

نشریه علمی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
 جلد ۳۰ شماره ۲، صفحه ۲۱۰-۱۹۳، (۱۴۰۱)
 شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/ijfpr.2022.359402.2060
 شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.17350883.1401.30.2.7.3

بررسی مدل‌های مختلف توزیع قطری صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides* Marsh.) در جنگل‌های دست‌کاشت در ارتباط با فواصل کاشت

طوبی عابدی^۱ و رؤیا عابدی^{۲*}

۱- استادیار، پژوهشکده محیط‌زیست، جهاد دانشگاهی، رشت، ایران

۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی اهر، دانشگاه تبریز، ایران. پست الکترونیک: royaabedi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۷

چکیده

توزیع قطری یکی از مهم‌ترین پارامترهای توصیف ساختار توده است. در پژوهش پیش‌رو، مدل‌های توزیع قطری درختان صنوبر در جنگل‌کاری‌های استان گیلان تحت تأثیر فواصل کاشت مختلف، بررسی شد تا از آن‌ها به‌عنوان ابزاری برای کسب اطلاعات قابل اعتماد در مورد ساختار، رشد و عملکرد جنگل‌های دست‌کاشت و همچنین مدیریت و دخالت‌های پرورشی در این توده‌ها استفاده شود. اندازه‌گیری قطر برابر سینه با آماربرداری صددرصد در توده‌های یک هکتاری در پنج توده خالص دست‌کاشت صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides* Marsh.) با فاصله کاشت‌های ۵ × ۵، ۵ × ۳، ۳ × ۳، ۳ × ۵ و ۳ × ۴ متر انجام شد. آزمون نیکویی برازش کولموگروف - سمیرنوف در هر توده مدل توزیع متفاوتی را نشان داد. در توده با فاصله کاشت ۵ × ۵ متر، توزیع قطری درختان از تابع بتا پیروی می‌کرد. در فاصله کاشت ۵ × ۳ متر، مدل توزیع قطر درختان از نوع لگ نرمال سه‌پارامتری بود. در فاصله کاشت ۳ × ۳ متر نیز توزیع قطری درختان به‌صورت تابع نرمال بود. در توده با فاصله کاشت ۵ × ۳/۵ متر نیز توزیع قطری درختان به‌صورت تابع ویبول برازش شد و در توده با فاصله کاشت ۴ × ۳ متر توزیع قطر درختان به‌صورت تابع نرمال بود. نتایج این پژوهش نشان داد که فاصله کاشت در جنگل‌های دست‌کاشت به‌عنوان عاملی در تغییر مدل‌های توزیع قطری درختان مطرح است و در فاصله کاشت‌های کمتر، توزیع درختان نرمال برازش شد و با افزایش فاصله کاشت توزیع‌های قطری متنوعی در توده‌ها حاصل شد. بنابراین، پژوهش پیش‌رو می‌تواند با معرفی مدل توزیع قطری برای یک توده همگن تک‌کشتی بر حسب فاصله کاشت به‌عنوان پژوهش مرجع باشد تا برای مدیریت توده برای رسیدن به یک توزیع مورد نظر و یا مدیریت توده برای تبدیل از یک توده دست‌کاشت به توده‌ای آمیخته با ترکیب چندین گونه با توزیع مناسب مفید و کاربردی باشد. بنابراین، گذر از یک ساختار تک‌کشتی به سمت ساختار متنوع با استفاده از مدل‌های عملکرد رویش برای شبیه‌سازی این دینامیک توده مورد نیاز است که گام ابتدایی آن در تعیین مدل توزیع قطری درختان به‌عنوان یک پژوهش زمینه‌ای انجام شد.

واژه‌های کلیدی: جنگل دست‌کاشت، جنگل همسال، ساختار قطری، قطر برابر سینه، صنوبر، مدل‌سازی.

مقدمه

حاصل کرد که مدیریت کاربردی جنگل تداوم اکوسیستم جنگل را تضمین می‌کند. چوب یکی از مهم‌ترین محصولات جنگل به‌ویژه در جنگل‌های دست‌کاشت محسوب می‌شود که مقدار آن بر حسب مترمکعب

مدیریت پایدار منابع جنگلی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و ملی مشروط به آگاهی از کمیت و ساختار آن‌ها است. با دانستن این دو ویژگی می‌توان اطمینان

مدل‌های طبقه‌های قطری با اطلاعات مفیدی که از ساختار توده‌ها در اختیار قرار می‌دهند، امکان برنامه‌ریزی در زمینه‌های مختلف را فراهم می‌کنند. همچنین انواع توزیع‌های قطری اطلاعاتی از ساختار توده، ساختار سنی و پارامترهای توده ارائه می‌دهند تا امکان برنامه‌ریزی برای انواع عملیات پرورش جنگل فراهم شود. علاوه بر این، در بسیاری از کشورها قطر درخت عامل مهمی در مدیریت و تعیین نوع ماشین‌آلات و تجهیزات قطع و تبدیل و حمل و نقل چوب محسوب می‌شود (Ige *et al.*, 2013).

مدل‌های قطری توده به ابزاری ضروری به‌منظور ارزیابی و تصمیم‌گیری مدیریتی تبدیل شده‌اند. از آنجا که نمی‌توان انتظار داشت که یک نوع مدل به‌طور کارآمد برای تمام سطوح تصمیم‌گیری در توده ارائه شود، بنابراین انواع مدل‌های متنوع با درجات پیچیدگی مختلف برای انواع جنگل‌ها اعم از طبیعی و دست‌کاشت ارائه شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. از مطالعات بررسی توزیع قطری درختان می‌توان در مدیریت جنگل استفاده شود زیرا مدیران سیستمی را انتخاب خواهند کرد که در پایان هر چرخه مدیریتی به بازآفرینی توزیع قطری مشخص و ساختاری پایه در توده دست یابند (Ige *et al.*, 2013).

تعیین توزیع قطری درختان با استفاده از توابع احتمال برای توصیف ساختار قطری توده جنگل ضروری است و مدلسازی توزیع قطری به‌عنوان بخش اساسی و پرکاربرد در برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری و تحقیق در جنگل شناخته شده است (Duan *et al.*, 2013). انواع مفاهیم توزیع قطری در سال ۱۸۹۸ ایجاد شد، زمانی که De Liocourt مشاهده کرد که رسم نمودار تعداد پایه‌ها در طبقه‌های قطری برابر به‌عنوان هیستوگرام فرکانس منجر به تولید نموداری J شکل معکوس می‌شود. در سال‌های اخیر و در شیوه‌های اندازه‌گیری و بررسی متغیرهای کمی توده‌های جنگلی، چندین نوع از توابع توزیع احتمال برای توصیف ساختار توده جنگلی مورد استفاده بوده است (Ogana *et al.*, 2016).

از آنجا که اندازه‌گیری قطر تعداد زیادی از درختان

اندازه‌گیری می‌شود. مقدار محصولات چوبی در نتیجه ساختار توده، آمیختگی گونه‌ای و بهره‌وری آن است. تعداد درختان در هر طبقه قطری به‌عنوان توزیع قطری مطرح است و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای توصیف ساختار و میزان چوب توده استفاده می‌شود. توزیع قطری درختان یکی از مهم‌ترین جنبه‌هایی است که باید توسط مدیران جنگل در هنگام تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت توده‌های جنگلی در نظر گرفته شود، زیرا طیف گسترده‌ای از اطلاعات از تولید چوب گرفته تا ذخیره کربن و تنوع زیستی جنگل را ارائه می‌دهد. از آنجایی که توزیع قطری یک توده براساس نمونه‌هایی از درختان با تعداد زیاد تعیین می‌شود روش‌های مختلفی برای کاهش نمونه‌برداری لازم و سهولت در تعیین توزیع‌های قطری ایجاد شده است زیرا توزیع قطری به‌طور گسترده‌ای با توابع مختلف مرتبط است (Ciceu *et al.*, 2021).

