



تعیین فاصله کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت اقتصادی کلن‌های پرمحصول تبریزی (*Populus nigra L.*) در استان آذربایجان غربی

سید مهدی حشمت‌الواعظین^{۱*}، بختیار خضریان^۲، منوچهر نمیرانیان^۳، مرضیه حجاریان^۴،
مصطفی جنت‌بابایی^۵، فرهاد شیخ‌کانلوی میلان^۲

^۱ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

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

^۴ استادیار، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۵ کارشناس جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵)

چکیده

این پژوهش با هدف تعیین فاصله کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت اقتصادی کلن‌های پرمحصول تبریزی در استان آذربایجان غربی انجام گرفت. به این منظور، از یک سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری به نام مدل زیستی-اقتصادی بهره گرفته شد. این مدل، پویایی متغیرهای زیستی و اقتصادی توده را در زمان شبیه‌سازی می‌کند. شهرستان‌های ارومیه و نقده به دلیل فراوانی کاشت کلن‌های پرمحصول، انتخاب و صنوبرکاران و خریداران چوب سرپا در این شهرستان‌ها، جامعه آماری در نظر گرفته شد. داده‌های زیستی (قطر، ارتفاع و جرم حجمی‌تر) و اقتصادی (قیمت چوب سرپا و هزینه‌ها) به ترتیب به روش میدانی (سرشماری و نمونه‌گیری تصادفی-منظم) و پیمایشی (مصاحبه نیمه ساختاریافته) جمع‌آوری شد. برای برآورد زیرمدل‌های زیستی (مانند رشد و محصول) و اقتصادی (مانند هزینه کاشت) از تحلیل رگرسیون چندمتغیره و تخمین‌زن حداقل مربعات استفاده شد. مدل زیستی-اقتصادی از تلفیق زیرمدل‌ها در برنامه صفحه گسترده اکسل ساخته شد. در نهایت، ارزش مورد انتظار زمین (معیار فاستمن) برای گستره وسیعی از فواصل کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت شبیه‌سازی شد. یافته‌ها نشان داد که فاصله کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت اقتصادی در حاصلخیزی متوسط، مربعی، $2/5 \times 2/5$ متر و ۱۲ سال است. با این حال، استانداردهای رایج در منطقه، مستطیلی، 3×1 متر و ۸ سال است. اجرای استانداردهای اقتصادی کاشت و برداشت می‌تواند حجم تجاری چوب تولیدشده، قطر درخت متوسط و ارزش مورد انتظار زمین در هکتار را به ترتیب ۵۶، ۴۶ و ۱۴۳ درصد افزایش دهد. پژوهش‌های بیشتری برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی پاسخ رویشی این توده‌ها به فعالیت‌های مدیریتی (مانند شخم، کوددهی، آبیاری، تنک‌سازی و کنترل علف هرز) لازم است.

واژه‌های کلیدی: ارزش مورد انتظار زمین، تولید حجم تجاری، فعالیت‌های مدیریتی توده، قطر درخت متوسط، مدل زیستی-اقتصادی.

مقدمه

توسعه متوازن زراعت چوب با شرایط اکولوژیک هر منطقه به‌ویژه در زمین‌های رهاشده و کم‌بازده با استفاده از منابع آبی متعارف و غیرمتعارف از بهترین راه حل‌های پایدار برای تأمین نیاز چوبی و کاهش فشار بر منابع جنگلی کشور محسوب می‌شود (Asadi & Bagheri, 1999). با توقف بهره‌برداری از جنگل‌های شمال کشور در چارچوب ماده ۳۸ قانون برنامه ششم، زراعت چوب بیش از هر زمان دیگر اهمیت یافته است. براساس اهداف کمی این برنامه (جدول ۸ برنامه)، سطح جنگل‌های دست‌کاشت باید به‌طور میانگین سالانه ۱۵ هزار هکتار افزایش یابد. در بین گونه‌های مناسب زراعت چوب، صنوبر به‌دلیل داشتن بیش از چند دهه پیشینه پژوهشی، سرعت رشد زیاد، آشنایی کشاورزان و وجود رویشگاه‌های مناسب از گونه‌های کم‌رقیب برای زراعت چوب در خارج از جنگل است. (Alizadeh Anaraki, 2012). کمبود اطلاعات درباره مدیریت بهینه (استانداردهای بهینه کاشت، داشت و برداشت) را دومین مشکل اصلی صنوبرکاران پس از مسائل اقتصادی معرفی می‌کند. از این‌رو، مدیریت اقتصادی کلن‌های پرمحصول صنوبر در شرایط مختلف (مانند حاصلخیزی، قیمت زمین) و ترویج آن در مناطق مناسب به افزایش سودآوری و در نتیجه توسعه صنوبرکاری کمک بزرگی خواهد کرد (Hesami & Asadi, 2016). مدیریت اقتصادی جنگل‌های دست‌کاشت همه فعالیت‌های مدیریتی کاشت، داشت و برداشت (مانند کاشت، شخم، کوددهی، آبیاری، کنترل علف هرز، تنک‌سازی و برداشت) را در بر می‌گیرد. با این حال، شمار زیادی از پژوهش‌های داخلی و خارجی تنها به تعیین فاصله کاشت یا سن^۱ اقتصادی برداشت صنوبر پرداخته‌اند (Olson & Lundgren, 1978; Engindeniz, 2003; Keča et al., 2012; Mohammadi Limaei et al., 2013; Adeli et al., 2016; Keča, 2017)؛ اما تعیین

همزمان فاصله کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت اقتصادی برای تولید یک یا چند محصول مشخص (محصول هدف) کمتر بررسی شده است (Chang, 1983; Engindeniz, 2003; Amateis & Burkhardt, 2012; Halbritter & Deegen, 2015). در حقیقت، سن بهینه برداشت به فاصله کاشت (Engindeniz, 2003; Amateis & Burkhardt, 2012;) وابسته است و فاصله کاشت نیز تابعی از نوع محصول^۲ یا محصول‌های این‌رو، بهینه‌سازی فاصله کاشت، سن برداشت و دیگر فعالیت‌های مدیریتی (مانند کوددهی) توده باید برای تولید یک یا چند محصول مشخص و به‌صورت همزمان صورت‌پذیرد (Chang, 1983; Amateis & Burkhardt, 2012; Halbritter & Deegen, 2015). هدف این پژوهش تعیین همزمان فاصله کاشت، الگوی کاشت (فاصله بین درختان و بین ردیف‌ها) و سن برداشت اقتصادی کلن‌های پرمحصول تبریزی برای تولید چوب خمیری و بینه‌های کم‌قطر چوب‌بری یا ره‌کشی^۴ است.

مواد و روش‌ها

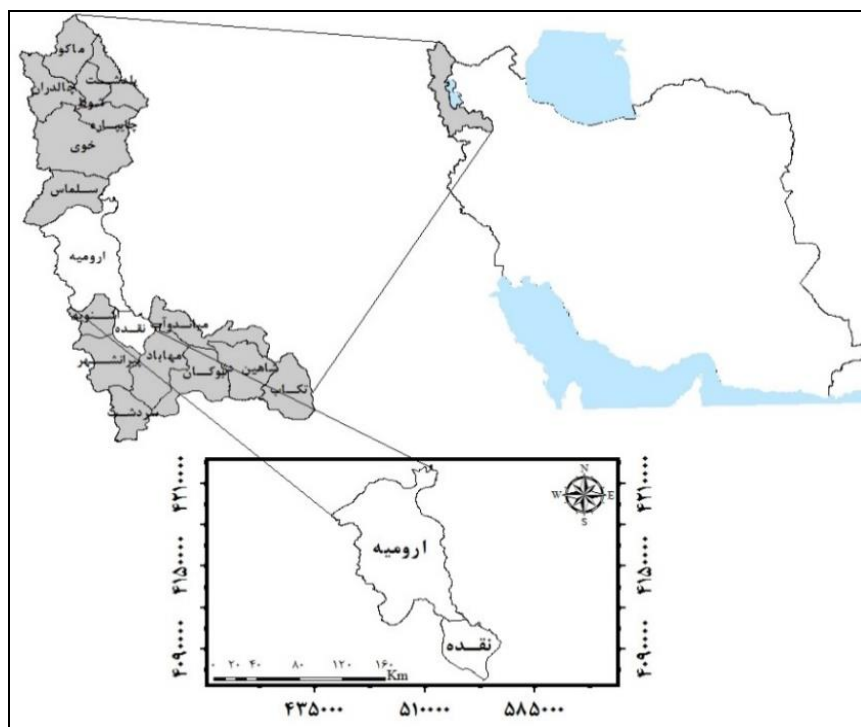
منطقه پژوهش

کلن‌های پرمحصول کشور ترکیه (P.n ۶۲/۱۵۴، P.n ۵۶/۷۵ و P.n ۶۲/۱۷۲) پس از یک دوره آزمایشی ده‌ساله، از ابتدای دهه ۷۰ خورشیدی به‌طور وسیعی در استان آذربایجان غربی ترویج و کاشت شده است

1. Rotation period, rotation length or rotation age.
2. Dedicated (target one product) or semi-dedicated (targets several products) short rotation forestry and coppice.
۳. برای تولید چوب خمیری می‌توان از فاصله کاشت ۲×۲ متر و سن برداشت بهینه ۸ سال بهره‌گرفت درحالی که برای تولید چوب روکشی فاصله کاشت ۷×۷ متر و سن برداشت بهینه ۲۰ سال متداول است (Amateis & Burkhardt, 2012).
4. Pulpwood and small sawlog (dbh>= 13-16 cm) for fruit box.

کلن‌های پرمحصول عمدتاً در شهرستان‌های ارومیه و نقده به صورت مزارع کوچک کاشت شده است (شکل ۱). این سه کلن برتر عملاً به صورت مخلوط کشت می‌شوند و شناسایی و تفکیک کلن‌ها در این پژوهش ممکن نبود.

(Salari et al., 2008; Ghasemi et al., 2012). این کلن‌ها تاج‌بسته‌اند^۱ و براساس اندازه‌گیری‌های صورت‌پذیرفته در فاصله کاشت ۴×۴ و در یک دوره ده‌ساله، میانگین تولید سالانه‌ای بین ۲۰/۳۲ تا ۲۷/۶ متر مکعب در هکتار دارند (Salari et al., 2008).



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه پژوهش

شیوه اجرای پژوهش

صنوبرکاران و خریداران چوب سرپا در شهرستان‌های ارومیه و نقده جامعه آماری این پژوهش را تشکیل می‌دهند. ویژگی‌های توصیفی و پراکنش مکانی صنوبرکاری‌های بررسی شده در جدول ۱ ارائه شده است.

