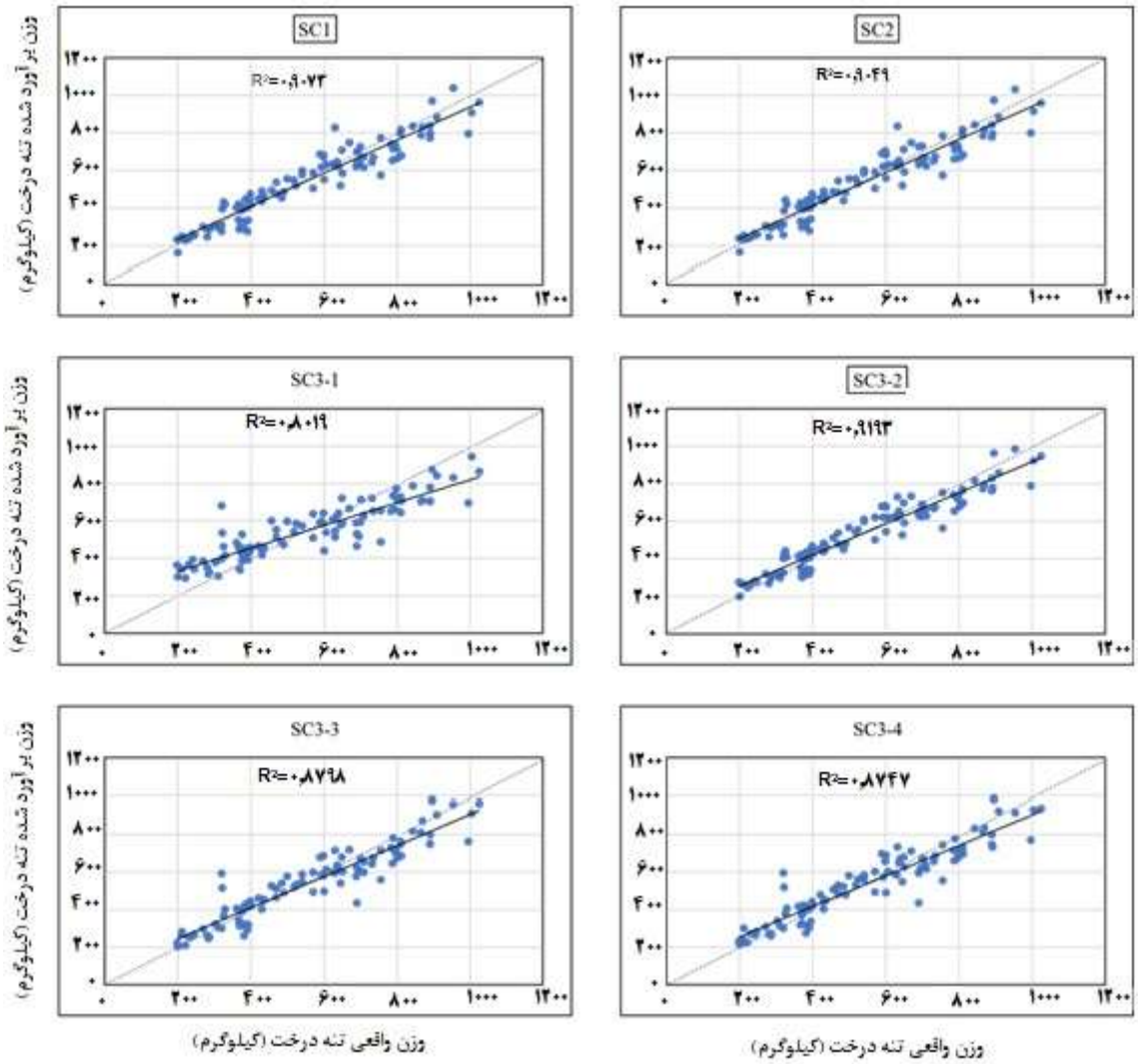
جدول ۳. ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون خطی چندمتغیره