قطر درختان جنگلی پارامتری اساسی و مهم در تعیین انواع پارامترهای دیگر مانند سطح مقطع و حجم توده محسوب می‌شود و از طرف دیگر به سادگی قابل اندازه‌گیری است که می‌تواند در پیش‌بینی رشد و عملکرد توده استفاده شود (Ige *et al.*, 2013). با توجه به اهمیت قطر برابر سینه به‌عنوان اصلی‌ترین متغیر زیست‌سنجی درختان جنگلی، بررسی توزیع فراوانی و پراکنش این متغیر اهمیت زیادی دارد. پراکنش درختان در طبقه‌های قطری یکی از ویژگی‌های مهم ساختاری در توده‌های جنگلی است و در پژوهش‌هایی با اهداف شبیه‌سازی روند تغییرات درختان جنگلی و تکامل توده، قابل استفاده است. این متغیر در شناخت مدل‌های رویشی جنگل‌ها اعم از طبیعی و دست‌کاشت، خالص یا آمیخته بسیار مهم تلقی می‌شود. زیرا از جمله کاربردهای توزیع آماری قطر را می‌توان بررسی و شناخت وضعیت فعلی و آینده توده‌های جنگلی، توصیف ساختار قطری توده، بررسی واکنش به انواع عملیات پرورشی، ارزیابی رشد، حجم تولید، بلوغ توده و پیش‌بینی آینده توده‌ها در برنامه‌ریزی مدیریت جنگل ذکر کرد (Mighi *et al.*, 2021).

سفید در جنگل ارسباران (Ostad Hashemi *et al.*, 2021)، بلوط ایرانی در ایلام (Mirzaei & Bonyad, 2015) و راش شرقی در استان گیلان (Hassanzad Navroodi & Moradi, 2020؛ Emam Qeysi, 2020) با استفاده از انواع توابع بتا، گاما، ویبول، نرمال، لگ نرمال و جانسون SB نتایج متنوعی از کارآیی برازش این مدل‌ها ارائه شده است. در مطالعات خارجی، در بررسی مدل‌های توزیع قطری در توده‌های همسال گونه راش در کشور دانمارک، از برازش توزیع قطری درختان به‌عنوان اولین متغیر برای پیش‌بینی مدل‌های اندازه درختان نام برده شده است که به‌طور مستقیم از توده اندازه‌گیری می‌شود (Nord-Larsen & Cao, 2006). تعیین مدل‌های توزیع قطری درختان در جنگل‌کاری‌های گونه *Pinus sylvestris* در کشور بلغارستان تابع ویبول دو پارامتری را به‌عنوان بهترین مدل برای این منطقه برازش کرد (Stankova & Diéguez-Aranda, 2010). در توده‌های دست‌کاشت گونه اکالیپتوس در کشور پرتغال نیز توزیع جانسون SB به‌عنوان تابع توزیع قطری معرفی شد (Mateus, 2011). در بررسی توزیع قطری درختان در جنگل‌های رومانی نیز توزیع ویبول بهترین عملکرد را نشان داد (Ciceu *et al.*, 2021). همکاران (2012) نیز ضمن معرفی توزیع قطری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر ساختاری توده به بررسی توزیع قطری جنگل‌کاری صنوبر با فواصل کاشت مختلف در صربستان پرداختند و توزیع ویبول را با تفاوت اندکی بین جنگل‌کاری‌های مورد مطالعه، به‌عنوان بهترین توزیع برای نشان دادن پراکنش قطری براساس انواع روش‌های برازش معرفی کردند. Waldy و همکاران (2022) با تأکید بر این نکته مهم که مدیریت و برنامه‌ریزی مؤثر در جنگل اغلب به اطلاعاتی درباره توزیع حجمی و براساس اندازه درختان و طبقه‌های محصول دارد، مدل‌های طبقه‌های قطری را با انعطاف‌پذیری بالا و در عین حال پیش‌بینی قوی معرفی کردند. آن‌ها تأکید کردند که لازم است برای هرگونه یا منطقه به‌طور مجزا تحقیق و ارائه شود. از این‌رو مدل‌های توزیع قطری جنگل‌کاری گونه اکالیپتوس در اندونزی را بررسی

توده فرآیندی زمانبر است، توزیع قطر درختان بسیاری از اطلاعات لازم برای مدیریت پایدار براساس قطر را فراهم می‌کنند و می‌توان آن‌ها را با دقت بالا پیش‌بینی کرد، بنابراین در زمان و منابع مالی صرفه‌جویی می‌شود. این توابع توزیع می‌توانند به‌عنوان روش جایگزینی برای جداول محصول در تخمین انواع متغیرهای توده از جمله حجم استفاده شده و به‌راحتی در مدل‌های رویش جنگل برای پیش‌بینی توزیع قطری درختان استفاده شوند (Ciceu *et al.*, 2021).

در مدل‌های توزیع قطری با امکان پیش‌بینی و شبیه‌سازی، کمک مفیدی برای برنامه‌ریزی عملیات برداشت فراهم می‌شود. نتایج این نوع از تحقیقات توسعه یک سیستم معادلات بر پایه توابع ریاضی و یا حتی امکان تخمین سایر پارامترها را فراهم می‌کنند. تحقیقات در مورد توسعه مدل‌های رشد و عملکرد شامل استفاده از انواع توابع مختلف برای مدل‌سازی توزیع‌های قطری، کمک به برنامه‌ریزی نرمال عملیات برداشت، شبیه‌سازی انتقال از جنگلداری همسال به ناهمسال و پیش‌بینی حجم چوب از کاربردهای استفاده از تعیین توابع توزیع هستند (Mateus, 2011).

در پیش‌بینی مدل‌های رشد و عملکرد جنگل مدت‌هاست که از مدل‌های توزیع احتمال برای قطر استفاده می‌شود. توابع مهم در این زمینه شامل لگ نرمال، ویبول، بتا، گاما و جانسون SB به‌طور گسترده در حال استفاده هستند زیرا توانایی آن‌ها در توصیف طیف وسیعی از توزیع‌های تک‌مدی بوده و به چولگی مثبت و منفی سازگار هستند. شکل تابع آن‌ها بدون نیاز به ادغام عددی، توزیع‌های احتمال را ایجاد می‌کنند. پارامترهای این مدل‌ها به‌راحتی به روش‌های مختلف تخمین زده می‌شوند (Andrasev *et al.*, 2012).

مدل‌های توزیع احتمالی قطر برابر سینه‌گونه‌های مختلف جنگلی در جنگل‌های طبیعی در مطالعات زیادی در کشور مورد برازش قرار گرفته‌اند از آن جمله توزیع طبقه‌های قطری گونه ممرز در جنگل ارسباران (Abedi, 2020)، بلوط

فاصله کاشت ۵×۳ متر)، ۳۲۶ پایه (در توده با فاصله کاشت ۳×۳ متر)، ۱۹۰ پایه (در توده با فاصله کاشت ۵×۳/۵ متر) و ۱۴۵ پایه (در توده با فاصله کاشت ۴×۳ متر) اندازه‌گیری شد.

در ابتدا انواع آماره‌های توصیفی میانگین، میانه، واریانس، انحراف معیار، ضریب تغییرات، اشتباه معیار، چولگی و ضریب کشیدگی در هر منطقه محاسبه شد و همچنین تجزیه واریانس براساس آزمون توکی بین میانگین قطر برابر سینه در توده‌های مورد مطالعه در محیط نرم افزار Remdr در سطح احتمال $P \leq 0.05$ انجام شد. تعیین مدل توزیع آماری بهینه با استفاده از مدل‌های توابع توزیع پیوسته شامل بتا، نمایی، گاما، نرمال، لگ نرمال، ویبول و جانسون SB در محیط نرم‌افزار EasyFit 5.5 استفاده از رتبه‌بندی مدل‌ها به روش آزمون نیکویی برازش کلموگروف-اسمیرنوف به‌عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های برازش، انجام شد. فرض صفر در این آزمون بر یکسان بودن توزیع احتمال مشاهده شده با توزیع احتمال برآورد شده در سطح معنی‌داری $P \leq 0.05$ است. روش‌های برآورد مقادیر مشخصه‌های توابع توزیع در این مطالعه شامل، روش گشتاورها (Method of moments)، گشتاورهای خطی (Moment of linear)، حداکثر درست‌نمایی (Maximum likelihood estimation) و حداقل مربعات (Least square error) بود که برای هر توزیع، بهترین روش موجود را تعیین نموده و مشخصه‌های مدل‌های توزیع را برآورد می‌کند.