روش تحلیل

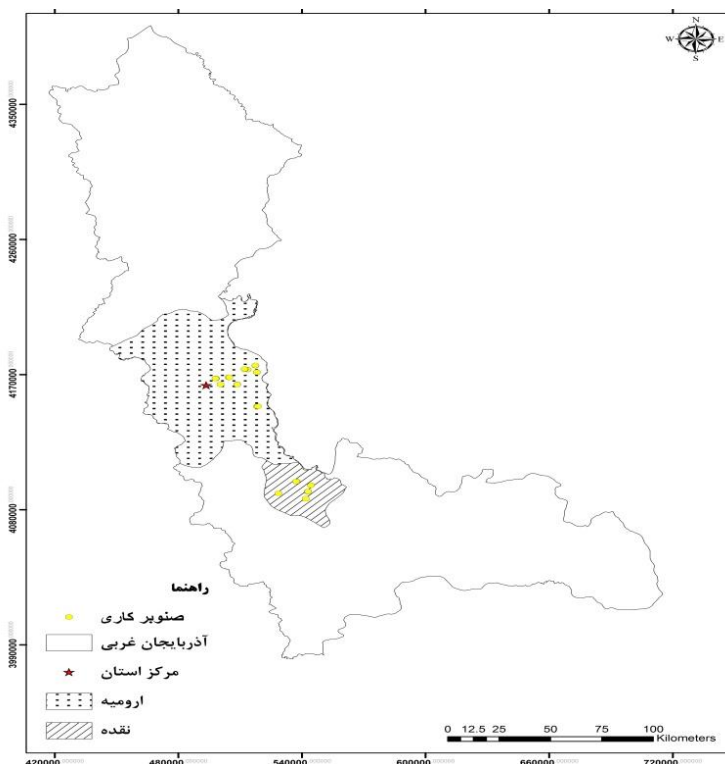
در این مقاله از یک سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری به نام مدل زیستی-اقتصادی بهره گرفته شد. این مدل از تلفیق زیرمدل‌های زیستی و اقتصادی توده‌های

به‌رغم تمرکز صنوبرکاری‌های استان در این دو شهرستان، پس از بررسی اطلاعات موجود در اداره‌های منابع طبیعی استان و شهرستان مشخص شد که اطلاعات مستندی از پراکنش و مساحت این مزارع در دست نیست. از این‌رو، صنوبرکاری‌های منطقه پژوهش به کمک پیمانکاران چوب ارومیه و پیمایش و مشاهده مستقیم یافت شد. به این ترتیب، در مجموع ۳۰ صنوبرکاری به مساحت ۴۱ هکتار در قطعات نیم تا هشت هکتاری در سطح ارومیه و نقده شناسایی شد. سپس محدوده صنوبرکاری‌های شناسایی شده با استفاده از دستگاه GPS برداشت شد. مساحت و نقشه صنوبرکاری‌ها به کمک نرم‌افزار Arc GIS نسخه ۹/۳ محاسبه و تولید شد (شکل ۲).

1. Closed-crown.

اقتصادی برای تعیین فاصله کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت اقتصادی بهره گرفته شد. روندنمای پژوهش در شکل ۳ ارائه شده است.

دست کاشت صنوبر شکل می‌گیرد و پویایی متغیرهای زیستی و اقتصادی توده را در زمان شبیه‌سازی می‌کند (Haight (1990); Heshmatol Vaezin et al., 2009; Ryan et al., 2016). به این ترتیب، از مدل زیستی-



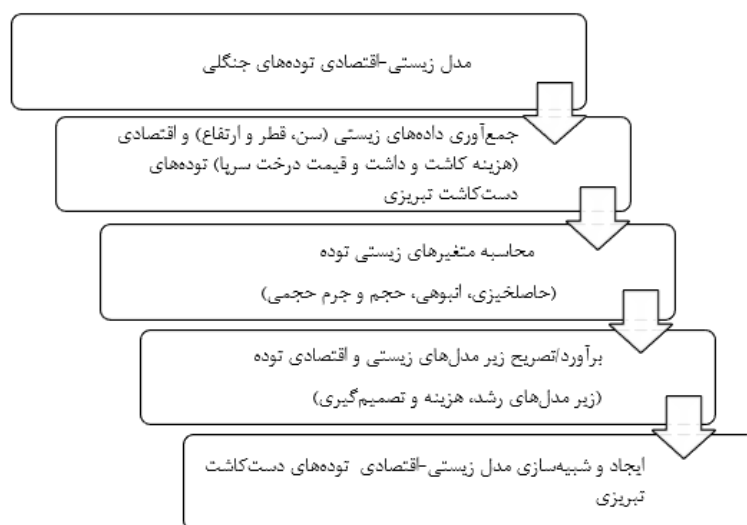
شکل ۲- نقشه پراکنش صنوبرکاری‌های بررسی‌شده در شهرستان‌های ارومیه و نقده

جدول ۱- ویژگی‌های توصیفی و مکانی صنوبرکاری‌های بررسی‌شده

مزرعه	شغل اصلی زارع	سطح سواد	سن زارع	مساحت توده (ha)	سن توده	فاصله کاشت (m)	آدرس
۱	کارمند بازنشسته	لیسانس	۶۰	۳	۷	۱/۵×۳	نقده-روستای بیگم‌قلعه
۲	کارمند کارخانه قند	لیسانس	۳۵	۱	۸	۲×۳	نقده-روستای راه‌دانه
۳	کارمند کارخانه قند	لیسانس	۳۵	۰/۵	۸	۱×۳	نقده-روستای راه‌دانه
۴	کارمند کارخانه قند	لیسانس	۳۵	۰/۵	۱۰	۱×۳	نقده-روستای راه‌دانه
۵	راننده تاکسی	سیکل	۵۲	۳/۷	۵	۱/۵×۳	نقده- روستای گورال‌آباد قزاق
۶	بنگاه ماشین	دیپلم	۴۶	۸	۸	۱/۵×۳	نقده- روستای بارانی عجم
۷	صافکار	ابتدایی	۵۵	۲	۱۰	۱×۳	ارومیه- روستای نظرآباد افتخار
۸	صافکار	ابتدایی	۵۵	۱	۷	۰/۸×۱×۳	ارومیه- روستای نظرآباد افتخار
۹	کشاورز	ابتدایی	۴۰	۰/۵	۹	۱/۵×۳	ارومیه-روستای صفرابهی
۱۰	کشاورز	ابتدایی	۴۰	۰/۵	۷	۱/۵×۳	ارومیه-روستای صفرابهی

ادامه جدول ۱

مزرعه	شغل اصلی زارع	سطح سواد	سن زارع	مساحت توده (ha)	سن توده	فاصله کاشت (m)	آدرس
۱۱	شغل آزاد	سیکل	۶۵	۰/۵	۴	۱/۵×۳	ارومیه- روستای خداوردی خان
۱۲	شغل آزاد	سیکل	۶۵	۴	۷	۱×۳	ارومیه- روستای موش آباد
۱۳	شغل آزاد	سیکل	۶۵	۱/۵	۸	۱/۵×۳	ارومیه- روستای موش آباد
۱۴	دامدار	بی سواد	۷۰	۱/۳	۶	۱/۶×۱	ارومیه- روستای چمکی
۱۵	شغل آزاد	ابتدایی	۶۷	۱/۷	۷	۱/۵×۳	ارومیه- روستای چمکی
۱۶	شغل آزاد	ابتدایی	۶۷	۰/۵	۷	۱×۱	ارومیه- روستای چمکی
۱۷	شغل آزاد	ابتدایی	۷۶	۱/۵	۷	۰/۷۵×۳	ارومیه- روستای چمکی
۱۸	مؤسسه دولتی	-	-	۰/۵	۶	۱/۳×۱	ارومیه- (کشتارگاه طیور)
۱۹	مؤسسه دولتی	-	-	۰/۵	۶	۱/۸×۱/۳	ارومیه- (کشتارگاه طیور)
۲۰	مؤسسه دولتی	-	-	۰/۵	۷	۱/۵×۳	ارومیه- دانشگاه ارومیه (نازلو)
۲۱	مؤسسه دولتی	-	-	۱/۳	۵	۱/۷×۱	ارومیه- دانشگاه ارومیه (نازلو)
۲۲	مکانیک	دیپلم	۳۳	۰/۴	۶	۱/۷×۲/۵	ارومیه- روستای شور کند
۲۳	مکانیک	دیپلم	۳۳	۰/۴	۳	۱/۴۵×۲/۵	ارومیه- روستای شور کند
۲۴	بازنشسته	دیپلم	۵۵	۲/۳	۱۲	۱×۲	ارومیه- روستای بدلیو
۲۵	مؤسسه دولتی	-	-	۰/۵	۷	۱×۳	ارومیه- دانشگاه ارومیه (نازلو)
۲۶	شغل آزاد	سیکل	۶۵	۱	۷	۱×۳	ارومیه- روستای موش آباد
۲۷	بنگاه ماشین	دیپلم	۴۸	۱	۸	۱/۵×۳	نقده- روستای بارانی عجم
۲۷	شغل آزاد	ابتدایی	۶۷	۱	۷	۰/۹×۳	ارومیه- روستای چمکی
۲۹	نهالستان دار	سیکل	۴۰	۰/۵	۶	۲×۳	نقده- محمدیار- روستای تازه کند
۳۰	نهالستان دار	سیکل	۴۰	۰/۵	۶	۱×۳	نقده- محمدیار- روستای تازه کند



شکل ۳- روندنمای پژوهش

جمع‌آوری داده‌های زیستی و اقتصادی

داده‌های زیستی (سن، قطر و ارتفاع)

توده‌های دست کاشت صنوبر به کمک انواع قلمه (کوتاه یا بلند) یا گیاه ریشه‌لخت^۱ (گیاه یکساله یا دوساله حاصل از کشت قلمه در نهالستان) استقرار می‌یابند. صنوبرکاری‌های بررسی شده اغلب با گیاه ریشه‌لخت یکساله و بدون ماشین کاشت مستقر شده بودند. در توده‌های دست کاشت سن توده اغلب نسبت به زمان کاشت^۲ سنجیده می‌شود (Burkhardt & Tome, 2012). سن صنوبرکاری‌های بررسی شده با توجه به سال کاشت آنها محاسبه شد. نمونه‌گیری قطر درختان در توده‌های همسال، به‌ویژه در سطح کم، اغلب توجه آماری و اقتصادی ندارد. از این‌رو در این شرایط از سرشماری یا آماربرداری صددرصد بهره‌گرفته می‌شود (Namiranian, 2009). در این پژوهش قطر برابر سینه درختان به صورت صددرصد با استفاده از نوار قطر سنج تا دقت میلی‌متر اندازه‌گیری شد. سپس، سطح مقطع توده و قطر درخت متوسط^۳ با استفاده از رابطه‌های زیر برآورد شد:

$$G = \sum_{i=1}^N \frac{\pi}{4} d_i^2 \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه G : سطح مقطع توده به متر مربع، π : عدد پی برابر ۳/۱۴ و d_i : قطر درخت به متر است.

$$D_g = \sqrt{\frac{G \cdot 4 \cdot 10000}{\pi \cdot N}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه D_g : قطر درخت متوسط توده به سانتی‌متر، G : سطح مقطع توده به متر مربع و

N : تعداد درختان است.