سناریوی ورودی	دوره واسنجی		دوره اعتبارسنجی	
	RMSE(کیلوگرم)	WI	RMSE(کیلوگرم)	WI
SC1	٦٧/٧٣٠	۰/٩٦٨	٦٧/٤٠٧	۰/٩٧٤
SC2	٦٧/٨٩٥	۰/٩٦٨	٦٧/٩٨٣	۰/٩٧٣
SC3-1	٩٧/٦١٢	۰/٩٢٧	١٠٨/٧٠٢	۰/٩١٠
SC3-2	٧١/٢٦٧	۰/٩٦٤	٦٥/٩٨٠	۰/٩٧٣
SC3-3	٧٥/١٥٥	۰/٩٦٠	٧٨/٥٣٦	۰/٩٦٣
SC3-4	٧٧/٤٨٧	۰/٩٥٧	٧٩/٧٧٩	۰/٩٦١

در نگاه اول می‌توان دید که مدل MLR توانسته در تمامی سناریوهای مورد آزمایش دقت نسبتا خوبی در تخمین وزن تنه نشان دهد. چرا که میزان WI در همه سناریوها بالاتر از ۰/۹ گزارش می‌شود (بین ۰/۹۲۷ تا ۰/۹٦۸ در فاز واسنجی و ۰/۹۱۰ تا ۰/۹۷٤ در فاز اعتبارسنجی). میزان RMSE در این ارزیابی خطای مدل در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد که بین ٦٧/٧٣٠ تا ٩٧/٦١٢ کیلوگرم در فاز واسنجی و ٦٥/٩٨٠ تا ١٠٨/٧٠٢ کیلوگرم در فاز اعتبارسنجی متغیر است. از آنجایی که فاز اعتبارسنجی مهمترین قسمت برای شناسایی عملکرد واقعی مدل‌ها می‌باشد، بهترین عملکرد مدل می‌بایستی با استناد

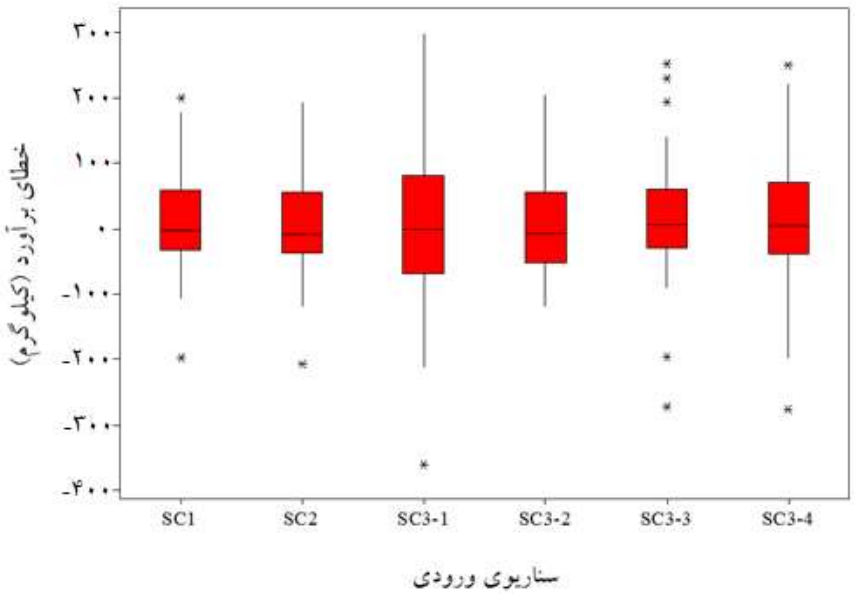
1. Principle of Parsimony

بر این دوره معرفی گردد. بنابراین، سناریوی SC3-2 هم در میان سناریوهای مبتنی بر اصل امساک (جدول (۲)) و هم در مقایسه به دو سناریوی SC1 و SC2 بهترین عملکرد را در تخمین وزن تنه درختان ارایه داده است. برای صحت این موضوع از نمودارهای نقطه‌ای نیز بهره گرفته شد (شکل ٤).