نتایج

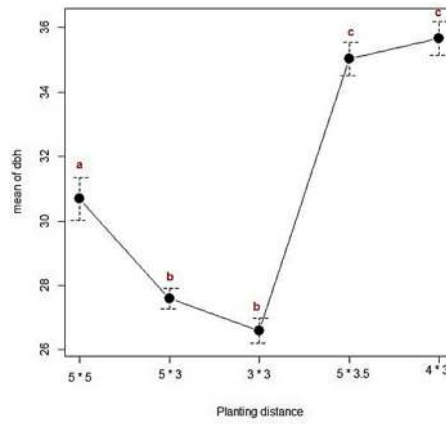
تجزیه واریانس (جداول ۱ و ۲) قطر برابر سینه درختان در مناطق مورد مطالعه نشان داد که قطر درختان در فاصله کاشت‌های مختلف با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند ($P \leq 0.05$) به جز مناطق با فاصله کاشت ۵×۵ با ۳×۳ و ۵×۳/۵ و ۳×۳ متر که تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در میانگین قطر برابر سینه نداشتند ($P \leq 0.05$) (شکل‌های ۱ و ۲).

کردند و در نهایت تابع ویبول سه پارامتری تابعی قوی در منطقه مورد مطالعه معرفی شد.

اطلاعات محدودی از کاربرد این مدل‌های توزیع در توده‌های دست‌کاشت در ایران دسترس است که نشان می‌دهد بررسی توزیع قطری جنگل‌های دست‌کاشت در ایران چندان مورد توجه پژوهشگران نبوده است. از این‌رو بررسی مدل‌های توزیع قطری درختان صنوبر در جنگل‌کاری‌های استان گیلان تحت تأثیر فواصل کاشت مختلف، هدف این پژوهش قرار گرفت. تا در نتیجه این تحقیق مدل‌های توزیع قطری به‌عنوان ابزاری در به‌دست آوردن اطلاعات قابل اعتماد در مورد ساختار، رشد و عملکرد جنگل‌های دست‌کاشت کشور تبدیل شود و به درستی برای جنگل‌های دست‌کاشت استفاده شود. بنابراین این مقاله در نظر دارد تا اطلاعات پنج منطقه جنگلی دست‌کاشت صنوبر با فواصل کاشت مختلف و اثرات آن بر تغییرات مدل‌های توزیع قطری درختان صنوبر (*Populus deltoides*) را برازش کند.

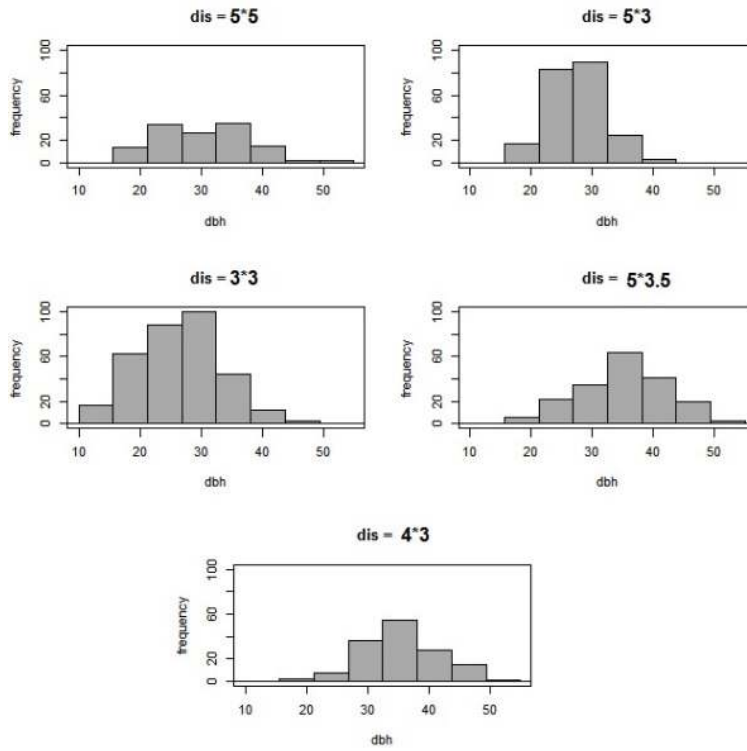
مواد و روش‌ها

پنج توده خالص صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides* Marsh.) از کلن 69.55 با فواصل کاشت مختلف در مناطق جنگل‌کاری این گونه واقع در استان گیلان انتخاب شد. مناطق انتخاب شده شامل توده ۳۲ ساله به مساحت ۳۸/۹ هکتار با فاصله کاشت ۵×۵ متر، توده ۲۹ ساله به مساحت ۴۸ هکتار با فاصله کاشت ۳×۳ متر، توده ۳۸ ساله به مساحت ۶۶ هکتار ۳×۳ متر، توده ۳۷ ساله به مساحت ۸۹ هکتار با فاصله کاشت ۵×۳/۵ متر و توده ۳۵ ساله به مساحت ۴۳ هکتار با فاصله کاشت ۴×۳ متر بودند. سپس درختان موجود در یک هکتار از بخش میانی هر توده مورد آماربرداری ۱۰۰ درصد قرار گرفتند (Horodnic & Roibu, 2018; Arora et al., 2014). به این ترتیب در مجموع ۱۰۰۶ پایه درخت صنوبر به تفکیک تعداد ۱۲۹ پایه (در توده با فاصله کاشت ۵×۵ متر)، ۲۱۶ پایه درخت (در توده با



شکل ۱- مقایسه میانگین قطر برابر سینه در مناطق مورد مطالعه

Figure 1. Compare means of DBH in the study stands



شکل ۲- منحنی‌های پراکنش قطری توده‌های مورد مطالعه

Figure 2. DBH distribution of the study stands

جدول ۱- تجزیه واریانس قطر برابر سینه (سانتی‌متر) در توده‌های مورد مطالعه

Table 1. Analysis of the variance of DBH (cm) in the study stands

منبع تغییرات Source	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square	F	معنی‌داری Sig.
بین گروه‌ها Between groups	14522.927	4	3630.732	85.842	.000*
درون گروه‌ها Within groups	42337.709	1001	42.295		
کل Total	56860.636	1005			

جدول ۲- مقایسه میانگین‌های قطر برابر سینه (سانتی‌متر) به روش توکی در توده‌های مورد مطالعه

Table 2. Tukey test for mean comparison of DBH (cm) in the study stands

توده (I) Stand (I)	توده (J) Stand (J)	میانگین تفاوت‌ها Mean Difference (I-J)	خطای معیار Std. Error	معنی‌داری Sig.
1	2	3.089	0.724	0.000*
	3	4.090	0.676	0.000*
	4	-4.355	0.741	0.000*
	5	-4.987	0.787	0.000*
2	1	-3.089	0.724	0.000*
	3	1.001	0.571	0.402 ^{ns}
	4	-7.444	0.647	0.000*
	5	-8.076	0.698	0.000*
3	1	-4.090	0.676	0.000*
	2	-1.001	0.571	0.402 ^{ns}
	4	-8.445	0.594	0.000*
	5	-9.077	0.64918	0.000*
4	1	4.355	0.74194	0.000*
	2	7.444	0.647	0.000*
	3	8.445	0.594	0.000*
	5	-0.632	0.717	0.904 ^{ns}
5	1	4.987	0.787	0.000*
	2	8.076	0.698	0.000*
	3	9.077	0.649	0.000*
	4	0.632	0.717	0.904 ^{ns}

* اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ^{ns} بدون اختلاف معنی‌دار

***: Significant at $p < 0.01$; *: Significant at $p < 0.05$

در قطر درختان توده‌های با فاصله کاشت 5×5 و 5×3 متر بیشتر و مثبت بود اما چولگی قطر درختان در سایر توده‌ها بسیار کم بود و در درختان توده $5 \times 3/5$ متر و 4×3 متر منفی بود. ضریب کشیدگی قطر درختان در تمامی توده‌ها منفی اما در فاصله کاشت 5×3 کشیدگی بیشتری به راست وجود داشت (جدول ۳).

