

برازش معادلات رشد برای سطح مقطع برابر سینه صنوبر دلتوئیدس در صومعه‌سرا-گیلان

مرضیه حجاریان^{۱*}، سید مهدی حشمت‌الواعظین^۲، اولیسیس دیه‌گز-آراندا^۳، منوچهر نمیرانیان^۴ و وحید اعتماد^۲

^۱ دانشجوی دکتری جنگلداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

^۲ استادیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

^۳ دانشیار دانشگاه سانتیاگو دکومپوستلا، اسپانیا

^۴ استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۱۸)

چکیده

معادله‌های رشد سطح مقطع در سطح توده، با حجم توده ارتباط مستقیم دارند و برازش آن‌ها برای برآوردها و محاسبات توده، مانند برآورد محصول و محاسبات اقتصادی ضروری است. هدف این پژوهش، برآورد معادله‌های رشد سطح مقطع برای مطالعات اقتصادی است. برای برازش این معادلات، قطر برابر سینه و ارتفاع توده در صنوبرکاری‌های نمونه ملی منطقه صومعه‌سرا در دو مرحله اندازه‌گیری شد. این صنوبرکاری‌ها همگی با گونه صنوبر دلتوئیدس کلن ۶۹۵۵ نهالکاری شده بودند. با توجه به قطع درختان در سن کمتر از ده سال در منطقه و کمبود اطلاعات در زمینه رشد درختان در سنین بالاتر، دو قطعه صنوبرکاری ۲۶ و ۲۷ ساله شرکت سهامی جنگل شفارود در مناطق گیسوم و پیلیمبرا نیز آماربرداری شد. در مرحله بعد، معادلات رشد سطح مقطع برابر سینه با استفاده از سه معادله رشد کرف، هاسفلد و برتالانفی-ریچاردز و روش تفاضل جبری برازش شد. برای مقایسه مدل‌ها و انتخاب مناسب‌ترین مدل علاوه بر مقایسه چشمی منحنی‌ها از آماره‌های نیکویی برازش شامل ضریب تعیین، جذر میانگین مربع خطا و نیکویی برازش آکاییک بهره گرفته شد. در نهایت، معادلات رشد برآورد شده اعتبارسنجی شد. به این منظور، ۳۰ درصد کل داده‌ها که در برآورد معادلات استفاده نشده بودند، برای برآورد آماره جذر میانگین مربع خطا به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد معادلات رشد برآورد شده با مدل کرف نسبت به مدل‌های هاسفلد و برتالانفی ریچاردز تطابق بهتری با داده‌ها نشان می‌دهد. بررسی آماره‌های نیکویی برازش نیز نشان داد معادلات برآورد شده با ضریب تعیین ۰/۹۷ و جذر میانگین مربعات خطای ۱/۵ مترمربع در هکتار از دقت خوبی برخوردار است. در نهایت، بر پایه نتایج اعتبارسنجی، جذر میانگین مربعات خطای معادلات برای داده‌های اعتبارسنجی، ۰/۶۴ متر مربع در هکتار برآورد شد که از نظر آماری تفاوت معناداری با جذر میانگین مربع خطای معادلات برآورد شده ندارد.

واژه‌های کلیدی: روش تفاضل جبری، صنوبر دلتوئیدس، مدل کرف، معادلات رشد سطح مقطع.

مقدمه و هدف

صنوبر از گونه‌های تندرشد و پربازده است که سال‌هاست به عنوان منبعی اقتصادی برای تأمین چوب در دنیا مورد توجه قرار گرفته است. تشکیل کمیسیون بین‌المللی صنوبر در سال ۱۹۴۷ در فرانسه، نمونه‌ای از توجه جهانی به زراعت صنوبر محسوب می‌شود. در ایران نیز کمیسیون ملی صنوبر در سال ۱۳۴۶ بنیان نهاده شد و از سال ۱۳۸۷ نیز به‌طور رسمی فعالیت خود را از سر گرفت. صنوبر به دلایل مختلفی مورد توجه کشاورزان قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به تکثیر آسان، سازگاری با پنج منطقه ریشی ایران، توان رقابت با سایر محصولات کشاورزی و امکان توسعه در اراضی فقیر یا رها شده کشاورزی و همچنین وجود بازار مناسب برای فروش (مانند صنایع بزرگ چوب و کاغذ) اشاره کرد. پژوهش و تحقیق درباره صنوبر از سال ۱۳۳۶ با ورود چند قلمه از کلن‌های مختلف صنوبر به کشور آغاز شد (بزرگمهر و همکاران، ۱۳۸۱). بسیاری از مطالعات مذکور در زمینه انتخاب بهترین کلن و مناسب‌ترین فاصله کاشت با توجه به رشد قطر، ارتفاع و حجم کلن‌های مختلف صورت گرفته است. این مطالعات در مناطق مختلف صنوبرخیز کشور مانند استان گیلان انجام گرفته است. با این حال، برآورد معادلات رشد صنوبر در کشور بر پایه روش‌های جدید مدلسازی کمتر صورت پذیرفته است. معدود مقالات یا پایان‌نامه‌ها در این زمینه به برآورد معادله رشد صنوبر در یک رویشگاه با استفاده از معادله چندجمله‌ای درجه سوم (بدون لحاظ حاصلخیزی) یا ارائه منحنی رشد به روش رسم نمودار بسنده کرده‌اند (بهرام‌آبادی، ۱۳۹۰). با این همه، مدلسازی رشد صنوبر، پایه پیش‌بینی تولید در رویشگاه‌های مختلف و نیز پایه کلیه مطالعاتی است که بر شبیه‌سازی یا بهینه‌سازی تولید صنوبر استوار است. برای مثال، این پیش‌بینی‌ها به برنامه‌ریزان و کشاورزان کمک می‌کند که با آگاهی و دقت بیشتر مقدار چوب قابل برداشت اراضی در سنین