برآورد تعداد نمونه لازم برای محاسبه ارتفاع غالب به منظور دستیابی به دقت معین (که اغلب ۵ تا ۱۰ درصد فرض می‌شود) براساس فرمول کوکران به واریانس داده‌ها و آماره تی وابسته است. ارتفاع درختان در توده‌های همسال تا حد زیادی همگن است و واریانس کمی دارد. در نتیجه، با تعداد نمونه کمتری می‌توان به دقت مورد نظر یا پوشش حداکثری واریانس داده‌ها دست یافت. ارزش آماره تی نیز از درجه آزادی ۳۰ به بعد تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین، نمونه‌گیری اولیه با حجم ۳۰ درخت در توده‌های همسال اغلب کافی است (Namiranian, 2009). میانگین تعداد در هکتار در مزرعه/توده‌های تحت بررسی ۴۴۸۴ اصله بود که با احتساب ۳۰ نمونه، با شدت ۰/۷ درصد (یک درخت نمونه از هر ۱۴۳ درخت) می‌توان به دقت مورد نظر دست یافت. با این حال، به منظور افزایش دقت و سهولت اجرا، از شدت آماربرداری ۳/۳۳ درصد یعنی یک درخت نمونه از هر ۳۰ درخت بهره‌گرفته شد. محاسبات بعدی نشان داد که نمونه‌گیری اولیه برای برآورد میانگین ارتفاع با خطای زیر ۵ درصد در همه صنوبرکاری‌ها کافی است و به نمونه‌گیری مجدد نیاز نیست. بر این اساس، یک درخت از هر ۳۰ درخت به صورت منظم تصادفی انتخاب شد و سپس ارتفاع درختان به وسیله شیب‌سنج سونتو تا دقت سانتی‌متر اندازه‌گیری شد.

داده‌های اقتصادی (هزینه کاشت و داشت و

قیمت درخت سرپا)

جدول زمانی نوع و مقدار سالانه همه فعالیت‌های مدیریتی (مانند نهالکاری، کوددهی، آبیاری، شخم، هرس و مانند اینها) در یک دوره صنوبرکاری (از زمان کاشت تا برداشت) و نیز هزینه^۴ هر فعالیت به ریال در سال در هکتار (به قیمت‌های جاری سال ۱۳۹۴) به کمک مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با مالکان صنوبرکاری‌های بررسی شده استخراج شد. متغیرهای

1. Cuttings and bare-rooted whips

2. Age or years since planting

۱. قطر درخت متوسط (Average tree diameter) در منابع، قطر سطح مقطع متوسط یا میانگین مربع قطر (Quadratic mean diameter) نیز نامیده شده است.

۴. به دلیل استفاده از قیمت چوب سرپا در محاسبات، هزینه برداشت عملاً در قیمت چوب سرپا محاسبه شد و بنابراین، هزینه برداشت بررسی نشد (Heshmatol Vaezin et al., 2007). افزون‌بر این، زارعان اغلب چوب را سرپا می‌فروشند و از هزینه برداشت بی‌اطلاع‌اند.

حاصلخیزی در توده‌های دست کاشت اثر بیشتری بر رشد توده نسبت به توده‌های طبیعی می‌گذارد (Barrio-Anta et al., 2008; Weiskittel, 2014). برای محاسبه ارتفاع غالب با توجه به جدول توزیع فراوانی تعداد در طبقه‌های قطری، توده به پنج گروه برابر از نظر تعداد درختان تقسیم شد و میانگین ارتفاع درختان گروه پنجم (قطرترین) ارتفاع غالب توده در نظر گرفته شد (Namiranian, 2009). سپس منحنی راهنمای ارتفاع غالب- سن به کمک منحنی چندجمله‌ای درجه سه برازش شد. منحنی راهنما رابطه ارتفاع غالب- سن را در شرایط حاصلخیزی متوسط داده‌ها نشان می‌دهد. ارتفاع غالب در هفت‌سالگی یعنی سن مرجع (سنی که بیشترین تعداد مشاهده موجود بود)، نمایه حاصلخیزی (H07) در نظر گرفته شد. در مرحله بعد، با فرض شکل یکسان (آنامورف^۱) برای منحنی‌های ارتفاع غالب سن، نمایه حاصلخیزی مزارع (H07) از حاصل ضرب نسبت ارتفاع غالب در سن صنوبرکاری و ارتفاع غالب روی منحنی راهنما در همان سن، در ارتفاع غالب روی منحنی راهنما در هفت‌سالگی برآورد شد (Burkhart & Tome, 2012; Weiskittel, 2014). سپس، دامنه تغییرات نمایه حاصلخیزی (H07) در صنوبرکاری‌های بررسی شده به سه گروه ضعیف (۱۳/۰۹-۱۵/۸۹)، متوسط (۱۸/۷۰-۱۵/۹۰) و بالا (۲۱/۵-۱۸/۷۱) تقسیم شد. در نهایت، ضریب حاصلخیزی هر مزرعه از نسبت نمایه حاصلخیزی مزرعه به حداکثر نمایه حاصلخیزی مشاهده شده (۲۱/۵ متر) تعیین شد. ضریب و نمایه حاصلخیزی در مدل‌های نهایی وارد و بهترین نمایه برای هر مدل انتخاب شد.

صنوبرکاری‌های بررسی شده با فاصله و در نتیجه انبوهی (تراکم) یا تعداد در هکتار کاملاً متفاوتی کاشت شده و عملیات تنک کردن نیز در هیچ یک اجرا

مؤثر بر هزینه هر یک از فعالیت‌ها مانند مقیاس (سطح مزرعه) و حجم کار (مانند تعداد در هکتار درختان) نیز براساس مشاهده میدانی، تجربه کارشناسی و مرور منابع شناسایی و به روش پیمایشی استخراج شد. از آنجا که بسیاری از فعالیت‌ها مثل آبیاری و کوددهی در یک دوره صنوبرکاری چند بار تکرار می‌شوند و همه زارعان توده‌هایی با سنین مختلف داشتند، همه فعالیت‌های کاشت و داشت در سال تحت بررسی (۱۳۹۴) انجام گرفته بود و بنابراین مشکلی در پرسش این اطلاعات به قیمت‌های سال ۱۳۹۴ وجود نداشت.

فروش وزنی درخت سرپا براساس توافق با پیمانکاران چوب، رایج‌ترین روش فروش چوب در صنوبرکاری‌های استان آذربایجان غربی است. برای این منظور، پرسشنامه‌ای طراحی شد که در آن قیمت هر تن درخت سرپای تر در طبقه‌های مختلف قطری (مهم‌ترین عامل مؤثر بر قیمت) از ۳۰ نفر از پیمانکاران چوب و نیز عوامل مؤثر بر قیمت درخت سرپا، قطر حاشیه‌ای (حداقل قطر درخت برای تولید چوب کار)، نحوه خرید چوب از صنوبرکاران و بهترین کاربرد صنعتی چوب در هر طبقه قطری پرسیده شد. به این ترتیب، میانگین قیمت درخت سرپا در هر طبقه قطری محاسبه شد.

محاسبه متغیرهای زیستی مزارع (حاصلخیزی، انبوهی، حجم و جرم حجمی)

ارتفاع غالب در سن مرجع^۱ یا نمایه رویشگاه ساده‌ترین و رایج‌ترین روش برآورد حاصلخیزی یا کیفیت رویشگاه در توده‌های جنگلی همسال است (Vanclay, 1992; Burkhart & Tome, 2012). حاصلخیزی طبیعی رویشگاه در توده‌های دست کاشت اغلب از طریق آبیاری، کوددهی و دیگر فعالیت‌های مدیریتی افزایش می‌یابد. از این‌رو، نمایه رویشگاه را می‌توان برابری حاصلخیزی طبیعی و فعالیت‌های مدیریتی توده محسوب کرد. به این ترتیب، نمایه

1. Reference Age

2. Anamorphic site index curves

استفاده می‌شود (Weiskittel, 2014).

در این پژوهش، از میانگین فضای حیاتی یا فضای رشد در دسترس هر درخت به متر مربع (Tree Vital Space; TVS) نیز به‌عنوان نمایه انبوهی بهره گرفته شد (رابطه ۴). نمایه فاصله نسبی و میانگین فضای رشد هر درخت در مدل‌های نهایی وارد و بهترین نمایه برای هر مدل انتخاب شد.

$$TVS=10000/N$$

رابطه ۴

با توجه به اینکه در عمل از دو الگوی مربع و مستطیل^۲ برای کاشت صنوبر استفاده می‌شود، از نسبت محیط به مساحت فضای رشد هر درخت برای کمی‌سازی شکل هندسی (Zobeiry, 2011) یا الگوی کاشت^۳ بهره گرفته شد. در سطح برابر، به‌طور کلی مربع محیط کمتر و در نتیجه نسبت محیط به مساحت کمتری نسبت به مستطیل دارد. افزون‌بر این، هرچه نسبت طول به عرض مستطیل بیشتر باشد، نسبت محیط به مساحت بیشتر خواهد بود. با افزایش نسبت محیط به مساحت، عمق نفوذ نور و فشار رقابتی در عرض مستطیل به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. برای برآورد حجم توده از معادله حجم گونه تبریزی (Bagheri et al., 2003) بهره گرفته شد (رابطه ۵):

رابطه ۵

$$V = 0.000736d^2 + 0.000745dh - 0.017701d + 0.050632$$

در این رابطه V : حجم (حجم تجاری با حداقل قطر ۵ سانتی‌متر)، d : قطر به سانتی‌متر و h : ارتفاع به متر است. حجم کل توده از جمع حجم همه درختان توده محاسبه می‌شود. به این ترتیب، اثر مرگومیر نیز در محاسبه رشد حجمی توده در نظر گرفته می‌شود.