حداقل قطر درختان در فاصله کاشت 3×3 متر کمترین (۱۲ سانتیمتر) و در فاصله کاشت 4×3 متر بیشترین (۲۰ سانتیمتر) مقدار بود. حداکثر قطر درختان نیز در فاصله کاشت $5 \times 3/5$ متر بیشترین مقدار (۵۵ سانتیمتر) و در فاصله کاشت 5×3 کمترین مقدار (۴۳ سانتیمتر) بود. میانگین قطر درختان در فاصله کاشت 3×3 متر کمترین (۲۶/۵۹ سانتیمتر) و در فاصله کاشت 4×3 (۳۵/۶۷ سانتیمتر) بیشترین بود. چولگی

جدول ۳- پارامترهای آماری قطر برابر سینه (سانتی‌متر) درختان صنوبر در فواصل کاشت مختلف

Table 3. Statistical parameters of dbh (cm) of poplar trees at different planting distance

پارامتر Parameter	فواصل کاشت Planting distance				
	5×5	5×3	3×3	5×3.5	4×3
حداقل Minimum	18	16	12	19	20
حداکثر Maximum	52	43	46	55	52
میانه Median	30	27	26	36	36
میانگین Mean	30.68	27.59	26.59	35.04	35.67
واریانس Variance	56.84	21.89	46.92	49.86	39.47
انحراف معیار Std. deviation	7.54	4.68	6.85	7.06	6.28
ضریب تغییرات Coef. of variation	0.25	0.17	0.26	0.20	0.18
اشتباه معیار Std. error	0.66	0.32	0.38	0.51	0.52
چولگی Skewness	0.47	0.51	0.15	-0.10	-0.07
ضریب کشیدگی Excess Kurtosis	-0.298	0.618	-0.29	-0.39	-0.09
میانگین سطح مقطع Basal Area	783.27	614.76	591.82	1002.58	1029.51

جدول ۴- مقادیر پارامترهای برآورد شده توزیع‌های قطر برابر سینه

Table 4. Values of estimated parameters of dbh distributions

توزیع Distribution	مقادیر مشخصه‌های توابع Values of functions characters				
	5 × 5	5 × 3	3 × 3	5 × 3.5	4 × 3
بتا Beta	$\alpha_1 = 1.65$	$\alpha_1 = 19.63$	$\alpha_1 = 3.74$	$\alpha_1 = 6.30$	$\alpha_1 = 14.60$
	$\alpha_2 = 3.36$	$\alpha_2 = 305.41$	$\alpha_2 = 5.20$	$\alpha_2 = 6.36$	$\alpha_2 = 12.19$
	$a = 17.54$	$a = 6.22$	$a = 8.18$	$a = 9.12$	$a = -0.47$
	$b = 57.31$	$b = 360.33$	$b = 52.13$	$b = 61.17$	$b = 65.84$
نمایی Exponential	$\lambda = 0.033$	$\lambda = 0.036$	$\lambda = 0.038$	$\lambda = 0.029$	$\lambda = 0.028$
نمایی دو پارامتری Exponential (2P)	$\lambda = 0.079$	$\lambda = 0.086$	$\lambda = 0.069$	$\lambda = 0.062$	$\lambda = 0.064$
	$\gamma = 18.0$	$\gamma = 16.0$	$\gamma = 12.0$	$\gamma = 19.0$	$\gamma = 20.0$
گاما Gamma	$\sigma = 16.56$	$\sigma = 34.78$	$\sigma = 15.07$	$\sigma = 24.62$	$\sigma = 32.23$
	$\beta = 1.85$	$\beta = 0.79$	$\beta = 1.76$	$\beta = 1.42$	$\beta = 1.11$
گاما سه پارامتری Gamma (3P)	$\alpha = 4.68$	$\alpha = 26.30$	$\alpha = 69.56$	$\alpha = 112.63$	$\alpha = 109.86$
	$\beta = 3.60$	$\beta = 0.91$	$\beta = 0.82$	$\beta = 0.67$	$\beta = 0.61$
	$\gamma = 13.80$	$\gamma = 3.75$	$\gamma = -30.39$	$\gamma = -40.49$	$\gamma = -31.46$
جانسون Johnson SB	$\gamma = 0.90$		$\gamma = 0.56$	$\gamma = -0.33$	$\gamma = -0.91$
	$\delta = 1.33$	-	$\delta = 2.15$	$\delta = 1.93$	$\delta = 4.31$
	$\lambda = 48.51$		$\lambda = 62.65$	$\lambda = 58.42$	$\lambda = 110.94$
لگ نرمال Log-Normal	$\sigma = 0.24$	$\sigma = 0.17$	$\sigma = 0.27$	$\sigma = 0.21$	$\sigma = 0.21$
	$\mu = 3.39$	$\mu = 3.30$	$\mu = 3.25$	$\mu = 3.53$	$\mu = 3.53$
	$\sigma = 0.27$	$\sigma = 0.14$	$\sigma = 0.062$	$\sigma = 0.041$	$\sigma = 6.28$
لگ نرمال سه پارامتری Log-Normal (3P)	$\mu = 3.28$	$\mu = 3.49$	$\mu = 4.69$	$\mu = 5.15$	$\mu = 5.19$
	$\gamma = 3.10$	$\gamma = -5.64$	$\gamma = -83.31$	$\gamma = -137.15$	$\gamma = -144.76$
	$\sigma = 7.54$	$\sigma = 4.68$	$\sigma = 6.85$	$\sigma = 7.06$	$\sigma = 6.28$
نرمال Normal	$\mu = 30.68$	$\mu = 27.59$	$\mu = 26.59$	$\mu = 35.04$	$\mu = 35.67$
	$\sigma = 4.91$	$\sigma = 7.27$	$\sigma = 4.57$	$\sigma = 5.81$	$\sigma = 6.68$
ویبول Weibull	$\beta = 33.26$	$\beta = 29.35$	$\beta = 29.03$	$\beta = 37.70$	$\beta = 38.08$
	$\alpha = 1.88$	$\alpha = 2.91$	$\alpha = 2.83$	$\alpha = 3.61$	$\alpha = 3.84$
ویبول سه پارامتری Weibull (3P)	$\beta = 15.39$	$\beta = 14.36$	$\beta = 19.98$	$\beta = 25.06$	$\beta = 23.80$
	$\gamma = 17.00$	$\gamma = 14.76$	$\gamma = 8.79$	$\gamma = 12.47$	$\gamma = 14.14$

مورد مطالعه نداشتند. از آن جمله توابع ویبول، نمایی دو پارامتری و نمایی در توده با فاصله کاشت ۵ × ۵ متر، توابع نرمال، ویبول سه پارامتری، ویبول، نمایی دو پارامتری، نمایی و جانسون SB در توده با فاصله کاشت ۵ × ۵ متر، توابع گاما، لگ نرمال، نمایی دو پارامتری و نمایی در توده با فاصله کاشت ۳ × ۳ متر و ۳/۵ × ۳ متر و ۴ × ۳ متر و ۵ متر و تابع نمایی و نمایی دو پارامتری در توده ۳ × ۳ متر بود (جدول ۴ و ۵). سایر مدل‌ها قادر بودند که ساختار قطری را تبیین کنند که در میان آن‌ها مناسب‌ترین توابع با رتبه اول معرفی و ترسیم شدند (شکل ۳).

در توده با بیشترین فاصله کاشت (۵ × ۵ متر) توزیع قطری درختان از تابع بتا پیروی می‌کرد و این تابع در رتبه اول رتبه‌بندی شد. در فاصله کاشت ۵ × ۳ متر تابع توزیع قطر درختان از نوع لگ نرمال سه پارامتری بود و در فاصله کاشت ۳ × ۳ متر نیز توزیع قطری درختان مشابه تابع نرمال بود. در چهارمین توده با فاصله کاشت ۵ × ۳/۵ متر توزیع قطری درختان به صورت تابع ویبول رتبه‌بندی شد و در فاصله کاشت ۴ × ۳ متر توزیع قطری درختان به صورت تابع نرمال بود. همچنین نتایج نشان داد که برخی مدل‌ها توان تبیین مناسبی از توزیع قطری را در توده‌های

جدول ۵- مقادیر آزمون‌های نیکویی برازش کولوموگروف-اسمیرنوف برای توزیع‌های قطر برابر سینه در فواصل کاشت مختلف

Table 5. Values of Kolmogorov-Smirnov goodness statistical test for dbh distributions at different planting distance