مختلف را پیش‌بینی کرده و برای رسیدن به حجم چوب بیشتر، برنامه‌ریزی کنند. از این گذشته، تعیین استانداردهای اقتصادی کاشت، داشت و برداشت گونه‌ها و کلن‌های مختلف صنوبر در رویشگاه‌های مختلف به مدل‌سازی رشد وابسته است. در خارج از ایران، مطالعات بسیاری در مورد مدلسازی رشد گونه‌های مختلف مانند صنوبر انجام گرفته است. از آن جمله (Birler (1985) پژوهش گسترده‌ای درباره صنوبر اورامریکن در مناطق ساحلی ترکیه انجام داده است. در این تحقیق، رشد صنوبر در رویشگاه‌های مختلف بررسی شده و در پایان، جدول حجم و جدول محصول برای این گونه تهیه شده است. در جدول حجم تهیه‌شده، حجم تنه، حجم کل درخت و حجم فرآورده‌های مختلف چوبی بر اساس ارتفاع و قطر برابرسینه نشان داده شده است. جدول محصول نیز با چهار درجه حاصلخیزی رویشگاه و هفت فاصله کاشت مختلف برای سنین سه تا پانزده سال تهیه شده است. (Barrio *et al.* (2008) در پژوهش دیگری در مورد صنوبر اورامریکن در رویشگاه‌های مختلف شمال غرب اسپانیا، مدل رشد توده برای گونه مذکور را تهیه کردند. این مدل شامل توابع ارتفاع و سطح مقطع برابرسینه، توده است که به روش تفاضل جبری^۱ استخراج شده‌اند. نتایج این توابع به‌عنوان ورودی برای مدل حجم توده برای محاسبه حجم تجاری توده استفاده شده است. (Kitikido *et al.* (2012) نیز از معادلات تفاضل جبری توابع کرف، برتالانفی-ریچاردز و هاسفلد برای مدلسازی رشد ارتفاع غالب توده‌های جوان صنوبر اروپایی استفاده کردند. محققان بسیاری به برازش معادلات رشد^۲ توده به روش تفاضل جبری برای گونه‌های دیگر پرداخته‌اند. از آن جمله (Castedo *et al.* (2007) در تهیه مدل پویایی رشد کاج رادیاتا و (Dieguez *et al.* (2006) برای برازش معادلات رشد کاج جنگلی از این روش استفاده

منطقه، اطلاعات مربوط به صنوبرکاری‌های مسن دلتوئیدس متعلق به شرکت سهامی جنگل شفارود واقع در مناطق پیلمبرا و گیسوم نیز وارد بررسی شد. منطقه ضیابر در شهرستان صومعه‌سرا در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۸ دقیقه واقع است. آب‌وهوای این شهرستان مرطوب و مقدار بارش سالانه آن ۱۴۵۰ میلی‌متر است. خاک منطقه اغلب لومی-رسی با pH بین ۷/۵-۷ است. صنوبرکاری‌ها در این منطقه جوان هستند و کمتر از ده سال سن دارند. فاصله کاشت در این اراضی بین ۴×۴، ۳×۴ و ۳×۳ متر متغیر است. اراضی صنوبرکاری شرکت سهامی شفارود در دو منطقه پیلمبرا و گیسوم واقعند. متوسط دمای سالیانه در منطقه گیسوم، ۱۹/۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه، ۱۳۶۵ میلی‌متر گزارش شده است. خاک منطقه از تیپ خاک‌های گلی بوده و با زهکشی، متوسط تا ضعیف است (صالحی و همکاران، ۱۳۹۱). سن این صنوبرکاری‌ها ۲۶ سال و فاصله کاشت درختان در این اراضی ۳×۴ متر است. متوسط دمای سالیانه در منطقه پیلمبرا ۱۴/۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه ۱۶۶۳ میلی‌متر است (باباخانجانی و همکاران، ۱۳۸۷). خاک منطقه دارای زهکشی ناقص و به شدت رسی با pH بین ۶/۹-۷ است (سیاهی پور بالاده و امان زاده، ۱۳۸۶). سن صنوبرکاری‌های این اراضی ۲۷ سال و فاصله کاشت درختان ۳×۴ متر است.

- روش تحقیق

ابتدا، محدوده اراضی انتخاب شده با استفاده از دستگاه جی‌پی‌اس^۱ برداشت شد. نقاط جمع‌آوری شده وارد محیط نرم افزار آرک جی آی اس^۲ نسخه ۹/۱ شد و نقشه محدوده‌های انتخاب شده ترسیم و مساحت اراضی محاسبه شد. به دلیل محدودیت‌های زمانی و مالی برای اجرای دو دوره آماربرداری با فاصله

کرده‌اند. با توجه به اهمیت برآورد معادلات رشد برای بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با صنوبر و نیز عدم تصریح و برآورد این مدل‌ها در کشور، هدف این پژوهش، تصریح و برازش معادلات رشد سطح مقطع صنوبر است. استان گیلان از ویژگی‌های منحصربه-فردی در زمینه کشت این گونه برخوردار است. برای نمونه، این استان بیشترین سطح زراعت صنوبر در کل کشور (۳۶ درصد) و بیشترین امکان توسعه در کل کشور (۱۰۸ هزار هکتار از ۵۲۰ هزار هکتار سطوح مناسب برای صنوبرکاری در کل کشور) را به خود اختصاص می‌دهد (گروه تحقیقات صنوبر و درختان سریع‌الرشد، ۱۳۸۷). به علاوه، قطب صنایع تبدیل اولیه چوب شمال کشور با ۵۹ درصد از کل ظرفیت صنایع سلولزی شمال کشور در این استان قرار دارد (حشمت‌الواعظین، ۱۳۸۹). گونه صنوبر دلتوئیدس کلن ۶۹۵۵ یکی از مهم‌ترین گونه کشت شده در این استان، چه از نظر سطح کشت و چه از نظر تولید در هکتار محسوب می‌شود (قرآنی، ۱۳۶۷). به این ترتیب، این پژوهش در استان گیلان و برای گونه صنوبر دلتوئیدس کلن ۶۹۵۵ اجرا شد.

مواد و روش‌ها

- منطقه مورد بررسی

صنوبرکاری‌های مورد پژوهش، در دو منطقه واقع شده‌اند: منطقه ضیابر از توابع شهرستان صومعه‌سرا در استان گیلان و اراضی شرکت سهامی جنگل شفارود در مناطق پیلمبرا و گیسوم. داده‌های منطقه ضیابر از اراضی صنوبرکاری نمونه ملی جمع‌آوری شده‌اند. با اجرای پیمایش، بخشی از این اراضی که تنها با صنوبر دلتوئیدس کلن ۶۹۵۵ جنگلکاری شده بود مشخص شد. از این بین، اراضی‌ای که مالکانشان برای حفظ درختان علامت‌گذاری شده و عدم قطع آنها (به منظور اندازه‌گیری درختان در دو سال متوالی) اعلام همکاری کردند، برای ادامه پژوهش انتخاب شد. به علاوه، با توجه به جوان بودن صنوبرکاری‌های این

1. GPS
2. ArcGIS

میان برای ادامه اندازه‌گیری‌ها انتخاب شدند. قطر تمامی درختان در هر خط نمونه با نوار قطرسنج تا دقت میلی‌متر و ارتفاع کل با شیب‌سنج سونتو تا دقت سانتی‌متر متر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌های مذکور در زمستان ۱۳۸۹ و پیش از آغاز رویش سالانه درختان انجام گرفت. درختان مذکور در هر ردیف شماره‌گذاری شده و در زمستان سال ۱۳۹۰ دوباره اندازه‌گیری شدند. متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در هر آماربرداری عبارتند از سطح مقطع برابرسینه (بر حسب متر مربع در هکتار)، سن (بر حسب سال)، ارتفاع کل (بر حسب متر) و تعداد پایه در هکتار. اطلاعات مربوط به قطر برابرسینه هر آماربرداری در جدول ۱ آورده شده است.