نمی‌شد. به دلیل نبود اطلاعات درباره ضرایب منحنی خودتنک‌سازی^۱ توده‌های تبریزی، استفاده از نمایه انبوهی نسبی (از بهترین نمایه‌های انبوهی) ممکن نشد (Reineke, 1933; Burkhardt & Tome, 2012). از این‌رو، در این پژوهش از نمایه فاصله نسبی که به لحاظ ریاضی به نمایه انبوهی نسبی شباهت دارد (Burkhardt & Tome, 2012)، بهره گرفته شد. نمایه فاصله نسبی، نسبت میانگین فاصله بین درختان و ارتفاع غالب توده در سن تحت بررسی است (Burkhardt & Tome, 2012; Piticar, 2016). این رابطه با فرض وجود یک شبکه مثلثی برای توزیع درختان به صورت زیر نشان داده می‌شود. این نمایه واحد ندارد و اغلب پس از ضرب معادله در عدد ۱۰۰ برحسب درصد بیان می‌شود، ولی در رابطه زیر بدون ضرب در ۱۰۰ ارائه شده است.

$$RSI = \frac{107}{H_0 \sqrt{N}}$$

رابطه ۳

در این رابطه RSI : نمایه فاصله نسبی، H_0 : ارتفاع غالب درختان (متر) در سن تحت بررسی و N : تعداد در هکتار در زمان تحت بررسی است. با افزایش سن توده، این نمایه اغلب به دلیل رشد ارتفاع کاهش می‌یابد، ولی ممکن است با کاهش تعداد پایه‌ها در اثر مرگومیر و تثبیت رشد ارتفاعی در سن‌های بسیار زیاد اندکی افزایش یابد (J شکل معکوس). نمایه فاصله نسبی اثر رقابت ناشی از انبوهی پایه‌ها را با توجه به حاصلخیزی رویشگاه و سن مزرعه مشخص می‌کند. به این ترتیب، هرچه فاصله بین درختان (تعداد در هکتار) کمتر و ارتفاع غالب درختان (سن و حاصلخیزی توده) بیشتر باشد، مقدار این نمایه کمتر و رقابت بیشتر است (Burkhardt & Tome, 2012).

از آنجا که نمایه فاصله نسبی به فاصله بین درختان و ارتفاع غالب وابسته است، اغلب از آن برای مدل‌سازی ارتفاعی و حجمی (Skovsgaard & Vanclay, 2008) به‌ویژه در جنگل‌های دست‌کاشت

1. Rule of self-thinning
2. Square and rectangular planting pattern
3. Rectangularity of planting

برآورد/تصریح زیرمدل‌های زیستی و اقتصادی (زیرمدل‌های رشد، هزینه و تصمیم‌گیری)

مدل‌های رشد حجمی و قطری اهمیت زیادی در مدیریت جنگل دارند، زیرا به کمک آنها می‌توان میانگین قطر و موجودی توده و در نتیجه ارزش توده سرپا را در شرایط و سنین مختلف برآورد کرد (Vanclay, 1994). مدل‌های رشد جنگل از نظر مقیاس مدل‌سازی به مدل‌های تک‌درخت و مدل‌های توده تقسیم می‌شوند (Porte & Bartelink; 2002). مدل‌های تک‌درخت اطلاعات جزئی‌تری ارائه می‌دهند، اما مدل‌های توده اغلب ساده‌ترند و در توده‌های همسال کاربرد وسیعی دارند (Porte & Bartelink, 2002; Diéguez-Aranda et al., 2006; Barrio-Anta et al., 2008; Hajjarian et al., 2013)؛ از این‌رو در این پژوهش مدل‌سازی در مقیاس توده صورت گرفت. امروزه برای برآورد دقیق مدل‌های رشد از توابع پایه رشد سیگموئیدی و روش تفاضل جبری تعمیم‌یافته (GADA) بهره گرفته می‌شود (Diéguez-Aranda et al., 2006; Weiskittel, 2014; Burkhardt & Tome, 2012).

برای استفاده از این مدل‌ها دست‌کم دو بار اندازه‌گیری متغیرهای درخت (قطر و ارتفاع) یا توده و نیز دامنه وسیعی از سن توده (برای برآورد درست مجانب افقی) ضرورت دارد. با این حال، به دلیل محدودیت دامنه سنی (حداکثر ۱۲ سال) و تعداد اندازه‌گیری‌ها (یک بار اندازه‌گیری)، استفاده از این مدل‌ها عملاً امکان‌پذیر نبود. از این‌رو، مدل‌های رشد قطری درخت متوسط و رشد حجمی توده به کمک تابع چندجمله‌ای درجه سه تصریح و برآورد شد.

براساس مرور منابع و هدف پژوهش، در مدل رشد قطری و حجمی ارائه‌شده، اثر عمده متغیرهای مؤثر شامل سن، حاصلخیزی، انبوهی و الگوی کاشت درختان (مربعی و مستطیلی) در نظر گرفته شد. در این پژوهش پس از بررسی بهترین شکل رابطه تک‌تک متغیرهای مستقل با متغیر وابسته و نیز برهم‌کنش

براساس میانگین‌های تجربی، حداقل نرخ مرگ‌ومیر درختان در یک دوره برداشت ۷ تا ۲۵ درصد به ترتیب در توده‌های بسیار تنک (۴۰۰ اصله درخت در هکتار) تا توده‌های انبوه (دو تا سه هزار اصله درخت در هکتار) در نظر گرفته می‌شود. برای نمونه، توده‌ای که با ۱۶۰۰ اصله درخت کاشت می‌شود، در زمان برداشت ۱۳۷۹ اصله درخت دارد و ۲۲۱ اصله درخت نیز به تدریج تا پایان دوره از توده در حال رشد حذف می‌شود. از این‌رو، حجم قابل برداشت در پایان دوره نیز براساس تعداد درختان باقی‌مانده (با احتساب نرخ مرگ‌ومیر) محاسبه یا گزارش می‌شود.

چوب صنوبر اغلب به صورت سرپا و برحسب وزن چوب تر به فروش می‌رسد. از این‌رو، برای تبدیل حجم صنوبرکاری‌ها به وزن، به جرم حجمی تر چوب صنوبر نیاز است. برای برآورد جرم حجمی تر از نسبت وزن و حجم بینه‌های تبدیل‌شده در زمان برداشت چوب بهره گرفته شد. به این منظور، ۶۰ درخت در طبقه‌های قطری مختلف در سه صنوبرکاری انتخاب شد. پس از قطع، تنه درختان به بینه‌هایی به طول ۲/۱ تا ۲/۶ متر تبدیل شد. سپس قطر میانه همه بینه‌ها اندازه‌گیری و حجم همه بینه‌ها تا حداقل قطر قابل برداشت ۵ سانتی‌متر با استفاده از فرمول هوبر (رابطه ۶) محاسبه شد (Namiranian, 2009).

$$V = g_m * L = \frac{\pi}{4} * d^2 * L \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه V : حجم (متر مکعب)، g_m : سطح مقطع میانی (متر مربع)، L : طول قطعه (متر)، π : عدد ثابت برابر ۳/۱۴ و d : قطر میانی قطعه (متر) است. در مرحله بعد، وزن تر هر کدام از بینه‌ها با استفاده از باسکول دیجیتال (۲۰۰ کیلوگرمی) محاسبه و جرم حجمی تر با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{رابطه ۷}$$

در این رابطه ρ : جرم حجمی (تن در متر مکعب)، m : وزن (تن) و v : حجم (متر مکعب) است

توده‌های جنگلی همسال محسوب می‌شود (Haight, 1990; Heshmatol Vaezin et al., 2009). Faustmann, 1995). معیار فاستمن در شرایط ثابت^۳ از تکرار جمع منافع خالص فعلی یک دوره (NPV) جنگلکاری (کاشت تا برداشت) تا بی‌نهایت^۴ به دست می‌آید که در سن صفر توده ارزش مورد انتظار زمین^۵ را نیز نشان می‌دهد. با این حال، ارزش خالص فعلی دوره اول جنگلکاری با منافع خالص فعلی دوره‌های بعدی به دلیل وجود هزینه ریشه‌کنی کننده درختان دوره قبل متفاوت است (رابطه‌های ۸ و ۹).

$$NPV_1 = \left[-D_0 + \sum_{t=1}^n \frac{R_t - D_t}{(1+r)^t} \right] \quad \text{رابطه ۸}$$

$$NPV_2 = \left[-D_0 - D_1 + \sum_{t=1}^n \frac{R_t - D_t}{(1+r)^t} \right] \quad \text{رابطه ۹}$$

در این رابطه‌ها، R_t : درآمد سال t ، D_t : هزینه سال t ، D_0 : هزینه تسطیح، شخم و دیسک و جنگلکاری در سال صفر و D_1 : هزینه ریشه‌کنی در آغاز دوره دوم جنگلکاری، r : نرخ خالص تنزیل، t سن صنوبرکاری و n : سن بهینه بهره‌برداری است.

از این‌رو، معیار فاستمن از جمع ارزش خالص فعلی دوره اول و تکرار ارزش خالص فعلی دوره دوم تا بی‌نهایت به صورت زیر تصریح شد:

$$LEV = NPV_1 + \frac{NPV_2}{(1+r)^{n-1}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در این رابطه LEV: ارزش مورد انتظار زمین، NPV_1 : منافع خالص فعلی دوره اول، NPV_2 : منافع خالص فعلی دوره دوم، r : نرخ خالص تنزیل و n : سن اقتصادی برداشت است. برای محاسبه نرخ تنزیل، از رویکرد آشکارسازی نرخ تنزیل واقعی به کمک ارزش زمین در منطقه بهره گرفته شد. فرمول فاستمن

متغیرهای مستقل، از بین متغیرهای تأثیرگذار بر رشد حجمی و قطری، بهترین مدل با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه یا چندمتغیره MLRA^۱ گام‌به‌گام در نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ برآورد شد.