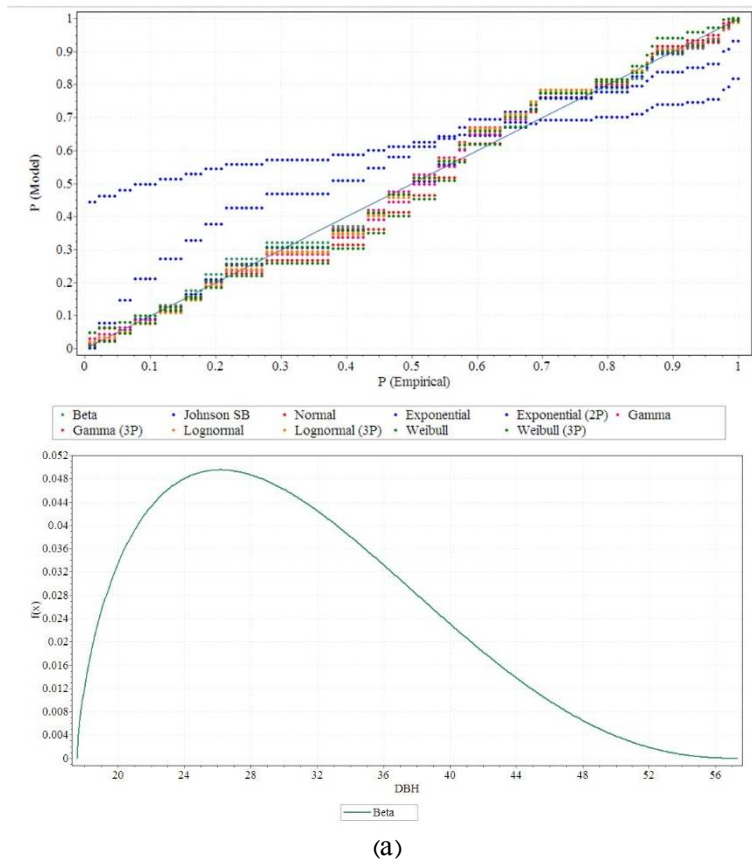
فاصله کاشت Planting distance	توزیع Distribution	رتبه Rank	آماره Statistic	Critical Value	P-value
5 × 5	بتا Beta	1	0.065	0.119	0.62 ^{ns}
	جانسون SB Johnson SB	2	0.071	0.119	0.52 ^{ns}
	ویبول سه پارامتری Weibull (3P)	3	0.084	0.119	0.31 ^{ns}
	گاما سه پارامتری Gamma (3P)	4	0.090	0.119	0.23 ^{ns}
	لگ نرمال Log-Normal	5	0.091	0.119	0.22 ^{ns}
	گاما Gamma	6	0.092	0.119	0.22 ^{ns}
	لگ نرمال سه پارامتری Log-Normal (3P)	7	0.092	0.119	0.21 ^{ns}
	نرمال Normal	8	0.114	0.119	0.07 ^{ns}
	ویبول Weibull	9	0.124	0.119	0.03 [*]
	نمایی دو پارامتری Exponential (2P)	10	0.215	0.119	0.0 [*]
	نمایی Exponential	11	0.446	0.119	0.0 [*]
5 × 3	لگ نرمال سه پارامتری Log-Normal (3P)	1	0.083	0.092	0.098 ^{ns}
	گاما سه پارامتری Gamma (3P)	2	0.083	0.092	0.094 ^{ns}
	بتا Beta	3	0.084	0.092	0.089 ^{ns}
	گاما Gamma	4	0.084	0.092	0.089 ^{ns}
	لگ نرمال Log-Normal	5	0.085	0.092	0.082 ^{ns}
	نرمال Normal	6	0.096	0.092	0.03 [*]
	ویبول سه پارامتری	7	0.099	0.092	0.03 [*]

فاصله کاشت Planting distance	توزیع Distribution	رتبه Rank	آماره Statistic	Critical Value	P-value
3 × 3	Weibull (3P) ویبول Weibull	8	0.124	0.092	0.002*
	نمایی دو پارامتری Exponential (2P)	9	0.355	0.092	0.0*
	نمایی Exponential	10	0.429	0.092	0.0*
	جانسون Johnson SB	11	-	-	-
	نرمال	1	0.049	0.075	0.38 ^{ns}
	لگ نرمال سه پارامتری Log-Normal (3P)	2	0.057	0.075	0.22 ^{ns}
	جانسون Johnson SB	3	0.061	0.075	0.18 ^{ns}
	ویبول Weibull	4	0.061	0.075	0.17 ^{ns}
	ویبول سه پارامتری Weibull (3P)	5	0.063	0.075	0.15 ^{ns}
	گاما سه پارامتری Gamma (3P)	6	0.063	0.075	0.15 ^{ns}
	بتا Beta	7	0.069	0.075	0.09 ^{ns}
گاما Gamma	8	0.078	0.075	0.04*	
لگ نرمال Log-Normal	9	0.099	0.075	0.003*	
نمایی دو پارامتری Exponential (2P)	10	0.27	0.075	0.0*	
نمایی Exponential	11	0.39	0.075	0.0*	
5 × 3.5	ویبول Weibull	1	0.065	0.098	0.38 ^{ns}
	ویبول سه پارامتری Weibull (3P)	2	0.072	0.098	0.25 ^{ns}
	جانسون Johnson SB	3	0.076	0.098	0.21 ^{ns}
	بتا Beta	4	0.078	0.098	0.19 ^{ns}

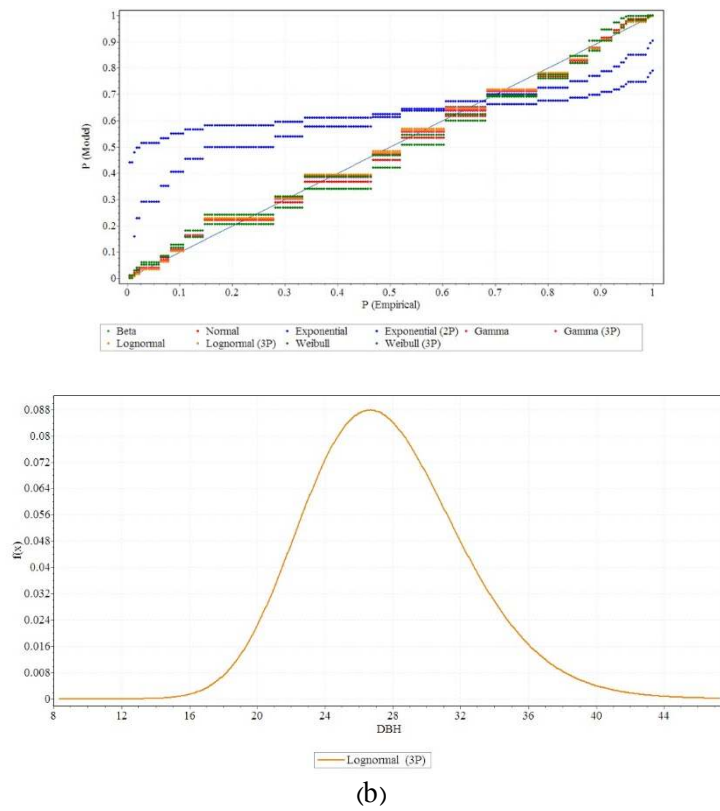
فاصله کاشت Planting distance	توزیع Distribution	رتبه Rank	آماره Statistic	Critical Value	P-value	
	نرمال Normal	5	0.078	0.098	0.18 ^{ns}	
	لگ نرمال سه پارامتری Log-Normal (3P)	6	0.084	0.098	0.13 ^{ns}	
	گاما سه پارامتری Gamma (3P)	7	0.087	0.098	0.11 ^{ns}	
	گاما Gamma	8	0.104	0.098	0.03*	
	لگ نرمال Log-Normal	9	0.117	0.098	0.009*	
	نمایی دو پارامتری Exponential (2P)	10	0.264	0.098	0.0*	
	نمایی Exponential	11	0.443	0.098	0.0*	
	4 × 3	نرمال Normal	1	0.055	0.113	0.76 ^{ns}
		جانسون SB Johnson SB	2	0.057	0.113	0.70 ^{ns}
		بتا Beta	3	0.059	0.113	0.67 ^{ns}
		لگ نرمال سه پارامتری Log-Normal (3P)	4	0.059	0.113	0.66 ^{ns}
ویبول سه پارامتری Weibull (3P)		5	0.062	0.113	0.62 ^{ns}	
گاما سه پارامتری Gamma (3P)		6	0.064	0.113	0.57 ^{ns}	
گاما Gamma		7	0.075	0.113	0.36 ^{ns}	
ویبول Weibull		8	0.075	0.113	0.36 ^{ns}	
لگ نرمال Log-Normal		9	0.086	0.113	0.22 ^{ns}	
نمایی دو پارامتری Exponential (2P)		10	0.035	0.113	0.0*	
نمایی Exponential		11	0.047	0.113	0.0*	