زمانی بیش از یک سال و یا بررسی دوایر سالیانه به دلیل سختی تشخیص دوایر و وجود دوایر سالیانه کاذب در گونه صنوبر، تصمیم به اندازه‌گیری قطر و ارتفاع در دو سال متوالی گرفته شد. حدود ۶۰ هکتار از اراضی زیر کشت صنوبر در ۳۰ قطعه صنوبرکاری شده، در قطعات ۱ تا ۵ هکتاری بررسی و اندازه‌گیری شد. سپس ارتفاع کل و قطر برابر سینه درختان به روش نمونه‌برداری خط نمونه اندازه‌گیری شد. خط نمونه‌ها به صورت منظم تصادفی انتخاب شدند. به این ترتیب که هر یک از ردیف‌های صنوبرکاری به عنوان یک خط نمونه در نظر گرفته شد. اولین خط نمونه به صورت تصادفی برای شروع اندازه‌گیری‌ها انتخاب شد. سپس بقیه خط نمونه‌ها به صورت یکی در

جدول ۱- اطلاعات توصیفی داده‌های برداشت شده در منطقه پژوهش

اشتباه معیار	آماربرداری سال ۱۳۹۰			آماربرداری سال ۱۳۸۹			متغیر	تعداد درختان اندازه‌گیری شده	تعداد خط نمونه	منطقه		
	حداقل	حداکثر	متوسط	اشتباه معیار	حداقل	حداکثر					متوسط	
	۳/۰۶	۴/۵	۲۶/۷	۱۵/۱۷	۳/۳۱	۲/۷	۲۵/۶	۱۳/۸۳	DBH	۲۷۰۰۰	۹۰۰	ضیابر
	۴/۷۸	۳/۳۲	۲۱/۴۷	۱۳/۳۳	۵/۱۸	۱/۱۳	۲۰/۳۲	۱۱/۴۷	H			
	۵/۱۶	۱۳/۴	۴۰/۴	۲۶/۶۲	۴/۹۸	۱۳/۲	۳۹/۵	۲۵/۴۱	DBH	۱۶۰۰	۸۰	پیلمبرا
	۳/۴۵	۱۲/۶	۲۸/۷	۲۲/۴۹	۳/۳۷	۱۲/۹	۲۹/۲	۲۲/۰۹	H			
	۵/۴۷	۱۰/۷	۴۳/۵	۲۵/۰۵	۵/۲۷	۱۰/۵	۴۲/۴	۲۴/۴۴	DBH	۲۰۰۰	۱۰۰	گیسوم
	۳/۶۹	۱۶/۲۹	۳۱/۲۵	۲۴/۴	۳/۵۴	۱۵/۹۴	۲۹/۳۵	۲۳/۷۵	H			

بررسی انتخاب و سپس حاصلخیزی و تغییرات آن در مدل لحاظ شود.

- مدل‌های پایه

در این پژوهش، برای بررسی رشد سطح مقطع برابر-سینه توده صنوبر از سه تابع رشد معروف (جدول ۲) که در مدل‌سازی سطح مقطع برابرسینه بسیار کاربرد داشته‌اند، استفاده شد (McDill & Amateis, 1992; Amaro et al., 1997; Die'guez-Aranda et al., 2006; Barrio-Anta et al., 2008).

این توابع عبارتند از:

- معادلات رشد سطح مقطع برابرسینه

معادلات رشد سطح مقطع در سطح توده در واقع معادلات شبکه یا مجموعه‌ای از منحنی‌های رشد سطح مقطع در حاصلخیزی‌های مختلف را نسبت به سن نشان می‌دهند. این معادلات با حجم توده ارتباط مستقیم دارند و برازش آنها برای برآوردها و محاسبات توده، مانند برآورد محصول و محاسبات اقتصادی ضروری است. برای برآورد معادلات رشد ابتدا باید بهترین مدل پایه رشد با توجه به داده‌های مورد

مقدار متغیر وابسته یا وضعیت توده را در سن t_1 بر پایه وضعیت توده در سن مرجع (t_0 و Y_0) برآورد می‌کند. از این‌رو، مدل‌هایی که پس از جایگزینی تابع X در مدل‌های پایه به دست می‌آیند، معادلات پویایی نامیده می‌شوند (Cieszewski & Bailey, 2000).

مقدار رشد هر متغیر وابسته به رویشگاه مانند سطح مقطع یا ارتفاع را می‌توان به روش تفاضل جبری مدلسازی کرد. معادلات پویایی که به این روش تهیه می‌شوند، بسیار انعطاف‌پذیرتر از معادلات رشد اولیه (معادلات پایه) هستند (Cieszewski, 2004). به این دلیل، برای برآورد معادلات رشد از معادلات پویایی استفاده شد. معادلات پویایی ممکن است آنامورف^۶ یا پلی مورف^۷ با یک مجانب افقی^۸ باشند (Bailey & Clutter, 1974). به‌طور کلی، معادلات پویایی به دست آمده با روش تفاضل جبری، پلی مورف با یک مجانب افقی هستند و معادلات پویایی به دست آمده با روش تفاضل جبری تعمیم یافته، آنامورف هستند. در بیشتر تحقیقات، رشد سطح مقطع برابر سینه به صورت پلی مورف مدلسازی شده است (Amaro *et al.*, 1997). در این پژوهش نیز از مدل‌های پلی مورف با یک مجانب استفاده شد.

- برآزش معادلات رشد

تهیه مدل رشد سطح مقطع در دو مرحله صورت گرفت. ابتدا معادلات رشد سطح مقطع برابر سینه برآزش یافتند و سپس مدل مقداردهی اولیه تهیه شد. در این پژوهش، از روش سن مرجع ناوردا^۹ (BAI) به‌منظور برآزش مدل‌ها استفاده شد.

الف) تابع کرف^۱ (ارائه شده توسط (Lundqvist, 1957)؛
ب) هاسفلد^۲ (Hossfeld, 1822)؛
ج) برتالانفی-ریچاردز^۳ (Bertalanffy, 1949,)
د) ریچاردز (Richards, 1957, 1959).