در بیشتر پژوهش‌های مشابه از میانگین هزینه‌های کاشت یا داشت در واحد سطح بهره گرفته شده است. با این حال، مدل‌سازی هزینه کاشت و هزینه در واحد سطح هر یک از فعالیت‌های مدیریتی (شخم، هرس، کوددهی، آبیاری و مانند اینها) براساس عوامل مؤثر (مانند سطح مزرعه و حجم فعالیت) روش دقیق‌تری است. برای نمونه، هزینه نهالکاری از تجمیع هزینه‌های خرید و انتقال نهال، شخم و دیسک زمین، کودکشی، افزودن کود دامی و نهالکاری در واحد سطح محاسبه می‌شود. از این‌رو، هزینه هر هکتار نهالکاری به شدت به فاصله کاشت و در نتیجه به تعداد نهال‌ها (هزینه نهال، کودکشی و کاشت) و نیز سطح نهالکاری (صرفه‌جویی‌های مقیاس) وابسته است. به این ترتیب، میانگین مجموع هزینه‌های کاشت در واحد سطح برآورد درستی از هزینه نهالکاری به‌ویژه در فواصل کاشت کم یا زیاد به دست نمی‌دهد. بنابراین در این پژوهش از مدل‌سازی هزینه‌ها به روش هزینه‌یابی واقعی بر مبنای فعالیت^۲ (ABC) بهره گرفته شد (Kavcic & Zadnik-Stirn, 1998). داده‌های لازم برای برآورد مدل هزینه کاشت و هزینه دیگر فعالیت‌های مدیریتی به کمک روش پیمایشی (پرسشنامه نیمه‌ساختاریافته) از جامعه آماری پژوهش به دست آمد و مدل هزینه واقعی هر یک از فعالیت‌ها نیز به کمک رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام در نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ برآورد شد.

تعیین استانداردهای بهینه کاشت و برداشت تنها زمانی به درستی انجام‌پذیر است که از معیار تصمیم‌گیری درستی استفاده شود. معیار فاستمن و تصمیم‌های آن معیار اقتصادی تصمیم‌گیری در

1. Multiple Linear Regression Analysis
2. Activity-Based Costing
3. Deterministic conditions
4. Net present value of perpetual rotations
3. Land expectation value; LEV

مورد انتظار زمین (معیار فاستمن) برای گستره وسیعی از فاصله‌های کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت شبیه‌سازی شد. در نهایت، فاصله کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت متناظر با بیشینه معیار فاستمن به‌عنوان استانداردهای اقتصادی کاشت و برداشت گزارش شد.

نتایج

جمع‌آوری و تحلیل داده‌های زیستی و اقتصادی

در این قسمت آماره‌های توصیفی صنوبرکاری‌های بررسی شده و فعالیت‌های مدیریتی انجام گرفته (جدول ۲)، جدول زمانی نوع و شدت سالانه فعالیت‌ها (جدول ۳) و نیز آماره‌های توصیفی هزینه فعالیت‌ها و قیمت فروش درخت سرپا به قیمت‌های جاری سال ۱۳۹۴ (جدول ۴) ارائه شده است.

ارزش مورد انتظار زمین را در سن صفر توده نشان می‌دهد. اگر زراعت چوب بهترین کاربری زمین باشد، ارزش زمین براساس این کاربری تعیین می‌شود. در این صورت، ارزش برآوردی فرمول فاستمن باید با ارزش واقعی زمین در شرایط میانگین منطقه تطابق داشته باشد. با این پیش‌فرض، نرخ تنزیل واقعی به‌گونه‌ای تعیین شد که ارزش برآوردی فرمول فاستمن با ارزش واقعی زمین (۰/۶ تا ۱ میلیارد ریال به قیمت‌های جاری سال ۱۳۹۴) در منطقه برابر شود.

ایجاد و شبیه‌سازی مدل زیستی-اقتصادی توده‌های دست‌کاشت تبریزی

مدل زیستی-اقتصادی توده‌های دست‌کاشت تبریزی از تلفیق زیرمدل‌های زیستی و اقتصادی در چارچوب برنامه صفحه گسترده اکسل ساخته شد. سپس، ارزش

جدول ۲- آماره‌های توصیفی صنوبرکاری‌های بررسی شده و فعالیت‌های مدیریتی (N=۳۰)

ویژگی‌های زیستی	کمینه	میانگین	بیشینه	ضریب تغییرات (درصد)
سطح مزرعه (هکتار)	۰/۵	۱/۳۷	۸	۱/۱۳
سن (سال)	۳	۷	۱۲	۲۴
قطر درخت متوسط مزرعه/توده (سانتی‌متر)	۵/۵	۱۲/۴۹	۱۸	۲۶
ارتفاع غالب توده (متر)	۷	۱۶/۹	۲۳/۵	۲۴/۹
نمایه حاصلخیزی (ارتفاع غالب توده در هفت‌سالگی)	۱۳/۱	۱۷/۱۵	۲۱/۵	۰/۱۴
ضریب حاصلخیزی	۰/۶۱	۰/۸۰	۱	۱۴
سطح مقطع توده (متر مربع در هکتار)	۱۴	۴۳/۴	۶۵/۳	۳۲
حجم چوب سرپا (متر مکعب در هکتار)	۲۱/۳	۱۷۳/۷	۳۷۱/۳	۵۴
میانگین فضای حیاتی در دسترس هر درخت (متر مربع) در هر مزرعه/توده	۰/۷۰	۳/۱۷	۶	۴۸/۳
نمایه فاصله نسبی (بدون واحد)	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۱۹	۰/۲۸
نسبت محیط به مساحت (متر به توان ۱-)	۱/۶۶	۲/۸	۵/۲۶	۰/۳۵
حجم آبیاری (متر مکعب در هکتار در سال [*])	۱۳۰۰۰	۱۶۴۶۶	۲۰۵۰۰	۱۲
مقدار کود شیمیایی (کیلوگرم در هکتار در سال)	۱۵۰	۷۵۰	۱۳۰۰	۴۵/۸
مقدار کود دامی (تن در هکتار در دوره)	۵	۷/۵	۱۵	۰/۵۲
تعداد تکرار کوددهی دامی در دوره	۱	۱	۱	۰
تعداد تکرار کوددهی شیمیایی در دوره	۱	۱/۵	۲	۰/۳۳
تعداد تکرار آبیاری در یک سال	۷	۱۲	۱۸	۱۲
تعداد تکرار هرس در دوره	۰	۲	۳	۵۲/۵
تعداد تکرار شخم در دوره	۱	۲	۴	۴۱
جرم حجمی چوب تر (تن در متر مکعب)	۰/۶۴	۰/۷۵	۰/۸۹	۲۵/۶

* حجم آبیاری براساس دبی آب و تناوب و مدت آبیاری محاسبه شد. دبی آب براساس اندازه‌گیری میدانی طول عمودی و افقی ریزش آب و به‌کمک فرمول صحرایی برآورد دبی آبیاری از لوله افقی پر (گونیا) محاسبه شد.

جدول ۳- جدول زمانی نوع و شدت سالانه فعالیت‌های مدیریتی انجام گرفته (از کاشت تا برداشت) در صنوبرکاری‌های بررسی شده به تفکیک درجه حاصلخیزی

نوع فعالیت	سال اجرا	مقدار میانگین فعالیت در حاصلخیزی ضعیف	مقدار میانگین فعالیت در حاصلخیزی متوسط	مقدار میانگین فعالیت در حاصلخیزی زیاد
نهالکاری		۳۹۲۶ اصله نهال	۴۶۲۴ اصله نهال	۴۸۸۴ اصله نهال
کود دامی	ابتدای سال یک	۵/۶ تن	۵/۶ تن	۹ تن
شخم		۱ بار	۱ بار	۱ بار
آبیاری		۱۴۸۸۹ متر مکعب	۱۶۷۶۹ متر مکعب	۱۷۷۵۰ متر مکعب
آبیاری	۱	۱۴۸۸۹ متر مکعب	۱۶۷۶۹ متر مکعب	۱۷۷۵۰ متر مکعب
آبیاری	۲	۱۴۸۸۹ متر مکعب	۱۶۷۶۹ متر مکعب	۱۷۷۵۰ متر مکعب
آبیاری		۱۴۸۸۹ متر مکعب	۱۶۷۶۹ متر مکعب	۱۷۷۵۰ متر مکعب
هرس	۳	--	۱ بار	۱ بار
کود شیمیایی		۲۵۰ کیلوگرم	۳۷۵ کیلوگرم	۵۰۰ کیلوگرم
آبیاری	۴	۱۴۸۸۹ متر مکعب	۱۶۷۶۹ متر مکعب	۱۷۷۵۰ متر مکعب
شخم		۱ بار	۱ بار	۱ بار
آبیاری		۱۴۸۸۹ متر مکعب	۱۶۷۶۹ متر مکعب	۱۷۷۵۰ متر مکعب
هرس	۵	۱ بار	۱ بار	۱ بار
آبیاری		۱۴۸۸۹ متر مکعب	۱۶۷۶۹ متر مکعب	۱۷۷۵۰ متر مکعب
کود شیمیایی	۶	۲۵۰ کیلوگرم	۳۷۵ کیلوگرم	۵۰۰ کیلوگرم
آبیاری	۷	۱۴۸۸۹ متر مکعب	۱۶۷۶۹ متر مکعب	۱۷۷۵۰ متر مکعب
آبیاری	از سال ۸ تا زمان برداشت ۸	۱۴۸۸۹ متر مکعب	۱۶۷۶۹ متر مکعب	۱۷۷۵۰ متر مکعب
شخم			۱ بار	

جدول ۴- آماره‌های توصیفی هزینه فعالیت‌های مدیریتی و قیمت درخت سرپا در صنوبرکاری‌های بررسی شده

متغیر	کمینه	میانگین	بیشینه	ضریب تغییرات (درصد)
قیمت درخت سرپا ^۱ (هزار ریال در تن)	۶۵۰	۱۶۸۳	۲۴۳۰/۲۸۸	۳۵/۹
قیمت چوب خمیری سرپا (هزار ریال / تن)	۶۲۰	۷۰۹	۷۶۰	۱۵
قیمت چوب کار سرپا (هزار ریال / تن)	۱۰۰۰	۱۹۰۰	۲۵۰۰	۲۶
هزینه آبیاری ^۲ (هزار ریال در هکتار در هر تکرار)	۷۹۱۳/۵	۸۸۸۷/۵۲۳	۱۱۸۸۵	۲۱
هزینه نهال کاری (هزار ریال در هکتار)	۱۳۳۹۵/۲	۴۶۰۹۹/۲	۱۱۰۰۰۰	۲۵
هزینه کود دامی (هزار ریال در هکتار در هر تکرار)	۷۵۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰	۱۰
هزینه کود شیمیایی (هزار ریال در هکتار در هر تکرار)	۷۰۰	۳۷۶۰	۵۴۰۰	۳۱
هزینه شخم (هزار ریال در هکتار در هر تکرار)	۳۰۰	۴۵۰	۷۰۰	۱۴
هزینه هرس (هزار ریال در هکتار در هر تکرار)	۱۸۰۰	۶۲۶۰	۱۲۰۰۰	۱۲
حصار کشی (هزار ریال در هکتار)	۳۵۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰۰	۱۸
علف تراشی ^۳ (هزار ریال در هکتار در هر تکرار)	۱۰۰۰	۴۰۰	۲۵۰۰	۱۱

۱. قیمت هر تن درخت سرپا هر دو نوع چوب هیزمی و کار را در بر می‌گیرد.