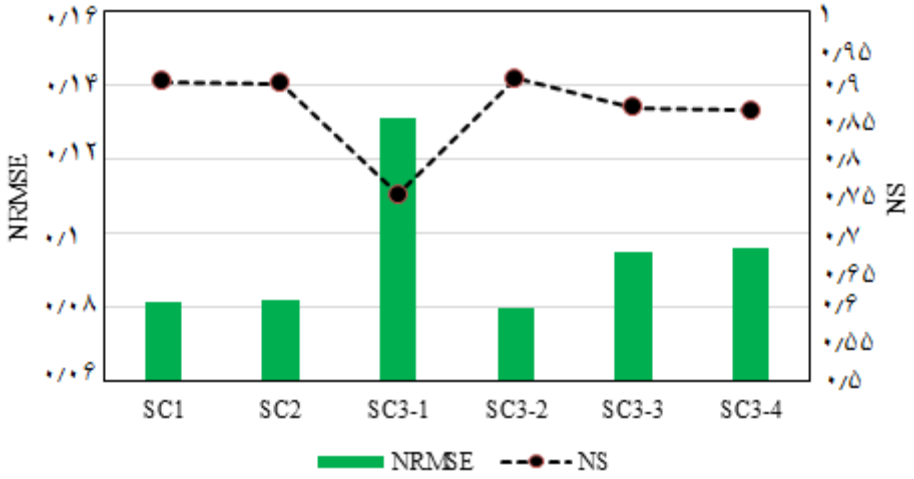
شکل ٤. نمودارهای نقطه‌ای جهت بررسی همبستگی بین تخمین‌های وزن تنه درخت و مقادیر واقعی آن

در شکل (٤) داده‌های مشاهده‌ای وزن تنه هر کدام از درختان در مقابل مقادیر واقعی همان درخت در دوره آزمون رسم شده‌اند. همان گونه که مشخص است نقاط متعلق به سناریوی SC3-1 بیشترین پراکندگی را حول محور خط رگرسیونی خود دارند. همچنین در این سناریو شیب خط رگرسیونی نسبت به خط X=Y (نقطه‌چین سیاه) کمی بیشتر از سایر سناریوها می‌باشد، در نتیجه ضعیف‌ترین عملکرد متعلق به این سناریو می‌باشد. این موضوع توسط R^2 (۰/۸۰۱۹) نیز تایید می‌گردد که کمتر از سایر سناریوها است. شیب بیشترین میزان R^2 متعلق به سناریوی SC3-2 است (۰/۹۱۹۳). قرارگرفتن بخش بالایِ خط رگرسیونی در زیر خط X=Y و همچنین بخش پایینی آن بالای خط X=Y، نشانگر این است که مدل در برآورد وزن‌های بالا تا حدودی کم‌برآورد و در برآورد وزن‌های پایین تا حدودی بیش‌برآورد عمل نموده است. در ادامه توزیع خطای مدل در سناریوهای مختلف توسط نمودار جعبه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۵).