- لحاظ تغییرات حاصلخیزی در مدل‌های پایه در هریک از مدل‌های پایه مانند کرف، هاسفلد و برتالانفی-ریچاردز، ویژگی یا ویژگی‌هایی به‌عنوان مشخصه (های) حاصلخیزی در نظر گرفته می‌شوند. برای مثال، برخی نویسندگان، مشخصه شیب مدل را به‌عنوان مشخصه حاصلخیزی در نظر می‌گیرند. با توجه به اختصاص داده‌های مورد بررسی به رویشگاه‌هایی با حاصلخیزی متفاوت، تعریف حاصلخیزی با مشخصه، برآورد همزمان معادلات رشد را غیرممکن می‌کند.

بدین منظور، (Bailey & Clutter 1974) روشی برای برآورد همزمان معادلات رشد پیشنهاد کردند که به روش تفاضل جبری^۴ معروف است. در این روش، مشخصه حاصلخیزی رویشگاه با تابعی به نام X یا تابع حاصلخیزی رویشگاه جایگزین می‌شود. (Bailey & Clutter 1974) تابع X یا حاصلخیزی رویشگاه را به‌طور کلی به صورت تابعی از متغیر وابسته مشاهده شده توده یا متغیر مرجع^۵ (سطح مقطع توده، Y_0) و سن توده یا سن مرجع (t_0) تعریف می‌کنند. پیش فرض این تابع آن است که مقدار متغیر وابسته در سن مشخص، کلیه اطلاعات لازم برای ارزیابی حاصلخیزی رویشگاه را در خود دارد. به دیگر سخن، توده‌هایی که در سن (t_0)، فاصله کشت و قطر برابر سطح مقطع بالاتری (Y_0) دارند، حاصلخیزی بیشتری دارند. بدین ترتیب با جایگزین کردن تابع X در مدل‌های پایه، برآورد همزمان معادلات رشد امکان‌پذیر است. این معادلات در جدول ۲ آورده شده است.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، با جایگذاری Y_0 و t_0 در مدل پایه، متغیر وابسته و سن به ترتیب به Y_1 و t_1 تغییر می‌یابند. به این ترتیب، مدل نهایی،

1. Korf
2. Hossfeld
3. Bertalanffy-Richards
4. Algebraic Differential Approach (ADA)
5. Reference parameter
6. Anamorphic
7. Polymorphic
8. Asymptote
9. Base-age invariant

جدول ۲- مدل‌های پایه و معادلات پویایی مورد استفاده

نام مدل	معادله پایه	مشخصه عرصه	مقدار X بر حسب (Y_0, t_0)	معادله پویایی
Korf	$Y = a_1 \exp(-a_2 t^{-a_3})$	$a_{2=X}$	$X_0 = -\ln\left(\frac{Y_0}{a_1}\right) t_0^{a_3}$	$Y = b_1 \left(\frac{Y_0}{b_1}\right)^{\frac{t}{t_0}} + \epsilon_{ij}$
Hossfeld	$Y = \frac{a_1}{1 + a_2 t^{-a_3}}$	$a_{2=X}$	$X_0 = t_0^{-a_3} \left(\frac{a_1}{Y_0}\right) - 1$	$Y = \frac{b_1}{\left(1 - \left(1 - \frac{b_1}{Y_0}\right) \left(\frac{t}{t_0}\right)^{b_2}\right)^{b_3}} + \epsilon_{ij}$
Bertalanffy-Richards	$Y = a_1 (1 - \exp(-a_2 t))^{a_3}$	$a_{2=X}$	$X_0 = -\ln\left(1 - \left(\frac{Y_0}{a_1}\right)^{\frac{1}{a_3}}\right) t_0$	$Y = b_1 \left(1 - \left(1 - \left(\frac{Y_0}{b_1}\right)^{\frac{1}{b_2}}\right)^{\frac{t}{t_0}}\right)^{b_3} + \epsilon_{ij}$

(a_1, a_2, a_3) : مشخصه ویژگی رویشگاه

(b_1, b_2, b_3) : مشخصه فراموضعی^۱ معادله پویایی (مشخصه‌ای که مقدار آن در تمام رویشگاه‌ها یکسان است)

Y_0 : مشخصه موضعی^۲ معادله پویایی (مشخصه‌ای که مقدار آن در رویشگاه‌های مختلف متفاوت است)

T: سن توده

شود. تابع مقداردهی اولیه بر اساس متغیرهای دارای رابطه با سطح مقطع برابر سینه توسعه یافت. به این منظور، رابطه رگرسیونی متغیرهای سن، ارتفاع و تعداد درخت در هکتار با سطح مقطع برابر سینه بررسی شد. به کمک مقدار به دست آمده از این تابع و سن توده، مقدار سطح مقطع برابر سینه را می‌توان پیش‌بینی کرد.

ارزیابی نیکویی برازش

مدل‌های بررسی شده بر اساس تحلیل‌های آماری و سنجش چشمی نمودارها مقایسه شدند. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های مختلف عبارتند از جذر میانگین مربع خطا^۱، ضریب تبیین برای رگرسیون غیرخطی^۲ و آماره نیکویی برازش آکائیک^۳. آکائیک^۴. گام بعدی ارزیابی مدل، تحلیل گرافیکی منحنی‌های برازش یافته بر روند داده‌های سطح مقطع برابر سینه درختان بود. آماره نیکویی برازش مورد استفاده در این پژوهش به شیوه زیر محاسبه شده است

در این روش فرض بر این است که از هر نقطه (Y_0, t_0) که روی منحنی رویشگاه قرار داشته باشد، می‌توان برای پیش‌بینی Y در سن t استفاده کرد. به این ترتیب، انتخاب یک نقطه ثابت روی منحنی رویشگاه برای انجام پیش‌بینی ضروری نیست و از هر نقطه روی منحنی می‌توان استفاده کرد. با کاربرد این روش مطمئن می‌شویم که نتیجه پیش‌بینی از t_0 به t_1 و سپس از t_1 به t_2 با نتیجه پیش‌بینی از t_0 به t_2 یکسان خواهد بود. در این پژوهش، از بین روش‌های مختلف برآورد مشخصه BAI، از روش متغیرهای موهومی^۳ استفاده شد. این روش را Cieszewski & Bailey در سال ۲۰۰۰ توضیح داد. در روش مذکور، متغیرهای موهومی در هر رویشگاه، یکی از مقادیر صفر یا یک را می‌پذیرند. برای مثال، مقدار متغیر موهومی I_i در رویشگاه i برابر یک و در دیگر رویشگاه‌ها صفر خواهد بود. با توجه به اینکه از روش تفاضل جبری برای برآورد سطح مقطع برابر سینه استفاده شد، باید توجه داشت که این روش نیازمند داشتن مقدار اولیه برای سطح مقطع برابر سینه در یک سن معین یا مرجع است که از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری قطر در ارتفاع برابر سینه در اندازه‌گیری معمول جنگل به دست می‌آید. اگر این اطلاعات در دسترس نباشد، باید مقدار آن با استفاده از معادله مقداردهی اولیه و با کمک دیگر متغیرهای توده برآورد

1. Global
2. Local
3. Dummy variables
4. Root Mean Square Error (RMSE)
5. R²
6. AIC

(Ryan, 1997):

آماره نیکویی برازش آکائیک

$$\text{AIC} = -2 \ln(L) + 2\lambda \quad \text{رابطه ۱}$$

L ، حداکثر راست نمایی^۱ و λ ، تعداد کل مشخصه‌های مدل است.

- اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل‌های انتخاب شده برای پیش‌بینی سطح مقطع برابر سینه با ۳۰ درصد داده‌های حاصل از اندازه‌گیری انجام گرفت. این داده‌ها قبل از شروع پژوهش برای اعتبارسنجی کنار گذاشته شدند و در روند برازش مدل‌های رشد شرکت نداشتند (داده‌های اعتبارسنجی). پس از برازش معادلات رشد و انتخاب بهترین معادلات (کرف)، مقدار سطح مقطع توده برای تمامی داده‌های اعتبارسنجی شده با استفاده از معادلات برازش داده شده، برآورد شد. به این ترتیب، مقدار مشاهده شده و برآورد شده سطح مقطع برای داده‌های اعتبارسنجی در قالب جدولی تهیه شد. بر این اساس، آماره جذر میانگین مربع خطای داده‌های اعتبارسنجی برآورد و با آماره هم‌تای محاسبه شده با استفاده از داده‌های پژوهش مقایسه آماری شد. در صورتی که آماره جذر میانگین مربع خطای داده‌ها در دو مجموعه داده‌ها تفاوت معناداری نداشته باشد، معادلات برازش شده معتبرند.

نتایج

- معادلات رشد سطح مقطع برابر سینه

در بین معادلات برازش یافته، مدل‌های استخراج شده به روش تفاضل جبری با ثابت قرار دادن مجانب افقی نتایج بهتری را نسبت به مدل‌هایی که مجانب افقی در آنها ثابت نشده بود نشان دادند. این مدل‌ها از ضریب تعیین (R^2) بالاتر و آماره نیکویی برازش کمتری برخوردارند (جدول ۳). به علاوه، از بین مدل‌های مذکور، مدل کرف با ضریب تعیین بالاتر و جذر میانگین مربع خطا و آماره نیکویی برازش کمتر، نتایج

بهتری را نشان می‌دهد. بنابراین، بهترین مدل برای پیش‌بینی سطح مقطع برابر سینه صنوبر دلتوئیدس به صورت زیر است.

$$G_2 = 80 * \left(\left(\frac{G_1}{80} \right)^{0.62} \right)^{t_2} \quad \text{رابطه ۲}$$

به طوری که: G_1 و t_1 سطح مقطع برابر سینه اولیه (بر حسب مترمربع در هکتار) در سن t_1 (بر حسب سال)

G_2 سطح مقطع برابر سینه پیش‌بینی شده (بر حسب مترمربع در هکتار) در سن t_2 (بر حسب سال)

تابع مقداردهی اولیه سطح مقطع برابر سینه نیز پس از بررسی رابطه دیگر متغیرهای توده با سطح مقطع برابر سینه بر اساس تعداد درختان در هکتار، سن و ارتفاع متوسط توده به صورت زیر توسعه یافت:

$$G = -24.35 + 0.01884N + 1.907t + 1.075H \quad \text{رابطه ۳}$$

G سطح مقطع برابر سینه (بر حسب مترمربع در هکتار)، N تعداد درختان در هکتار، t سن (بر حسب سال) و H ارتفاع متوسط توده (بر حسب متر) است.

- ارزیابی مدل رشد سطح مقطع برابر سینه

مقایسه مدل‌های مختلف بر اساس تحلیل‌های عددی و مقایسه چشمی انجام گرفت. نتایج برآورد مشخصه‌ها و آماره‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

نمودار سطح مقطع برابر سینه در برابر سن در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است.

بررسی بصری منحنی‌ها نشان می‌دهد که منحنی‌های حاصل از برازش این معادلات در سن بالا به هم نزدیک می‌شوند یا تلاقی می‌کنند. علت این است که مدل‌های سیگموئید نسبت به مقدار مشخصه مجانب افقی حساسند.

از این رو به ویژه زمانی که داده‌های کمی در محدوده مجانب وجود داشته باشد، برآورد درست مشخصه امکان پذیر نخواهد بود. بنابراین با توجه به اینکه در منطقه مورد پژوهش، درختان صنوبر در

منطقه برای بررسی رشد سطح مقطع برابر سینه در سنین بالا کافی نیست.

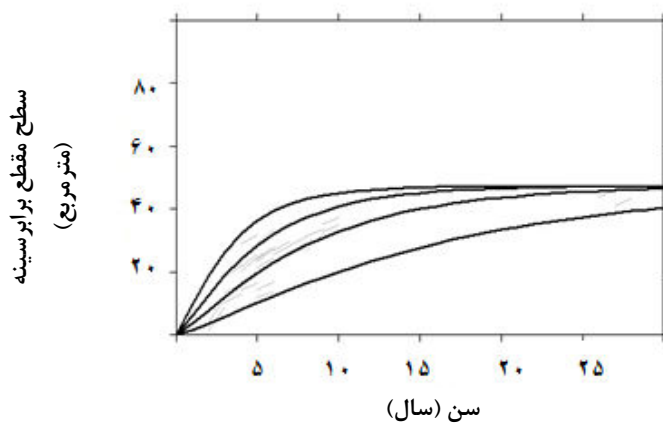
سنین کم (کمتر از ده سال) قطع می‌شوند و به علاوه تنها در مناطق محدودی (مانند اراضی شرکت سهامی شفارود) صنوبرکاری‌های مسن وجود دارد، داده‌های