* اختلاف معنی دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ^{ns} بدون اختلاف معنی دار

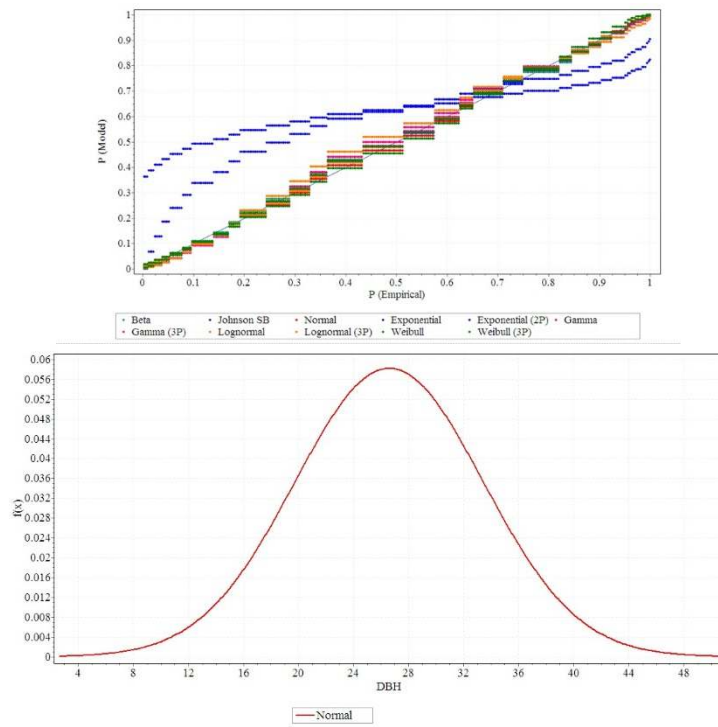
***: Significant at $p < 0.01$; *: Significant at $p < 0.05$



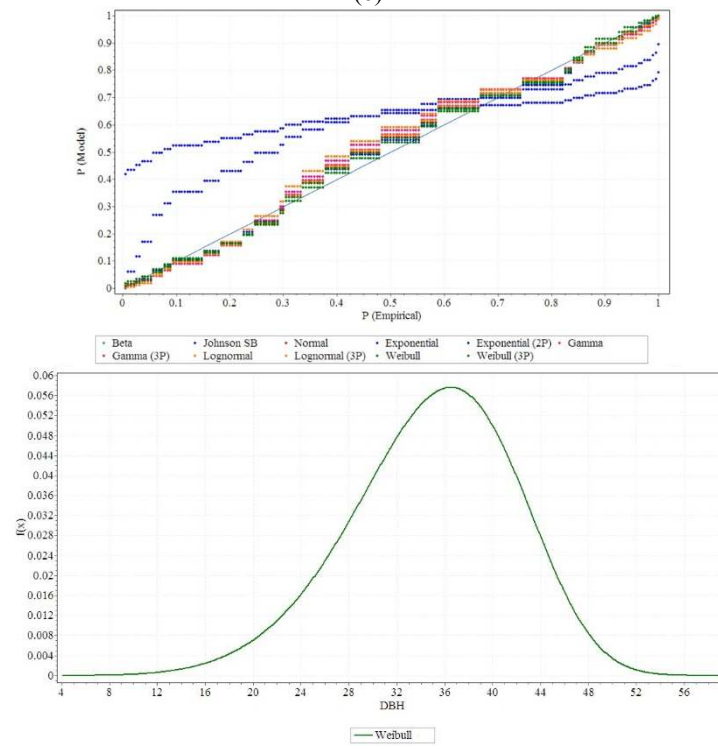
(a)



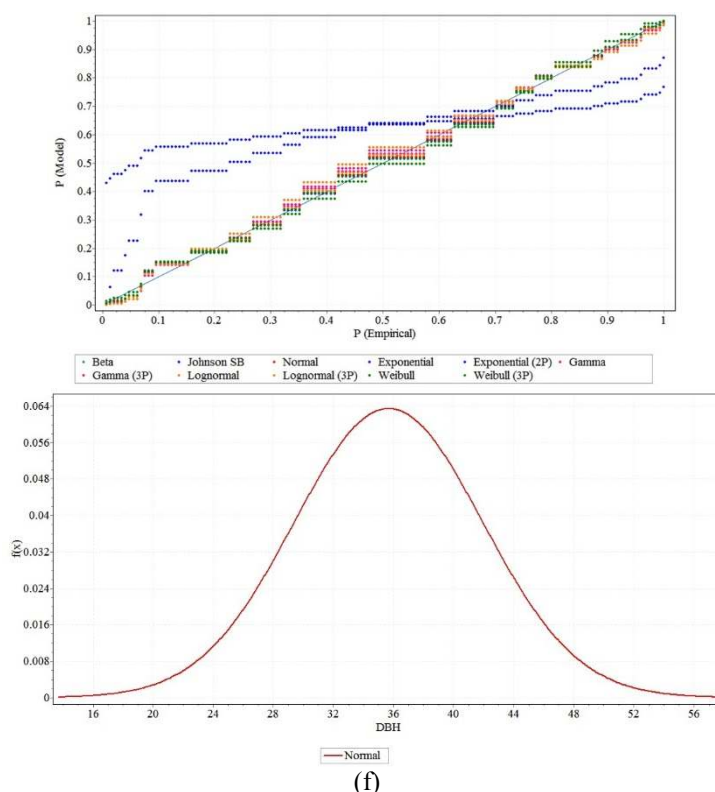
(b)



(c)



(e)



شکل ۳- هیستوگرام P-P توزیع‌های قطر برابر سینه در فواصل کاشت 5×5 متر (الف)، 5×3 متر (ب)، 3×3 متر (ج)، 5×3.5 متر (د) و 4×3 متر (ه) برازش بهترین مدل

Figure 3. Histogram of dbh distributions at different planting distance 5×5 (a), 5×3 (b), 3×3 (c), 5×3.5 (d), 4×3 (e)

بحث

در فراوانی درختان می‌تواند عامل تغییر در توابع توزیع قطری آن‌ها در توده باشد و عوامل محیطی مانند تغییر در جهت دامنه (Abedi, 2020)، زوال و دخالت‌های انسانی (Modaberi & Soosani, 2016) نیز به‌عنوان عوامل تغییردهنده توابع توزیع قطری ذکر شده است. بنابراین می‌توان گفت که بنابر نتایج پژوهش پیش‌رو، فاصله کاشت یا تراکم کاشت نیز به‌عنوان عاملی در تغییر مدل‌های توزیع قطری درختان صنوبر در جنگل‌های دست‌کاشت مطرح است. نتایج مطالعه توزیع قطری در توده‌های خالص، آمیخته، همسال و ناهمسال رومانی اثبات کرده است که مدل‌های نرمال، گاما و ویبول عملکرد خوبی در تعیین توزیع قطری این توده‌ها داشتند (Ciceu *et al.*, 2021). معیارهای انتخاب توزیع‌ها برای بررسی عبارتند از سهولت تخمین پارامتر، انعطاف‌پذیری برای توصیف طیف گسترده‌ای از متغیرها، سادگی روش‌های ادغام برای تخمین