۲. هزینه آبیاری از تقسیم کل هزینه‌های آبیاری شامل هزینه‌های سالانه کارگری بر سطح مزرعه محاسبه شد.

۳. در بیشتر مزارع بررسی شده، علف‌تراشی و حصارکشی انجام نمی‌گرفت و به این دلیل هزینه این فعالیت‌ها در مدل‌سازی و محاسبه وارد نشد.

این، تغییرات قیمت درخت سرپا ۳۵/۹ درصد است که این تغییرات بیشتر به دلیل تغییر قطر درخت ایجاد می‌شود. از این‌رو، در محاسبات از میانگین قیمت درخت سرپا در هر طبقه قطری بهره گرفته شد.

نتایج برآورد میانگین قیمت درخت سرپا در

طبقه‌های مختلف قطری

نتایج پیمایش خریداران چوب سرپا در منطقه پژوهش نشان داد که قطر، مهم‌ترین عامل در تعیین قیمت چوب و خرید وزنی، رایج‌ترین نوع خرید چوب در استان آذربایجان غربی است (Heshmatol Vaezin et al., 2007; Saeed, 2008). یافته‌ها همچنین نشان داد که قطر ۵ سانتی‌متر، قطر کمینه قابل برداشت است. بینه‌های با قطر کمتر از ۱۰ سانتی‌متر به‌عنوان چوب خمیری (هیزی صنعتی) و بینه‌های قطورتر از ۱۰ سانتی‌متر به‌عنوان چوب کار (بینه‌های کم‌قطر چوب‌بری) استفاده می‌شود. میانگین قیمت هر تن چوب خمیری ۷۰۹ هزار ریال و میانگین قیمت هر تن چوب کار ۱/۹ میلیون ریال براساس قیمت‌های جاری سال ۱۳۹۴ برآورد شد. نتایج پیمایش میدانی میانگین قیمت هر تن درخت سرپا در طبقه‌های مختلف قطری در جدول ۵ و شکل ۴ ارائه شده است.

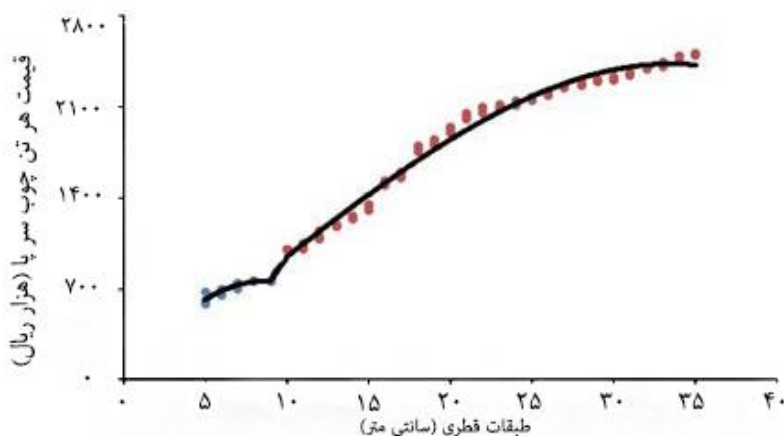
با افزایش تعداد و ضریب تغییرات متغیرها کیفیت مدل‌سازی بهبود می‌یابد (Abrishami, 2014). همان‌طور که در جدول بالا ملاحظه می‌شود، ۳۰ توده دست‌کاشت تحت بررسی از نظر سن، فاصله کاشت، حاصلخیزی و مقدار فعالیت‌های داشت صنوبر با درصد تغییرات ۱۲ تا ۵۴ درصد، پراش (واریانس) زیادی دارند. در مطالعات اقتصادسنجی حداقل تعداد مشاهده سه تا چهار برابر تعداد متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شود (Abrishami, 2014). بنابراین تعداد و پراش داده‌ها برای مدل‌سازی کافی به نظر می‌رسد.

براساس جدول بالا، با افزایش فعالیت‌های داشت مانند کوددهی، شخم و آبیاری، حاصلخیزی توده افزایش یافته است. بنابراین، حاصلخیزی مشاهده‌شده برآیندی از حاصلخیزی طبیعی خاک و فعالیت‌های مدیریتی است. از این‌رو، یافته‌های پژوهش نیز در صورت اجرای این فعالیت‌ها معتبر است.

همان‌طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، هزینه فعالیت‌های مدیریتی بین ۱۰ تا ۳۱ درصد نسبت به میانگین تغییر می‌کند. بنابراین استفاده از میانگین هزینه‌ها به‌ویژه زمانی که از وضعیت میانگین فاصله می‌گیریم، از دقت مناسبی برخوردار نیست. افزون‌بر

جدول ۵- میانگین قیمت هر تن درخت سرپا در طبقه‌های مختلف قطری

قیمت درخت سرپا (ریال/تن)	قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	قیمت درخت سرپا (ریال/تن)	قطر برابر سینه (سانتی‌متر)
۲۱۲۶۰۰۰	۲۴/۵	۶۲۰۰۰۰	۵
۲۲۵۰۰۰۰	۲۷	۷۲۶۰۰۰	۷
۲۳۰۰۰۰۰	۲۹/۵	۷۶۰۰۰۰	۹/۵
۲۴۰۰۰۰۰	۳۲	۱۱۱۰۰۰۰	۱۲
۲۵۰۰۰۰۰	۳۵	۱۲۴۸۰۰۰	۱۴/۵
		۱۵۷۶۰۰۰	۱۷
		۱۸۲۳۰۰۰	۱۹/۵
		۲۰۸۰۰۰۰	۲۲



شکل ۴- منحنی قیمت- قطر درخت سرپا به قیمت‌های جاری سال ۱۳۹۴

درخت متوسط (قطر سطح مقطع متوسط) در جدول ۶ ارائه شده است.

برآورد زیرمدل‌های زیستی و اقتصادی (مدل‌های رشد و هزینه) نتایج برآورد بهترین مدل برازش‌شده رشد قطری

جدول ۶- نتایج برآورد مدل رشد قطری تبریزی و آماره‌های نیکویی برازش در صنوبرکاری‌های بررسی شده

تابع	متغیرها	ضریب	خطای معیار	آماره t	ضریب تعیین تعدیل‌شده	ریشه میانگین مربعات خطا	درصد خطای پیش‌بینی مدل
	t	۲/۶۷	۰/۱۷۶	۱۵/۱			
	t ²	-۰/۰۶۲	۰/۰۱۴	-۴/۵۹			
قطر درخت متوسط	$\frac{h_{07}}{21.5}$	۳/۱۸	۰/۷۹	۳/۹۸	۰/۹۸	۰/۷۸	۶/۳
	TVS * t	۰/۲۷	۰/۱۲	۲/۱۸			
	$\frac{P}{A}t$	-۰/۲۸	۰/۰۲	-۱۲/۴۲			

مربع و $\frac{P}{A}$ نسبت محیط (به متر) به مساحت (به متر مربع) فضای رشد هر درخت است.

در رابطه ۱۱ به جای نمایه فاصله نسبی از میانگین فضای رشد هر درخت (TVS) بهره گرفته شده است. در واقع، نمایه فاصله نسبی با قطر درختان ارتباط مستقیم ندارد (رابطه ۱۲) و در نتیجه همبستگی بسیار کمی با قطر درخت متوسط نشان داد (۰/۱۳). در مقابل، میانگین فضای رشد هر درخت همبستگی

بنابراین، مدل رشد قطری تبریزی به صورت زیر برآورد شد:

$$D_g = 2.67t - 0.062t^2 + 3.18 \frac{h_0}{21.5} + 0.27TVS * t - 0.28 \frac{P}{A} t$$

رابطه ۱۱

در این رابطه D_g : قطر درخت متوسط توده به سانتی‌متر، t : سن، h_{07} : نمایه حاصلخیزی به متر، TVS: میانگین فضای در دسترس هر درخت به متر

درخت متوسط اثر منفی می‌گذارد و این اثر با افزایش سن بیشتر می‌شود. در نهایت، با افزایش نمایه حاصلخیزی، رویش قطری و در نتیجه قطر درخت متوسط توده افزایش می‌یابد.

نتایج برآورد بهترین مدل برازش شده رشد حجمی تبریزی در جدول ۷ ارائه شده است.

زیادی با قطر درخت متوسط نشان داد (۰/۷۶). همان‌طور که در جدول ۶ و رابطه ۱۱ دیده می‌شود، فضای رشد هر درخت بر رویش قطری درخت متوسط اثر مثبت می‌گذارد و شدت این اثر نیز با افزایش سن (اثر تجمعی) بیشتر می‌شود. در مقابل، الگوی کاشت مستطیلی به دلیل ایجاد فاصله کمتر بین درختان در عرض مستطیل بر رویش قطری و در نتیجه بر قطر

جدول ۷- نتایج برآورد مدل رشد حجمی تبریزی و آماره‌های نیکویی برازش در صنوبرکاری‌های بررسی شده

تابع	متغیرها	ضریب	خطای معیار	آماره t	ضریب تعیین	ریشه میانگین مربعات خطا	درصد خطای پیش‌بینی مدل
	t	۴۷/۶۸	۱۵/۴۷	۲/۸۶			
	$(t * \frac{h_{07}}{21.5})^2$	۵/۲۲	۱/۶	۳/۳۷			
	t^3	-۰/۲۱	۰/۱۰۶	-۲/۱۹			
حجم توده در هکتار	$(RSI * t)^{1.4}$	-۴۰۳/۵۳	۱۵۰/۳	-۲/۸۲	۰/۹۷	۳۴	۱۳
	$(\frac{P}{A} t)$	-۳/۹۱	۱/۹	-۲/۲			
	$RSI * t^2$	۳۶/۷۸	۲۵/۱۴	۲/۱۲			