جدول ۳- ضرایب رگرسیون خطی تابع مقداردهی اولیه

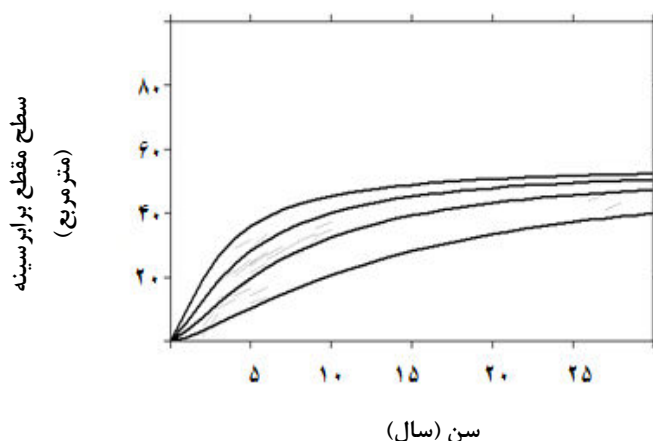
متغیر	ضریب	اشتباه معیار	Pr(> t)
تعداد درخت در هکتار	۰/۰۱۸	۰/۰۰۲	۳/۵۳ e-۰۸ ***
سن	۱/۹۰۷	۰/۴۷	۰/۰۰۰۴۶۶ ***
متوسط ارتفاع توده	۱/۰۷۴	۰/۱۴	۶/۳ e-۰۸ ***

جدول ۴- نتایج برازش معادلات و آماره‌های مقایسه آنها

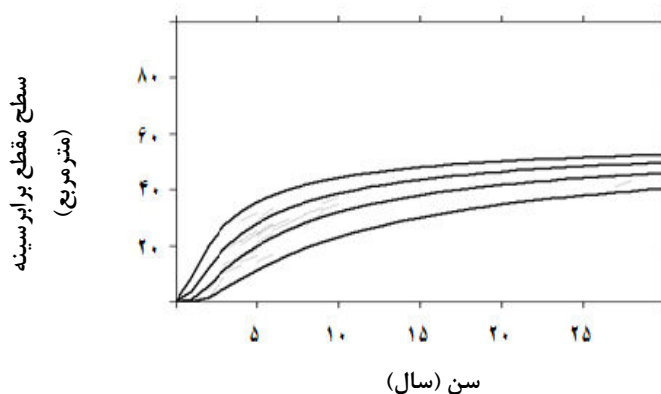
مدل	مشخصه‌ها		برازش		AIC
	مشخصه	برآورد	R2	جذر میانگین مربع خطا	
کرف	b1	۵۸/۸۴	۰/۹۷۱۸	۱/۴۹	۱۰۸/۰۸
	b3	۰/۸۳	۰/۰۰۰۳۳۸ ***	۰/۰۰۰۳۵۰ ***	
هاسفلد	b1	۴۸/۵۴	۰/۹۶۵۷	۱/۷۳	۱۱۶/۴۲
	b3	۱/۳۸	۰/۰۰۰۹۹۹ ***	۰/۰۰۰۱۲۲ ***	
برتالانفی-ریچاردز	b1	۴۷/۲۲	۰/۹۶۵۲	۱/۷۶	۱۱۷/۲۸
	b3	۱/۲۸	۵e-۰۵ ***	۰/۰۰۱۰۹ **	
نتایج برازش معادلات با ثابت قرار دادن مجانب افقی					
کرف	b3	۰/۶۳	۰/۹۷۲۵	۱/۵۲	۱۰۶/۹۹
هاسفلد	b3	۱/۱۰	۰/۹۶۶۷	۱/۷۶	۱۱۵/۲۹
برتالانفی-ریچاردز	b3	۰/۹۰	۱/۱e-۰۷ ***	۱/۸۱	۱۱۶/۸۷



شکل ۱- فرم تفاضل جبری مدل برتالانفی-ریچاردز برازش داده شده برای داده‌های سطح مقطع برابر سینه



شکل ۲- فرم تفاضل جبری مدل هاسفلد برازش داده شده برای داده‌های سطح مقطع برابر سینه



شکل ۳- فرم تفاضل جبری مدل کرف برازش داده شده برای داده‌های سطح مقطع برابر سینه

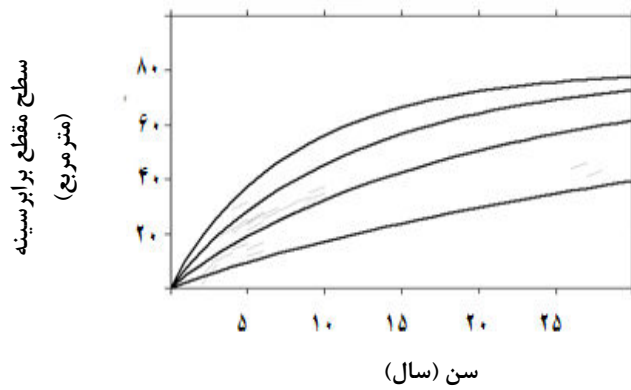
درخت در هکتار با سطح مقطع برابر سینه به صورت یک رابطه، خطی برآورد شد. ضریب تعیین حاصل از برازش برابر $0/95$ و جذر میانگین مربع خطا $1/58$ مترمربع در هکتار محاسبه شد.

- اعتبارسنجی معادلات رشد سطح مقطع
نتایج نشان می‌دهد مدل برازش یافته برای داده‌های اعتبارسنجی، جذر میانگین خطایی برابر $0/64$ مترمربع در هکتار دارد. مقایسه جذر میانگین مربع خطای داده‌های اعتبارسنجی و داده‌های پژوهش با استفاده از آزمون t-student در سطح ۵ درصد تفاوت معناداری نشان نداد. به این ترتیب، معادلات برآورده شده رشد سطح مقطع معتبرند.

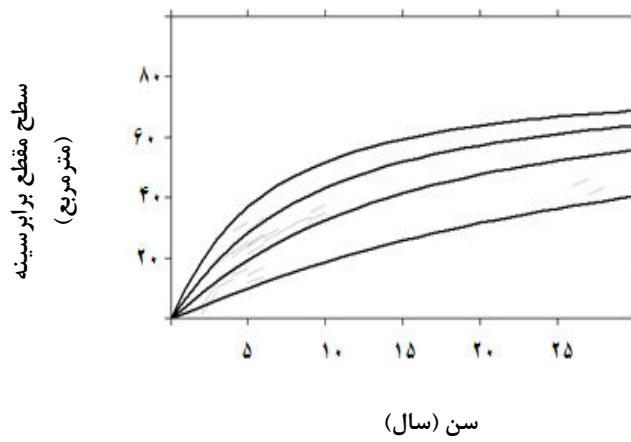
به این منظور، مجانب افقی منحنی‌ها (مشخصه b1) ثابت در نظر گرفته شد. به علاوه، چون مجانب، حداکثر مقدار مشخصه مورد بررسی (حداکثر رشد سطح مقطع برابر سینه) را نشان می‌دهد، با استفاده از مرور منابع حداکثر آن در مدل لحاظ شد (Meadows et al., 1996). نتایج در شکل‌های ۴ تا ۶ نمایش داده شده است.