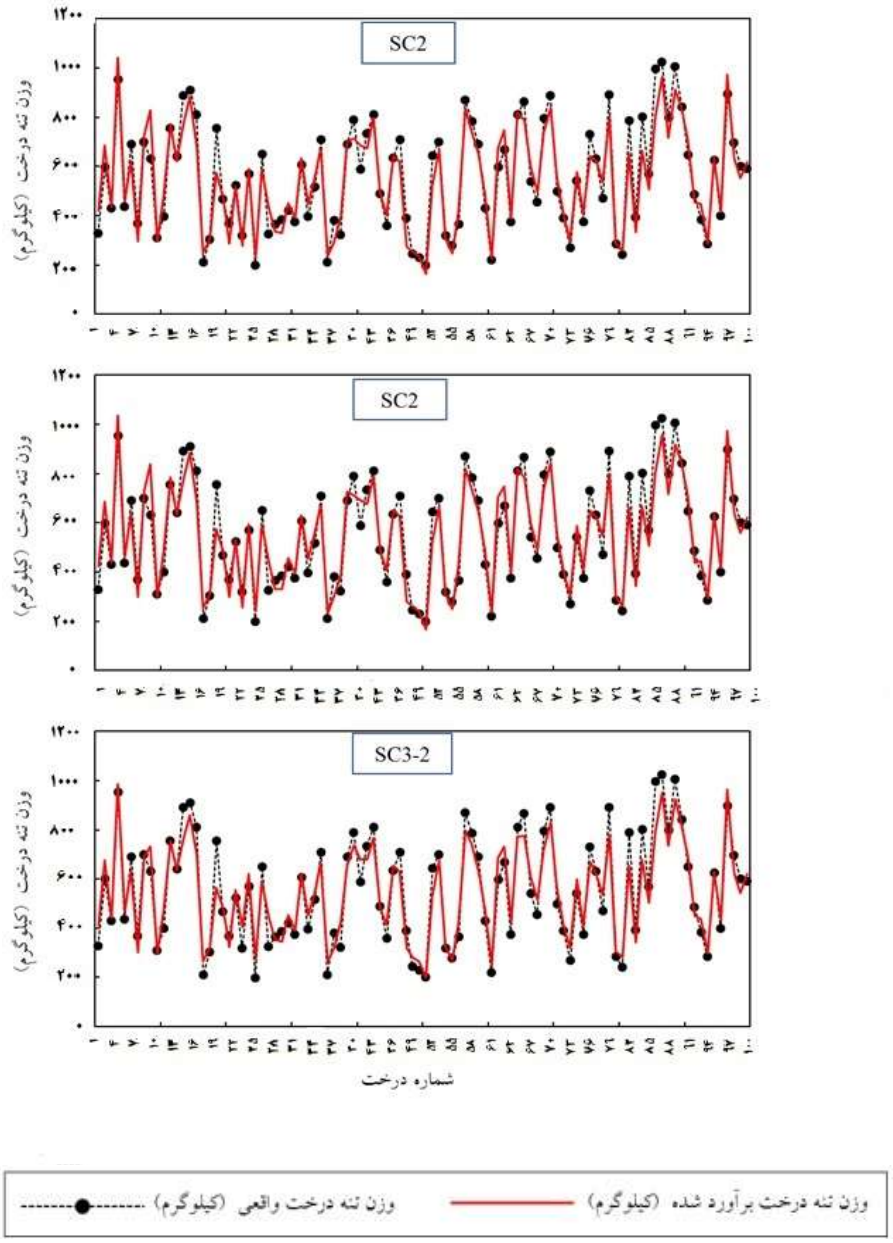
شکل ۵. نمودارهای جعبه‌ای (box-plots) در بررسی توزیع خطای مدل در سناریوهای مختلف

در شکل (۵) ضلع پایینی جعبه نشانگر چارک اول خطاب برآورد وزن تنه، ضلع بالایی نشانگر چارک سوم خطاها و خط بین آنها نشانگر میانه خطاها می‌باشد. با اولین نگاه به شکل (۵) می‌توان دید که خطای مدل در تمام سناریوها حول محور صفر کیلوگرم است. این بدان معنی است که مدل در تمام سناریوها عملکرد بسیار خوبی را از خود نشان داده است. سناریوی SC3-1 گزینه‌ای است که در آن هم داده پرت بیش‌برآوردی مشاهده شده است و همچنین جعبه متعلق به آن کمی کشیده‌تر از سایرین است، بنابراین می‌توان عملکرد آن را نسبت به سایر سناریوها ضعیف‌تر ارزیابی کرد. در سایر سناریوها میانه خطای برآورد نسبتا مشابه بوده (بین ۷- و ۷+ کیلوگرم) و جعبه‌های آنها کشیدگی کمتری نسبت به سناریوی SC3-1 دارند. کمترین کشیدگی جعبه‌ها متعلق به دو سناریوی SC1 و SC2 می‌باشد، اما میانه آنها به چارک اول نزدیک‌تر و از چارک دوم دورتر است (چولگی به راست). این بدان معنی است که بیش‌برآورد و کم‌برآوردی مدل در این سناریوها متوازن نبوده و دارای بیش-برآورد بیشتری است. همچنین در این دو سناریو (SC1 و SC2) داده‌های پرت نیز دیده می‌شود. سناریوی SC3-2 تنها سناریویی است که داده پرت در آن مشاهده نشده و علاوه برآن میانه خطای برآورد تقریبا در وسط چارک‌های اول و سوم قرار دارد. در نتیجه می‌توان این سناریو را از نظر توزیع خطای برآورد وزن تنه درختان نیز مناسب‌تر از سایرین گزارش کرد. در ادامه کیفیت عملکرد مدل در سناریوهای مختلف توسط دو معیار NRMSE و NS بررسی می‌گردد (شکل ٦).