کمتر بین درختان در عرض مستطیل بر رویش حجمی و در نتیجه بر حجم توده اثر منفی می‌گذارد و مقدار این اثر منفی با افزایش سن بیشتر می‌شود. اثر نمایه فاصله نسبی یا فاصله کاشت توده بر حجم تجاری چوب تولیدشده نیز به سن توده وابسته است. با افزایش فاصله کاشت، تعداد پایه‌ها کمتر می‌شود و در نتیجه حجم تجاری چوب تولیدی کاهش می‌یابد (Hemati & Modir Rahmati, 2005). با این حال، با افزایش سن، بخشی از این کاهش حجم به دلیل کاهش رقابت بین پایه‌ها و در نتیجه رویش حجمی بیشتر، جبران می‌شود. از این رو، با افزایش سن، اثر منفی فاصله کاشت بر حجم چوب تولیدی به تدریج کاهش می‌یابد، به طوری که در توده‌های بالغ، تغییر فاصله کشت اغلب اثر کمی بر حجم تولید (> ۱۰٪)

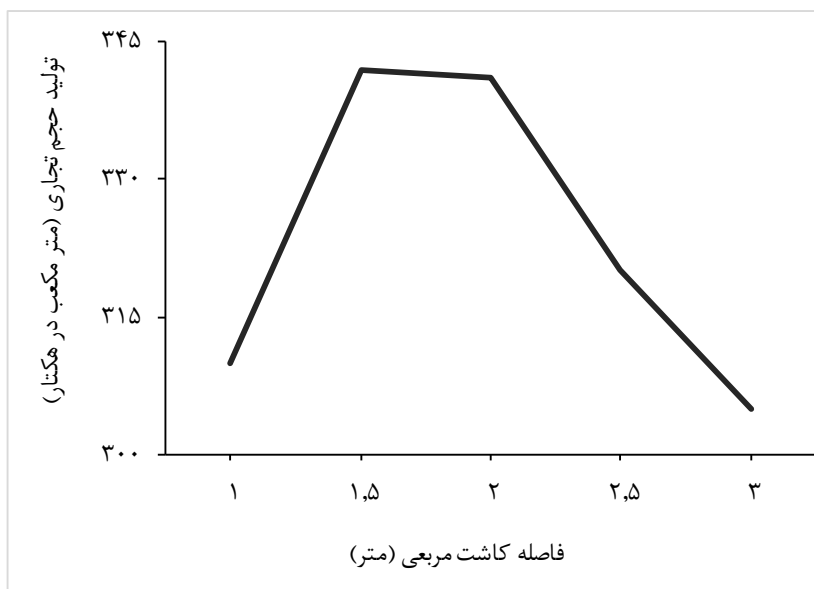
بنابراین، مدل رشد حجمی تبریزی به صورت زیر برآورد شد (رابطه ۱۲):

$$V = 47.68 t + 5.22 \left(\frac{h_{07}}{21.5} t\right)^2 - 0.21 t^3 - 403.53 (RSI * t)^{1.4} - 3.91 \left(\frac{P}{A} t\right) + 36.78 RSI * t^2$$

V: حجم، t: سن، h_{07} : نمایه حاصلخیزی، RSI: نمایه فاصله نسبی و $\frac{P}{A}$: نسبت محیط (به متر) به مساحت (به متر مربع) فضای رشد هر درخت است. همان‌طور که در جدول ۷ و رابطه ۱۲ دیده می‌شود، با افزایش نمایه حاصلخیزی، رویش حجمی سالانه و در نتیجه حجم توده افزایش می‌یابد و شدت این اثر نیز با افزایش سن (اثر تجمعی) بیشتر می‌شود. در مقابل، الگوی کاشت مستطیلی به دلیل ایجاد فاصله

بسیار کم 1×1 مانند فاصله کاشت زیاد بر حجم سرپای توده‌های تبریزی اثر منفی می‌گذارد، به طوری که حجم تجاری تولیدشده در فاصله کاشت $1/5 \times 1/5$ و 2×2 بیشینه می‌شود (شکل ۵).

در دوازده‌سالگی) دارد، ولی اثر چشمگیری ($> 65\%$ در دوازده‌سالگی) بر قطر درختان دارد (Truax et al., 2018). به علاوه، شبیه‌سازی حجم توده در دوازده‌سالگی نشان داد که فاصله کاشت



شکل ۵- تأثیر فاصله کاشت بر تولید حجم تجاری در دوازده‌سالگی

از سطح توده و تعداد درختان است. از آنجا که کودهای شیمیایی اغلب به شکل محلول در آب وارد مزرعه می‌شوند، مصرف کود و در نتیجه هزینه کود با افزایش سطح توده و تعداد درختان افزایش می‌یابد. هزینه آبیاری در واحد سطح نیز با دو متغیر حجم آبیاری و مساحت توده برآزش شد. هزینه‌های آبیاری در واحد سطح با افزایش سطح ابتدا به دلیل صرفه‌جویی مقیاس کاهش و سپس به دلیل افزایش پرت آب در سطح وسیع افزایش می‌یابد. هزینه عملیات شخم در واحد سطح به سطح توده و میانگین فضای رشد هر درخت بستگی دارد. با افزایش فاصله کاشت یا فضای رشد درختان، سهولت کار بیشتر می‌شود و تعداد پایه‌ها، حجم کار و در نتیجه هزینه شخم و دیسک در واحد سطح کاهش می‌یابد. در نهایت، هزینه هرس درختان در واحد سطح با افزایش تعداد درختان و سطح عرصه افزایش می‌یابد.

در نهایت، با توجه به اینکه در مدل‌سازی رشد و محصول جنگل، میانگین خطای پیش‌بینی مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین ۱۰ تا ۲۰ درصد پذیرفتنی است (Hajjarian et al., 2013)، از مدل‌های برآزش شده می‌توان با خطای قابل قبول برای پیش‌بینی حجم توده و قطر درخت متوسط استفاده کرد.

نتایج برآورد بهترین مدل‌های هزینه فعالیت‌های مدیریتی صنوبر در جدول ۸ ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۸ ملاحظه می‌شود، هزینه نهالکاری در واحد سطح به تعداد نهال و سطح عرصه‌ای که قرار است نهالکاری شود، بستگی دارد. هزینه نهالکاری در واحد سطح با افزایش سطح ابتدا به دلیل صرفه‌جویی مقیاس کاهش می‌یابد و سپس به دلیل مشکل مدیریت کار در سطح وسیع افزایش پیدا می‌کند. هزینه کوددهی در واحد سطح نیز تابعی

جدول ۸- مدل‌های هزینه فعالیت‌های مدیریتی در صنوبرکاری‌های بررسی شده

هزینه	متغیرهای مؤثر	ضریب	خطای معیار	آماره t	ضریب تعیین تعدیل شده
نهالکاری* (ریال/هکتار)	سطح مزرعه (هکتار)	-۵۱۰۰۰۰	۲۸۵۵۳	۱۷	۰/۹۸
	سطح مزرعه به توان ۲	۳۰۰۰۰۰	۱۱۱۸۰	۲۶	
	تعداد نهال ثابت معادله	۷۲۰۰ ۵۷۵۰۰۰	۰/۶۷	۱۰۶	
کود شیمیایی (ریال/هکتار)	سطح مزرعه (هکتار)	۱۷۴۰۴۳۱/۸	۳۱۳۹۶۵	۵/۵	۰/۸۸
	تعداد درخت در هکتار	۲۳۹/۱۸	۳۶/۵	۶/۵	
	ثابت معادله	۴۵۶۰۰۰			
آبیاری (ریال/هکتار)	سطح مزرعه (هکتار)	-۳۴۲۶۹۷۳/۶	۱۱۷۳۳۶۵	-۲/۹	۰/۹۹
	سطح مزرعه به توان ۲	۲۰۷۲۳۶۸	۴۰۹۷۴۱	۵	
	حجم آبیاری (m ³)	۵۱۸	۲۵/۴	۲۰/۳	
	ثابت معادله	۱۵۵۴۲۷۶			
شخم یا سله‌شکنی (ریال/هکتار)	سطح مزرعه (هکتار)	۴۴۶۶۶۶	۲۱۷۰۹	۲۰/۵	۰/۹۷
	فضای رشد هر درخت m ²	-۷۱۷۳۶	۱۰۰۰۱/۵	-۱۷	
	ثابت معادله	۴۶۶۳۴۸			
هرس (ریال/هکتار)	تعداد درخت در هکتار	۷۱۲	۴۲/۹۹	۱۶/۵	۰/۹۶
	سطح مزرعه (هکتار)	۸۵۲۳۵۲	۳۹۳۸۴۴	۲/۱۶	
	ثابت معادله	۱۰۰۰۰۰			

* هزینه نهالکاری، همه هزینه‌های تسطیح، شخم، گودکشی، کود دامی، نهال و نهالکاری را در بر می‌گیرد.

شبیه‌سازی مدل زیستی-اقتصادی توده‌های

دست کاشت تبریزی

به کمک مدل زیستی-اقتصادی صنوبر، سن اقتصادی برداشت و ارزش مورد انتظار زمین در گستره وسیعی از فاصله کاشت‌های مربعی و مستطیلی شامل ۱×۱، ۲×۱، ۳×۱، ۳×۲، ۳×۳، ۱/۵×۱/۵، ۱×۱، ۲×۲، ۲/۵×۲/۵ برای حاصلخیزی متوسط (ارتفاع غالب ۱۷ متر در هفت‌سالگی) شبیه‌سازی شد. نرخ تنزیل واقعی برای صنوبرکاری در منطقه با رویکرد آشکارسازی نرخ واقعی ۳ درصد در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۹ ارائه شده است.