همان‌طور که در نمودارها ملاحظه می‌شود، مدل کرف از لحاظ بصری نیز بهتر از دو مدل دیگر پراکنش داده‌ها را توضیح می‌دهد.

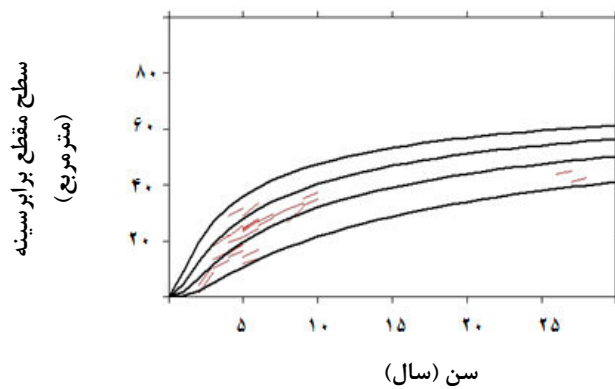
- مدل مقداره‌ی اولیه
بهترین رابطه بین متغیرهای سن، ارتفاع و تعداد



شکل ۴- فرم تفاضل جبری مدل برتالانی-ریچاردز با مجانب افقی برابر ۸۰
برازش داده شده برای داده‌های سطح مقطع برابر سینه



شکل ۵- فرم تفاضل جبری مدل هاسفلد با مجانب افقی برابر ۸۰
برازش داده شده برای داده‌های سطح مقطع برابر سینه



شکل ۶- فرم تفاضل جبری مدل کرف با مجانب افقی برابر ۸۰
برازش داده شده برای داده‌های سطح مقطع برابر سینه

بحث

برخی منابع مانند (Barroi et al., 2008)، مدل هاسفلد، بهترین مدل برای پیش‌بینی رشد سطح مقطع برابرسینه گونه صنوبر اورامریکن معرفی شده است. مرور منابع نشان می‌دهد که رفتار رویشی، تابع نوع گونه، اقلیم و شرایط اکولوژیکی و فیزیوگرافی رویشگاه است. علاوه بر این، اختلاف این مدل‌ها چه از نظر آماره‌های برازش و چه از نظر تفسیر چشمی، به‌طور معمول ناچیز است. به این ترتیب، با تغییر نوع گونه، اقلیم و رویشگاه و در نتیجه تغییر رفتار رویشی، تغییر نوع مدل دور از انتظار نیست. با توجه به اینکه استفاده از روش تفاضل جبری برای استخراج معادلات پویایی در سطح اطمینان ۹۵ درصد پیش‌بینی رضایت بخشی را نشان داد (توضیح ۹۷ درصد از واریانس داده‌ها) و نتایج اعتبارسنجی نیز اعتبار معادلات برازش‌یافته را تأیید کرد، از این معادلات می‌توان برای پیش‌بینی رشد سطح مقطع صنوبر دلتوئیدس در شرایط مورد بررسی استفاده کرد. علاوه بر این، این معادلات را می‌توان برای شبیه‌سازی و محاسبات فنی (مانند محاسبه حجم توده) و اقتصادی (مانند محاسبه ارزش مورد انتظار زمین) صنوبر کاری‌های منطقه به‌کار گرفت. با این حال، معادلات برازش‌یافته به روش تفاضل جبری، اولین تجربه این روش مدلسازی در کشور محسوب می‌شوند و باید به‌عنوان شروعی برای مدل‌های دقیق‌تر در نظر گرفته شوند. با توجه به اهمیت موضوع و نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود معادلات پویایی استخراج‌شده به روش تفاضل جبری برای بررسی رشد سایر گونه‌های صنوبر، سایر کلن‌ها و نیز دیگر گونه‌های تندرشد مانند اکالیپتوس، بید و پالونیا برازش یابند. استفاده و مقایسه معادلات پویایی درخت با معادلات رشد پتانسیل کاهنده نیز از دیگر زمینه‌هایی است که برای گونه‌های جنگلی شمال کشور می‌توان آن‌ها را به‌کار گرفت. ایجاد و توسعه قطعات نمونه دایمی در ایستگاه‌های تحقیقاتی، از دیگر راهکارهایی است که برای بهبود دقت برآورد معادلات و نیز اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها کاربرد دارند.

در این پژوهش برای برآورد معادلات رشد سطح مقطع صنوبر دلتوئیدس از روش تفاضل جبری (Bailey & Clutter, 1974) بهره گرفته شد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد (جدول ۳)، با توجه به کمبود داده‌ها در سنین بالا، بهترین برآورد معادلات با ثابت قرار دادن مجانب افقی (که معادل حداکثر رشد سطح مقطع برابرسینه گونه مذکور در نظر گرفته شد) به‌دست آمد. این روش هنگام کمبود داده‌ها، برآورد دقیق‌تر معادلات را امکان‌پذیر می‌کند. به این ترتیب، در شرایط ایران، به‌ویژه در استان گیلان که عمده صنوبر کاری‌ها پیش از ده سالگی قطع می‌شوند، استفاده از این روش توصیه می‌شود. آماره‌های محاسبه‌شده برای مقایسه مدل‌ها، در مدل‌های برتالانفی-ریچاردز و هاسفلد به هم نزدیکند، در حالی که روند حرکت منحنی‌ها نشان می‌دهد منحنی حاصل از برازش مدل برتالانفی-ریچاردز در سن بالاتری به سطح مقطع برابرسینه ۸۰ مترمربع خواهد رسید. بدین ترتیب، تفسیر چشمی منحنی‌های رشد برای ارزیابی و انتخاب مدل‌های پویایی ضروری به‌نظر می‌رسد. این نتیجه با یافته‌های (Barrio et al., 2008) مبنی بر اهمیت تفسیر چشمی منحنی‌های رشد همخوانی دارد. بر اساس نتایج برازش مدل‌ها، مدل کرف ضریب تعیین بالاتری نسبت به مدل‌های برتالانفی-ریچاردز و هاسفلد دارد. همچنین منحنی‌های کرف از لحاظ بصری تطابق بهتری با داده‌ها نشان می‌دهند. در برخی پژوهش‌ها روی رشد سطح مقطع برابرسینه نیز مدل کرف بهتر از دیگر مدل‌ها این رشد را توضیح داده است. برای مثال، (Castedo et al., 2007) در تهیه مدل پویایی رشد کاج رادیاتا، معادله رشد کرف برای رشد سطح مقطع برابرسینه را بهترین مدل خواندند. (Dieguez et al., 2006) نیز در پژوهش دیگری روی کاج جنگلی به نتیجه مشابهی دست یافتند. محققان دیگری مانند (Heshmatol Vaezin, 2006) نیز استفاده از این مدل را برای پیش‌بینی رشد قطری گونه راش اروپایی پیشنهاد کردند. با این حال، در