شکل ٦. نمودار ترکیبی (combo-graph) در بررسی کیفیت مدل‌سازی بر پایه دو معیار NRMSE و NS

در شـــکل (٦) مقادیر NS و NRMSE برای هر کدام از سناریوها جداگانه محاسبه شده و هم‌زمان در کنار یکدیگر در یک نمودار به نمایش گذاشته شد. در نگاه اول مشخص است که تمام NSها بزرگ‌تر از ۰/۷۵ است که نشان می‌دهد کیفیت مدل سازی در تمام سناریوها بسیار مطلوب می‌با شد. در این میان ضـعیف‌ترین عملکرد نسـبی متعلق به سـناریوی SC3-1 بوده که کمترین مقدار NS را دارا اســـت (NS =۰/۷۵۳) و با توجه به مقدار NRMSE که برابر با ۰/۱۳۱ اســـت (۰/۲ > NRMSE >۰/۱)، کیفیت عملکرد آن خوب ارزیابی می‌شـــود. از میان ســـایر ســـناریوها، ســـناریوهای SC1، SC2 و SC3-2 کمترین مقادیر NRMSE (NRMSE <۰/۰۸۲) و بیشـــترین مقادیر NS (NS >۰/۹۰۳) را دارا هســـتند. از بین این ســـه سناریو، سناریوی SC3-2 با NS =۰/۹۰۹ و NRMSE ۰/۰۸۰ = بهترین دقت و کمترین خطا را در برآورد وزن تنه درخت از خود نشـــان داد که با توجه به مقدار NRMSE (۰/۱ > NRMSE >۰) کیفیت عملکرد آن بسیار عالی ارزیابی می‌گردد. برای درک بهتر از همپوشانی خروجی‌ها و مشاهدات وزن تنه درختان، خروجی‌های مدل در کنار مقادیر واقعی آنها به‌صورت نمودار خطی نشان داده شده است (شکل ۷).



شکل ۷. نمودار خطی در بررسی همپوشانی تخمین‌های وزن تنه درختان با مقادیر واقعی آنها

در نمودار خطی (شکل ۷) که برای دوره اعتبارسنجی رسم گردیده است، سه سناریوی برتر یعنی SC1، SC2 و SC3-2 مد نظر قرار داده شدند. به خوبی مشخص است که تخمین‌های وزن تنه درختان با مقادیر واقعی آنها همپوشانی بسیار خوبی دارند. معادلات مستخرج از سناریوهای مذکور در ادامه نمایش داده شدند.

$$W = -606.8 + 42.69\,D1.3 + 12.2\,D3 - 8.44\,D4 - 7.50\,Dc + 13.59\,Htr$$ رابطه (۷)

$$W = -601.1 + 46.49\,D1.3 - 7.58\,Dc + 13.51\,Htr$$ رابطه (۸)

$$W = -522.6 + 34.07\,D1.3 + 13.61\,Htr$$ رابطه (۹)

مولفه‌های روابط فوق در جدول (۱) تشریح گردیدند. روابط (۷)، (۸) و (۹) به‌ترتیب برای سناریوهای SC1، SC2 و SC3 برای تخمین وزن تنه درختان صنوبر این منطقه ارایه می‌شوند و محققان با استفاده از این روابط و اندازه‌گیری مولفه‌های ورودی مورد نیاز هر یک از این روابط، وزن تنه (W) را پیش از قطع درخت محاسبه نمایند.