توزیع قطری درختان یکی از بهترین توصیف‌کننده‌ها و از مهم‌ترین خصوصیات توده جنگلی به‌شمار می‌رود که با بررسی آن اطلاعات ارزشمندی از ساختار، سن و پایداری توده به‌دست خواهد آمد (Mighi *et al.*, 2021). نتایج پژوهش پیش‌رو تفاوت مدل‌های توزیع قطری در مناطق مورد مطالعه را نشان داد (جدول ۳)، که این موضوع می‌تواند به‌دلیل تفاوت معنی‌دار بین قطر درختان در توده‌های مورد بررسی باشد اما با وجود اینکه تفاوت معنی‌داری در میانگین قطری بین دو توده با فاصله کاشت 5×3 متر و 3×3 متر و همچنین توده‌های 5×3.5 متر و 5×3 متر (شکل ۱) مشاهده نشد اما مدل‌های توزیع فراوانی قطری آن‌ها متفاوت به‌دست آمد (جدول ۳). در مطالعات توده‌های مختلف جنگلی علت تغییر در نوع توزیع قطری اینگونه بیان شده است که هر نوع تغییر

(۰/۱۵ و ۰/۰۷-) و کشیدگی (۰/۲۹- و ۰/۰۹-) مشاهده و برازش شد. همچنین، کشیدگی و چولگی به راست به دلیل افزایش سن توده، امری طبیعی است که درختان کم قطر سرکوب و از پایین تنک و حذف می‌شوند. تعداد درختان در طبقه‌های قطری پایین کاهش و در طبقه‌های بالا افزایش یافته و با افزایش سن منحنی به سمت طبقه‌های قطری بالاتر (راست) جا به جا خواهد شد. انعطاف تابع ویبول (توزیعی با انعطاف بالا نسبت به داده‌های ناهمگن) برای این حالت‌ها بهتر تشخیص داده شده است اما برخی اصلاحات برای توصیف-های توزیع‌های پیچیده‌تر و چرخش‌های طولانی مدت مدیریتی توده، ممکن است که لازم باشد (Waldy et al., 2022).

Mohammadalizadeh و همکاران (۲۰۰۹) شکل منحنی نرمال را به دلیل رقابت برای رسیدن به نور و فضا معرفی کردند که با نتایج پژوهش پیش‌رو نیز مطابقت دارد زیرا توزیع نرمال در توده با فاصله کاشت 3×3 متر حاصل شد که داری بیشترین تعداد در هکتار درختان نیز بود (۳۲۶ پایه در هکتار). به نظر می‌رسد منحنی توزیع قطری درختان در اثر رقابت برای رسیدن به فضای بیشتر، به حالت نرمال ظاهر شده است. Nord-Larsen و Cao (۲۰۰۶) نیز بر این موضوع تأکید داشتند که احتمالاً مدل‌ها تحت تأثیر تعداد در هکتار درختان و سطح مقطع توده باشند. برداشت درختان قطور منحنی‌ها را با چولگی همراه می‌کند و کشیدگی و چولگی در منحنی‌های پژوهش پیش‌رو (به ترتیب چولگی ۰/۵۱ تا ۰/۰۷- و کشیدگی ۰/۶۱۸ تا ۰/۰۹-) می‌تواند به دلیل برداشت‌های غیر مجاز در طول دوره باشد. تنک کردن و برداشت غیرمجاز سبب حذف برخی طبقه‌های قطری می‌شود و این امر برازش مدل‌ها را از واقعیت دور می‌کند اما این مشکل کلی در تمام توده‌های جنگلی اعم از دست‌کاشت و طبیعی امری بدیهی است مگر در توده‌هایی که کاملاً تحت حفاظت باشند (Nord-Larsen & Cao, 2006). Ogana و همکاران (۲۰۱۶) نیز تأکید کردند که مدلسازی پارامترهای مدل‌های توزیع مستقیماً از ویژگی‌های توده مانند سن، حاصلخیزی رویشگاه، تعداد درختان در هکتار تأثیر

نسبت‌ها در طبقه‌های اندازه‌های مختلف و دقت در برازش داده‌های مشاهده شده، و هر یک از توابع که در این زمینه‌ها عملکرد مناسب‌تری داشته باشند، رتبه‌بندی و معرفی خواهند شد. به‌عنوان مثال توزیع جانسون SB به‌عنوان انعطاف-پذیرترین توزیع گزارش شده است و یا بتا و گاما و نرمال از نظر فضای چولگی و کشیدگی انعطاف‌پذیر عمل کرده‌اند (Ogana et al., 2016).

توزیع بتا که در فاصله کاشت 5×5 متر به‌عنوان بهترین مدل در نشان دادن توزیع قطری برازش شد انعطاف‌پذیری زیادی در تطابق با شرایط قطری دارد و قابلیت تبیین بالایی در توزیع فراوانی قطر دارد و همچنین در توده‌هایی که در گذشته تحت دخالت‌های انسانی بوده‌اند معمولاً در توزیع بتا برازش مناسب‌تری را نشان می‌دهد (Abedi, 2020). در مطالعه Ige و همکاران (2013) نیز توزیع‌های بتا و لوگ نرمال در تعیین توابع توزیع قطری جنگل‌های طبیعی در ذخیره‌گاه جنگلی در نیجریه عملکرد خوبی داشتند. همچنین، توزیع بتا در توده‌های ناهمسال نیز برازش مناسبی داشته است (Eslami et al., 2020) که نشان‌دهنده توان این مدل در نمایش توزیع قطری برای یک جنگل آمیخته استوایی و نیز یک جنگل تک کشتی است. مدل‌های بتا، جانسون SB، گاما و لگ نرمال برای توده دست‌کاشت اکالیپتوس در اندونزی نیز مناسب عمل کردند (Waldy et al., 2022).

Eslami و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که پیش‌بینی پارامترهای جنگل مانند مدل‌های توزیع قطر درختان نه تنها در تعیین تولید در طبقه‌های قطری اهمیت دارد بلکه در ایجاد برنامه‌ریزی تنک کردن توده نیز اهمیت دارد. بنابراین، این مدل‌ها با نشان دادن میزان دقیق و کمی چولگی و کشیدگی در طبقه‌های قطری مختلف و با نمایش نوسانات قطری در توده جایگاه قطری توده را مشخص می‌کنند. در پژوهش پیش‌رو منحنی لگ نرمال در داده‌هایی که چولگی به راست داشتند برازش شد که این موضوع در توده با فاصله کاشت 3×5 متر با بیشترین مقدار چولگی (۰/۵۱) حاصل شد. در توزیع نرمال این حالت برعکس بود یعنی توزیع داده‌ها در فاصله کاشت 3×3 متر و 3×4 متر با کمترین مقدار چولگی