منابع

- Bailey, R.L. & J.L. Clutter, 1974. Base-age invariant polymorphic site curves, *Forest Science*, 20: 155–159
- Barrio-Anta, M., M. Sixto-Blanco, I. Can˜ellas-Rey & F. Castedo-Dorado, 2008. Dynamic growth model for I-214 poplar plantations in the northern and central plateaux in Spain, *Forest Ecology and Management*, 255 :1167–1178
- Bertalanffy, L.V., 1949. Problems of organic growth, *Nature (London)*, 163: 156–158.
- Bertalanffy, L.V. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth, *Quarterly Review of Biology*, 32(3): 217–231.
- Birler, A., 1985. A study of yields from I-214 poplar plantations, Poplar and fast growing exotic forest trees research institute, Izmit, Turkey, 103 pp.
- Cieszewski, C.J. & R.L., Bailey, 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic equations with polymorphism and variable asymptotes, *Forest Science*, 46: 116–126.
- Cieszewski C.J., 2004. GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from Richards, Weibull, and other exponential functions, University of Georgia PMRC TR 2004–5.
- Castedo-Dorado, F., U., Dieguez-Aranda & J., Alvarez-Gonzalez, 2007. A growth model for *Pinus radiata* D.don stands in north western Spain, *Forest Science*, 64(4): 453–465.
- Dieguez Aranda, U., Castedo-Dorado, F., J. Alvarez-Gonzalez & A. Rojo.2006. Dynamic growth model for scots pine (*Pinus sylvestris* L) plantations in Galicia north western Spain, *Ecological Modelling*, 191: 225–242
- Heshmatol Vaezin, S.M., 2006. Economic models of management for regular, irregular or in transition stands. Illustrations in the case of beech forest in the North-East of France. PhD Thesis, AgroParistech. The French institute of forestry. Agricultural and Environmental Engendering, ENGREF, 300 pp.
- Hossfeld, J.W., 1822. *Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten*, 310 pp.(in German)
- بابا خانجانی، شیراز، رضوان قدرتخواه و ارسالان همتی، ۱۳۸۷. بررسی تاثیر قلمه و نوع خاک در موفقیت ازدیاد سرخدار، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۶(۲): ۱۷۵–۱۶۹.
- بزرگمهر، علی، علیرضا مدیررحمتی، رفعت اله قاسمی و خداداد عابدی، ۱۳۸۱. جمع آوری و بررسی ارقام بومی و غیربومی صنوبر در شمال استان خراسان، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۰(۲): ۱۵۸–۱۲۵.
- بهرام آبادی، زهرا، ۱۳۹۰. تعیین سن بهره برداری بهینه صنوبر دلتوئیدس در استان گیلان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه گیلان، ۶۹ ص.
- حشمت الواعظین، سید مهدی، ۱۳۸۹. جزوه درسی اقتصاد جنگل. دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱۰۰ ص.
- سیاهی پور بالاده، ذوقعلی و بیت اله امان زاده، ۱۳۸۶. بررسی رویش دارتالاب در اراضی ماندابی غرب گیلان. مجله پژوهش و سازندگی، ۷۶: ۱۰۴–۹۸.
- صالحی، علی، مریم ملکی، محمود شعبانپور و رضا بصیری، ۱۳۹۱. تاثیر خصوصیات فیزیکی خاک و سطح آب زیرزمینی بر وضعیت کمی و کیفی صنوبر کاری‌های غرب استان گیلان. فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۰(۱): ۴۹–۳۸.
- قرآنی، محمود، ۱۳۶۷. بررسی سازگاری و میزان تولید ارقام مختلف صنوبر در اراضی شرکت جنگل شفارود گیلان. فصلنامه جنگل، ۱۰: ۶۰–۵۱.
- گروه تحقیقات صنوبر و درختان سریع‌الرشد، ۱۳۸۷. برنامه راهبردی زراعت چوب صنوبر، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، ۳۵ ص.
- Amaro, A., D.D. Reed, I. Themido, & M.Tomé, 1997. Stand growth modelling for first rotation *Eucalyptus globulus* Labill.in Portugal. In empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation conference, 21-27 September 1997, Oeiras, Portugal, 99–110.

Kitikido, K., M., Kaymakis, & M., Milios, 2012. Site index curves for young *populous tremula* stands on Athos Peninsula, Turkish *Journal of Agriculture & Forestry*, 36: 55–63.

Lundqvist, B., 1957. On the height growth in cultivated stands of pine and spruce in Northern Sweden, *Meddelanden Fran Statens Skogforsknings Institut*, 47: 1–64.

McDill, M.E. & R.L. Amateis, 1992. Measuring forest site quality using the parameters of a dimensionally compatible height growth function, *Forest Science*, 38(2): 409–429.

Meadows, J., S. Nowacki & J. Gregory, 1996. An old-growth definition for eastern riverfront forests. General Technical Report SRS-4. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 7 pp.

Ryan, T.P., 1997. Modern regression methods. John Wiley & Sons Inc., New York, 279 pp.

Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use, *Journal of Experimental Botany*, 10: 290–300.

Basal area growth equations for poplar (*Populus deltoides*) in Somee Sara, Guilan province, Iran.

M. Hajjarian^{1*}, S.M. Heshmatol Vaezin², U. Dieguez-Aranda³, M. Namiranian⁴, and V. Etemad²

¹PhD Student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

²Assistant Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

³Associate Prof., University of Santiago de Compostela, Spain

⁴Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

(Received: 22 October 2012; Accepted: 6 February 2013)

Abstract

The basal area growth equations are directly linked to economic variables such as stand volume. Estimating the stand basal area is essential for economic computation and yield estimation. The main objective of this study is to estimate the basal area growth equations for economic studies. Tree's diameter at breast height and height were measured in plantations of *Populus deltoides* Clone No.6955 for two successive years. Due to lack of information on poplar growth at high age, two plantations in Gisoom and Pilambara (with age 26 and 27 years) were also inventoried. Three popular dynamic equations (Korf, Hossfeld and Bertalanffy-Richards) were used for data analysis. Graphical analysis and different statistics (RMSE, R^2 and AIC) were used to compare models and select the most appropriate model. Then, the basal area growth equations were validated. For this purpose, 30 percent of collected data were set aside and used to estimate RMSE. The Korf growth equations have been successfully estimated with $R^2 = 0.97$ and RMSE = 1.52 square meter per hectare. The result of validation showed that there is no statistical difference between two set of data in terms of RMSE.

Keywords: Algebraic difference approach, Basal area growth equations, Korf model, *Populus deltoids*.