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش جاری مدل‌سازی عددی وزن تنه درختان صنوبر انجام شد. در این راستا ٤٠٠ اصله درخت مورد بررسی قرار گرفتند و ۱۱ متغیر دیگر از هر درخت اندازه‌گیری شد که به‌عنوان ورودی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان داد متغیرهای D1.3، D3 و D4 موثرترین متغیرها بر روی وزن تنه درختان می‌باشند. ارزیابی مدل MLR نشان داد این مدل با به‌کارگیری متغیرهای اندازه‌گیری شده از درخت، قادر است وزن تنه آن را با دقت بسیار بالایی تخمین زند. این دستاورد می‌تواند برای مدیران، برنامه‌ریزان و بهره‌وران صنعت چوب این امکان را فراهم سازد که پیش از قطع درختان با خطایی قابل قبول، وزن تنه هر درخت را برآورد نمایند. بهترین عملکرد این مدل در شرایط استفاده از دو متغیر قطر برابرسینه و ارتفاع تنه درخت بود که نشان می‌دهد تنها با اندازه‌گیری این دو متغیر و استفاده از معادله مستخرج، وزن تنه درخت قابل محاسبه خواهد بود (معادله مذکور رابطه (۹) است که توسط محققین و بهره‌وران در این زمینه قابل آزمایش و استفاده می‌باشد).

به محققین آتی در این زمینه پیشنهاد می‌شود که مدل‌های شبکه عصبی نظیر MLP و RBF نیز به‌صورت ساده و ترکیبی در این راستا مورد آزمایش قرار گیرند. شایان ذکر است که مطالعه جاری در منطقه معتدل و مرطوب گیلان و بر روی درختان صنوبر جنگل‌کاری شده انجام گرفته که در این منطقه دارای نتایج رضایت‌بخش بوده و دارای اعتبار می‌باشد، بنابراین برای سایر مناطق مشابه و متفاوت اقلیمی و همچنین سایر گونه‌های درختان اقتصادی دارای ارزش تحقیقاتی می‌باشد.

منابع

Aghelpour, P. and Varshavian, V. (2020) Evaluation of stochastic and artificial intelligence models in modeling and predicting of river daily flow time series. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 34(1): 33-50.

Bayat, M. (2017) Predicting and assessing the tree species survival and determining physiographic factors affecting on it in Mazandaran province Forests using artificial neural networks. Journal of Natural Environment, 70(4): 771-782.

Bayati, H. and Najafi, A. (2011) Application of artificial intelligence in trees stem volume estimation, Journal of Renewable Natural Resources Research, 2(4): 52-59.

Bayati, H. and Najafi, A. (2013) Performance comparison artificial neural networks with regression analysis in tree's trunk volume estimation. Forest and Wood Products, 66(2): 177-191.

Cleugh, H.A., 2004 Effects of Windbreak on Air Flow, Micro Climate & Crop Yield. USA: Springer Link, Inc.

Ghanbari, F., Shataee, Sh., Dehghani, A.A. and Ayoubi, Sh. (2009) Tree density estimation of forests by terrain analysis and artificial neural network. Journal of Wood & Forest Science and Technology, 16(4): 25-42.

Gorzin, F., Namiranian, M., Omid, M. and Bayat, M. (2017) Prediction commercial and cordwood volume of broadleaves using Artificial Neural Networks, Case study: Gorazbon distric of Kheyrood forest, Nowshahr. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 25(3): 517-527.

Guillemette, T. and DesRochers, A. (2008) Early growth and nutrition of hybrid poplars fertilized at planting in the boreal forest of western Quebec. Forest Ecology and Management, 255(7): 2981-2989.

Guo, X.Y. and Zhang, X.S. (2010) Performance of 14 hybrid poplar clones grown in Beijing, China. Biomass and Bioenergy, 34(6): 906-911.

multiple linear regressions. Forest Sustainable Development, 1(3): 285-296.