منابع مورد استفاده

- می‌پذیرند. قطع غیرقانونی نیز می‌تواند با تغییر در فراوانی درختان، شکل واقعی توده را مخدوش کرده بنابراین توزیع قطری موجود ماهیت واقعی توده را نشان نمی‌دهد.
- یک مدل توزیع قطری موفق نیاز به انعطاف پذیری بالا و در عین حال پیش‌بینی قوی پارامترها را دارد (Waldy *et al.*, 2022). توزیع بتا و ویبول توزیع‌هایی با انعطاف بالا معرفی شده‌اند و با توان بالایی در مدلسازی برای توده‌های ناهمسال و آمیخته کاربرد دارند (Mohammadalizadeh *et al.*, 2013). این دو مدل توزیع در توده‌های با فاصله کاشت بیشتر در منطقه یعنی 5×5 متر (بتا) و $5 \times 3/5$ متر (ویبول) مشاهده شد جایی که تراکم این دو توده نیز نسبت به توده‌های دیگر کمتر بود (به ترتیب ۱۲۹ و ۱۹۰). توزیع ویبول به دلیل ساگازی با میزان زیاد تغییرات در توده‌های آمیخته و ناهمسال قادر به مدلسازی مقادیر زیاد تنوع است.
- توزیع جانسون SB نیز برای جنگل‌کاری اکالیپتوس در پرتغال بهینه تشخیص داده شد (Mateus, 2011)، اما این مدل در پژوهش پیش‌رو برآزش مناسبی را در رتبه‌های دوم و سوم در برخی مناطق نشان داد.
- نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که فاصله کاشت در جنگل‌های دست‌کاشت به‌عنوان عاملی در تغییر مدل‌های توزیع قطری درختان مطرح است. پیش‌بینی توزیع قطری یکی از خروجی‌های این مدل‌ها است. این پژوهش نشان داد که در فاصله کاشت‌های کمتر توزیع درختان نرمال برآزش شد و با افزایش فاصله کاشت توزیع‌های قطری متنوعی در توده‌ها حاصل شد. بنابراین پژوهش پیش‌رو می‌تواند با معرفی مدل توزیع قطری برای یک توده همگن تک‌کشتی بر حسب فاصله کاشت به‌عنوان مطالعه‌ای مرجع باشد تا برای مدیریت توده برای رسیدن به یک توزیع مورد نظر و یا مدیریت توده برای تبدیل از یک توده دست‌کاشت به توده‌ای آمیخته با ترکیب چندین گونه با توزیع مناسب نیز مفید و کاربردی باشد. بنابراین گذر از یک ساختار تک‌کشتی به سمت ساختار متنوع با استفاده از مدل‌های عملکرد رویش برای شبیه‌سازی این دینامیک توده مورد نیاز است که گام اولیه آن در تعیین مدل توزیع قطری درختان به‌عنوان یک پژوهش زمینه‌ای انجام شد.
- Abedi, R., 2020. Investigation of changes in probability distribution functions of diameter, height and canopy area of trees affected by slope aspect. *Studies of Environmental Science*, 5 (2): 2513-2520. (In Persian with English summary)
 - Andrasev, S., Vuckovic, M. and Stajic, B., 2012. The choice of location parameter of Weibull diameter distribution in the plantations of the poplar clone 618 (*Populus deltoides* Bartr. ex Marsh.), International Scientific Conference, 1st - 4th November 2012, 365-375.
 - Arora, G., Chaturvedi, S., Kaushal, R., Nain, A., Tewari, S. and Alam, N.M., 2014. Growth, biomass, carbon stocks, and sequestration in age series of *Populus deltoides* plantations in Tarai region of central Himalaya, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38: 550-560.
 - Ciceu, A., Pitar, D. and Badea, O., 2021. Modeling the diameter distribution of mixed uneven-aged stands in the south western carpathians in romania, *Forests*, 12 (958): 1-16.
 - Duan, A.G., Zhang, J.G., Zhang, X.Q. and He, C.Y., 2013. Stand diameter distribution modelling and prediction based on richards function. *PLoS ONE* 8(4): e62605.
 - Eslami, A.R., Karimi, B., Payam, H. and Derakhshan, O.K., 2020. Investigation of the structure and distribution diameter classes models in beech forests of Northern Iran, *International Journal of Agricultural Sciences*, 10 (11):001-009.
 - Hassanzad Navroodi, I. and Moradi Emam Qeysi, I., 2020. Fitting tree height distributions in natural beech forest stands of Guilan (Case study: Masal), *Ecology of Iranian Forests*, 7 (14): 1-9. (In Persian with English summary)
 - Horodnic, S.A. and Roibu, C.C. 2018. A Gaussian multi-component model for the tree diameter distribution in old-growth forests. *European Journal of Forest Research*, 137: 185-196.
 - Ige, P.O., kinyemi, G.O. Abi, E.A., 2013. Diameter Distribution Models for Tropical Natural Forest trees in Onigambari Forest Reserve, *Journal of Natural Sciences Research*, 3 (12): 14-23.
 - Mateus, T., 2011. Modeling the diameter distribution of eucalyptus plantations with Johnson's S B probability density function: parameters recovery from a compatible system of equations to predict stand variables. *Annals of Forest Science*, 68 (2): 325-335.
 - Mighi, A., Taheri Abkenar, K. and Amanzadeh, B., 2021. Fitting frequency distributions of trees diameter at breast height in different growth stages in Asalem mixed forests of Guilan, *Forest and Wood Products*, 74 (3): 291-300.
 - Mirzaei, M. and Bonyad, A.E., 2015. Diameter distribution modeling of quercus persica using probability distribution functions in open forests (case study: Dalab of Ilam

- Nord-Larsen, T. and Cao, Q.V., 2006. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark. *Forest Ecology and Management*, 231: 218–225.
- Ogana, F.N., Itam, E.S. and Osho, J.S.A., 2016. Modeling diameter distributions of *Gmelina arborea* plantation in Omo forest reserve, Nigeria with Johnson's SB. *Journal of Sustainable Forestry*, 36 (2): 1-13.
- Ostad Hashemi, R., Akhavan, R., Abasloo, A. and Safapoor, Gh., 2021. Modeling diameter distribution of oak and forest stand in Arasbaran forests of Iran, *Studies of Environmental Science*, 6 (4): 4256-4265. (*In Persian with English summary*)
- Stankova, T. and Diéguez-Aranda1, U., 2010. Diameter distribution model for scots pine plantations in Bulgaria, *Forestry Ideas*, 16, 2(40): 15-162.
- Waldy, J., Kershaw Jr, J.A., Weiskittel, A., and Ducey, M.J., 2022. Diameter distribution model development of tropical hybrid Eucalyptus clonal plantations in Sumatera, Indonesia: A comparison of estimation methods, *New Zealand Journal of Forestry Science*, 52: 1-14.
- province), *Quarterly Iranian Journal of Forest*:7 (1):127-136. (*In Persian with English summary*)
- Modaberi, A. and Soosani, J., 2016. Dynamic assessment of changes in the statistical distribution of the canopy in the central zagros forests with impact of the decline (Case study: Dadabad- Lorestan), *Forest Research and Development*, 2 (1): 73-83. (*In Persian with English summary*)
- Mohammadalizadeh, Kh., Namiranian, M., Zobeiri, M., Hoorfar, A. and Marvie Mohajer, M.R., 2013. Modeling of frequency distribution of tree's height in uneven- aged stands (Case study: Gorazbon district of Khyroud forest). *Journal of Forest and Wood Products (Iranian Journal of Natural Resources)*: 66 (2): 155-165. (*In Persian with English summary*)
- Mohammadalizadeh, Kh., Zobeiri, M., Namiranian, M., Hoorfar, A. and Marvie Mohajer, M.R., 2009. Fitting of diameter distribution using some statistical models (distributions), (Case study: Khyroudkenar forest, Noshahr), *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 17(1): 116-124. (*In Persian with English summary*)

Investigating the different models of diameter distribution for *Populus deltoides* plantation in relation to planting distances

T. Abedi ¹ and R. Abedi ^{2*}

1- Assistant Prof., Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research, Rasht, Iran

2*- Corresponding author, Assistant Prof., Department of Forestry, Ahar Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tabriz, Iran. E-mail: royaabedi@tabrizu.ac.ir

Received: 18.07.2022

Accepted: 04.07.2022

Abstract

The number of trees in each diameter at the breast height (DBH) class is considered the diameter distribution model and it is one of the most critical parameters in describing the structure of the stands. The diameter distribution of trees is one of the most important aspects that should be considered by forest managers when deciding on forest management strategies. This study aimed to investigate the diameter distribution functions of poplar (*Populus deltoides*) trees in the plantation in the Gilan province under the influence of different planting distances. To use models of diameter distribution functions as a tool to obtain reliable information about the structure, growth, and performance of plantations, and to manage silvicultural treatments in these stands. For this purpose, the measurement of all trees' DBH in the one hectare plots was used in five pure poplar plantations with 5×5 m, 3×5 m, 3×3 m, 3.5×5 m, and 3×4 m planting distance. Kolmogorov-Smirnov fitting test showed a specific distribution function in each stand. The diameter distribution of the trees followed the Beta function in the stand with a planting distance of 5×5 m. The diameter distribution function has of Log-Normal (3P) distribution at a planting distance of 3×5 m. The diameter distribution of trees was a Normal function at a planting distance of 3×3 m, at a planting distance of 3.5×5 m in the fourth stand, the diameter distribution of the trees was fitted as a Weibull function and Normal distribution was shown in 3×4 m planting distance in the last stand. The present study showed that planting distance on the plantation is a factor in changing the diameter distribution functions. At less planting distance, the diameter distribution of trees was normal, and by increasing the planting distance, various diameter distributions were obtained in the stands. Therefore, the present research can be used as a reference study by introducing the diameter distribution model for a mono-culture homogeneous pure stand regarding planting distance. This is practical for stand management to reach a desired distribution or management to transform from a pure stand to a mixed species stand by combining several species with appropriate distribution. In addition, transitioning from a single species structure to a diverse structure using growth performance models is required to simulate this stand's dynamics, the initial step is the determination of the tree's diameter distribution models as a basic study.

Keywords: Diameter at breast height (DBH), Diameter structure, Even-age forest, Modeling, Plantation, *Populus deltoides*.