Szekai, Z., Fengjue, L., Daoqun, Z., Qingxiao, L., Xinsheng, M. and Zhenlei, Z. (1998) Utilization of poplar leaf as fodder. Agroforestry system in China.

Taylor, K.E. (2001) Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106(D7): 7183-7192.

Welham, C., Van Rees, K., Seely, B. and Kimmins, H. (2007) Projected long-term productivity in Saskatchewan hybrid poplar plantations: Weed competition and fertilizer effects. Canadian Journal of Forest Research, 37(2): 356-370.

Woodruff, N. P., & Zingg, A. W. (1952). Wind-tunnel studies of fundamental problems related to windbreaks (Vol. 112). US Department of Agriculture, Soil Conservation Service.

Lefroy, E. (1991) Trees and shrubs as sources of fodder in Western Australia, The role of trees in sustainable agriculture conference, Albury NSW, September, pp. 19-32.

Mosaffaei, Z. and Jahani, A. (2021) Modeling of ash (*Fraxinus excelsior*) bark thickness in urban forests using artificial neural network (ANN) and regression models. Modeling Earth Systems and Environment, 7(3): 1443-1452.

Nelson, N.D., Meilan, R., Berguson, W.E., McMahon, B.G., Cai, M. and Buchman, D. (2019) Growth performance of hybrid poplar clones on two agricultural sites with and without early irrigation and fertilization. Silvae Genetica, 68(1): 58-66.

Ober, Pieter Bastiaan (2013) Introduction to linear regression analysis.

Peyrov, S., Najafi, A. and Alavi, S.J. (2014) Prediction of forest roadway using artificial neural network and

Presenting a Numerical Model for Estimating the Trunk Weight of Popolus tree (*Popolus Deltoids*), Based on Multiple Linear Regression

Sina Pourrajbali Mofi[1], Vahid Hemmati[2]*, Alireza Eslami[3], Seyed Armin Hashemi[4] and Seyed Youssef Tarabian[5]

1) Ph.D. student of Forestry, Lahijan branch, Islamic Azad University, Lahijan, IRAN.
2) Assistant professor of Forestry, Lahijan branch, Islamic Azad University, Lahijan, IRAN. Corresponding Author Email Address: vahidhemmatiliau@gmail.com
3) Associate professor of Horticultural Sciences, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, IRAN.
4) Associate professor of Forestry, Lahijan branch, Islamic Azad University, Lahijan, IRAN.
5) Assistant professor of Forestry, Lahijan branch, Islamic Azad University, Lahijan, IRAN.

Date of Submission: 2024/06/10 Date of Acceptance: 2024/08/26

Abstract

Measuring the weight of trees is always possible after cutting trees and it is accompanied by many difficulties and problems. The current research is designed with the aim of providing a numerical model to estimate the weight of the tree trunk before cutting. In this regard, 400 trees were examined in the afforested areas in the west of Guilan province. Before cutting them, 11 variables were measured from each tree, which were considered as independent variables or inputs in modeling. After cutting the trees, the weight of the tree trunks was obtained by direct measurement through a scale. Pearson's correlation test showed that the variables of diameter at 1.30 meters height, diameter at 3 meters height, diameter at 4 meters height, collar diameter and trunk height are the most effective variables on tree trunk weight. Then, based on these 5 variables, the input combinations were arranged into the model and the Multiple Linear Regression model was tested and evaluated. The results showed that the presented model is able to estimate the weight of tree trunks with RMSE = 65.98 kg and R^2 = 0.919 by only having two variables of 1.30 diameter and trunk height. According to the NS and NRMSE criteria, which were reported as 0.909 and 0.080, respectively, the quality of the estimations of this model is considered excellent. This achievement can provide the possibility for the managers, planners and users of the wood industry to estimate the trunk weight of each tree with an acceptable error before cutting the trees.

Keywords: Numerical Modeling, Multivariate Linear Regression, *Popolus Deltoids*, Tree Trunk Weight Estimation.