براساس نتایج جدول ۹، اگرچه حجم سرپای توده در فاصله کاشت ۱/۵×۱/۵ و ۲×۲ بیش‌تر است، بیشینه ارزش مورد انتظار زمین در فاصله کاشت مربعی

۲/۵×۲/۵ متر و در دوره برداشت دوازده‌سالگی به دست می‌آید. با این حال، الگوی مستطیلی ۲×۳ که فضای رشد درخت (۶ متر مربع) مشابهی دارد، از نظر ارزش زمین و حجم سرپا تنها تفاوتی جزئی با فاصله کاشت اقتصادی ۲/۵×۲/۵ متر دارد (>۱ درصد). در مقابل، فاصله کاشت و سن برداشت پیشنهادی اداره کل منابع طبیعی آذربایجان غربی که ۳×۱ متر و ۸ سال (Salari et al., 2008) است، تفاوت زیادی با فاصله کاشت و سن برداشت اقتصادی دارد. برای مقایسه بهتر، حجم تجاری، قطر و ارزش مورد انتظار زمین در توده‌های دست کاشت تبریزی با حاصلخیزی متوسط، سن بهره‌برداری ۸ سال و فاصله کاشت ۳×۱ متر به کمک مدل زیستی-اقتصادی تبریزی شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۹- برآورد تولید حجم تجاری، قطر درخت متوسط، ارزش مورد انتظار زمین و سن اقتصادی برداشت توده‌های دست‌کاشت تبریزی در فاصله کاشت‌های مختلف در شرایط حاصلخیزی متوسط (ارتفاع غالب ۱۷ متر در هفت‌سالگی) و نرخ تنزیل واقعی ۳ درصد

فاصله کاشت	سن اقتصادی برداشت (سال)	قطر درخت متوسط (سانتی‌متر)	تولید حجم تجاری (متر مکعب هکتار)	ارزش مورد انتظار زمین هکتار (میلیون ریال)
۲/۵×۲/۵	۱۲	۲۰/۱	۳۲۰	۶۶۳
۲×۳	۱۲	۱۹/۹	۳۲۲	۶۵۷
۲×۲	۱۲	۱۸/۸	۳۴۱	۶۳۵
۳×۳	۱۳	۲۱/۷	۳۰۵	۶۰۵
۳×۱	۱۲	۱۶/۶	۳۳۳	۴۷۳
۱/۵×۱/۵	۱۲	۱۶/۶	۳۴۲	۴۵۵
۲×۱	۱۲	۱۵/۵	۳۳۴	۳۵۵
۱×۱	۱۱	۱۲	۳۱۰	۳۱

جدول ۱۰- برآورد تولید حجم تجاری، قطر درخت متوسط و ارزش مورد انتظار زمین در توده‌های دست‌کاشت تبریزی با حاصلخیزی متوسط (ارتفاع غالب ۱۷ متر در هفت‌سالگی)، سن برداشت ۸ سال و فاصله کاشت ۳×۱ متر

فاصله کاشت	حاصلخیزی	سن برداشت (سال)	قطر درخت متوسط (سانتی‌متر)	تولید حجم تجاری (متر مکعب در هکتار)	ارزش زمین در هکتار (میلیون ریال)
۳×۱	متوسط	۸	۱۳/۸	۲۰۵	۲۷۳

بحث

در بیشتر پژوهش‌ها در داخل کشور، از میانگین هزینه‌های مدیریتی یا قیمت درخت سرپا بهره گرفته شده است (Mohammadi Limaie et al., 2013; Adeli et al., 2016). اما در این پژوهش هزینه‌های مدیریتی و قیمت درخت سرپا مدل‌سازی شد تا برآوردها در شرایط مختلف (به‌ویژه فاصله کاشت‌های مختلف) دقیق‌تر صورت پذیرد (Kavcic & Zadnik, 2007; Stirn, 1998; Heshmatol Vaezin et al., 2007). یافته‌ها نشان داد که قیمت درختان هم‌زمانی (>۱۰ سانتی‌متر) حساسیت بسیار کمی به قطر نشان می‌دهد. اما پس از آستانه قطری ۱۰ سانتی‌متر، قیمت درختان به شدت تابع قطر است. بررسی رابطه قیمت-قطر

همان‌طور که در جدول‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، با کاشت درختان با فاصله کاشت ۳×۱ و برداشت درختان در هشت‌سالگی، ۲۰۵ متر مکعب چوب با قطر درخت متوسط ۱۳/۸ سانتی‌متر تولید و ارزش مورد انتظار زمین نیز ۲۷۳ میلیون ریال برآورد می‌شود. در مقابل، با کاشت درختان در فاصله کاشت و سن بهینه برداشت، ۳۲۰ متر مکعب چوب با قطر درخت متوسط ۲۰/۱ سانتی‌متر تولید و ارزش مورد انتظار زمین نیز ۶۶۳ میلیون ریال برآورد می‌شود. به این ترتیب، با اجرای فاصله کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت اقتصادی می‌توان حجم تجاری چوب تولیدی، قطر درخت متوسط و ارزش مورد انتظار زمین را به ترتیب ۵۶، ۴۶ و ۱۴۳ درصد افزایش داد.

دارد (Khan & Chaudhry, 2007; Hemati & Modir Rahmati, 2005). با این حال، شبیه‌سازی حجم توده‌های دوازده‌ساله یا مسن‌تر نشان داد که با افزایش سن قسمتی از افت حجم ناشی از کاهش تعداد پایه‌ها به دلیل رویش بیشتر توده‌های تنک جبران می‌شود. از این رو، با افزایش سن، اثر منفی فاصله کاشت بر حجم سرپا به تدریج کاهش می‌یابد، به طوری که در توده‌های بالغ، برای گستره وسیعی از فاصله‌های کشت (به شرطی که تاج پوشش کامل از بین نرود^۱)، اثر فاصله کاشت بر حجم سرپا جزئی (> ۱۰٪ در دوازده‌سالگی) است (Truax et al., 2018). به این ترتیب، مدل برآورد شده به خوبی فرضیه واکنش به تنک کردن ویدمن و لنگستر را نشان می‌دهد (Skovsgaard & Vanclay, 2008) و قابلیت لازم برای شبیه‌سازی حجم توده در فواصل مختلف کاشت را دارد. در مقابل، با افزایش سن، اثر مثبت فاصله کاشت بر قطر متوسط درختان افزایش می‌یابد (> ۶۵٪ در دوازده‌سالگی). شبیه‌سازی حجم توده‌های دوازده‌ساله یا مسن‌تر همچنین نشان داد که فاصله کاشت بسیار کم ۱×۱ متر مانند فاصله کاشت زیاد بر حجم سرپای توده‌های دست‌کاشت تبریزی اثر منفی می‌گذارد، به طوری که حجم سرپا در فاصله کاشت ۱/۵×۱/۵ و ۲×۲ متر بیشینه می‌شود. این نتیجه با طبیعت نورپسند و حساسیت صنوبر به رقابت درون‌گونه و بین‌گونه‌ای و نیز منابع علمی همخوانی دارد (Latify et al., 2018; Truax et al., 2018). برای نمونه، Latify et al., 2018 برای همین گونه و در همین منطقه نشان دادند که میانگین تولید حجم تجاری در فاصله کاشت ۲×۲ متر بیشینه می‌شود.

الگوی کاشت مستطیلی به دلیل ایجاد فاصله کمتر بین درختان در عرض مستطیل بر رویش حجمی و در نتیجه بر حجم توده اثر منفی می‌گذارد و شدت این

نیز نشان داد که رابطه از نوع ترکیبی خطی و هیپربولیک است که با پژوهش (Hajjarian et al., 2013) و (Heshmatol Vaezin et al., 2007) همخوانی دارد. مدل‌های رشد توده‌های دست‌کاشت تبریزی استان آذربایجان غربی به کمک مدل چندجمله‌ای درجه سوم برآورد شد (Mohammadi Limaei et al., 2013). مدل چندجمله‌ای درجه سوم مدلی ساده با رفتاری به نسبت مناسب است و در بیشتر مطالعات داخلی به کار گرفته شده است، ولی ساختار ریاضی این مدل قابلیت لازم برای لحاظ اثر همزمان حاصلخیزی بر نقطه عطف و شیب تابع را ندارد (Burkhart & Tome, 2012). افزون بر این، تابع چندجمله‌ای درجه سه در سن‌های زیاد ابتدا تثبیت می‌شود و سپس کاهش می‌یابد و این موضوع با واقعیت رشد گونه‌های چوبی تطابق ندارد. از این رو، استفاده از این مدل‌های ساده برای برآورد سن اقتصادی برداشت در حاصلخیزی‌های مختلف پیشنهاد نمی‌شود. به همین دلیل، در این پژوهش فقط از شبیه‌سازی مدل زیستی-اقتصادی در حاصلخیزی متوسط بهره گرفته شد. در تحقیقات آینده بهتر است داده‌های متناسب با مدل‌های تفاضل جبری تعمیم‌یافته (GADA) برداشت شده (Diéguez-Aranda et al., 2006; Hajjarian et al., 2013) و مدل‌های دقیق‌تری برآورد شود. با این حال، با توجه به اینکه در مدل‌سازی رشد و محصول جنگل، میانگین خطای پیش‌بینی مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین ۱۰ تا ۲۰ درصد قابل قبول است (Hajjarian et al., 2013)، مدل‌های برازش‌شده را می‌توان با خطای قابل قبول برای پیش‌بینی حجم توده و قطر درخت متوسط به کار گرفت.

نتایج شبیه‌سازی مدل زیستی اقتصادی در فاصله کاشت‌های مختلف (جدول ۹) نشان داد که با افزایش فاصله کاشت، حجم سرپای توده‌های زیر ده سال کاهش پیدا می‌کند، ولی قطر متوسط درختان افزایش می‌یابد که این نتایج با پژوهش‌های پیشین همخوانی

1. Fully stocked stands *i.e.*, 40-50% of maximum stand density (Olson & Lundgren, 1978).

کلن (تاج‌باز و تاج‌بسته)، محصول هدف (چوب انرژی، چوب خمیری، چوب روکشی)، فاصله و منطقه کاشت، حاصلخیزی رویشگاه، نرخ تنزیل و معیار تصمیم‌گیری نشان می‌دهد. برای نمونه، فاصله کاشت و سن برداشت اقتصادی گونه/کلن‌های تاج‌باز (سنوبر دلتوئیدس و سنوبر هیبرید اورآمریکن) در منابع داخلی و خارجی به ترتیب از 4×4 تا 6×3 متر و از ۱۲ تا ۲۵ سال برآورد شده است (Keča, 2017; Keča et al., 2012; Mohammadi Limaie et al., 2016; Adeli et al., 2013). اما در مقابل، فاصله کاشت و سن برداشت اقتصادی گونه/کلن‌های تاج‌بسته (مانند سنوبر تبریزی، کبوده بومی) در منابع داخلی و خارجی به ترتیب از 2×1 ، 2×2 ، تا $2/4 \times 2/4$ تا $2/5 \times 2/5$ متر و از ۸ سال تا ۱۴-۱۳ سال برآورد شده است (Hemati & Modir Rahmati, 2005; Yousefi, 2012). به‌طور کلی گونه/کلن‌های تاج‌بسته سنوبر حجم تاج کمتر و در نتیجه نرخ رشد کمتری (Yousefi, 2012) دارند و در عوض، به فضای رویشی کمتری نیز نیاز دارند. در نتیجه، در منابع علمی فاصله کاشت و سن برداشت اقتصادی کمتری برای گونه/کلن‌های تاج‌بسته گزارش شده است. از این‌رو، فاصله کاشت $2/5 \times 2/5$ متر و سن بهینه برداشت ۱۲ سال در این پژوهش با دامنه فاصله کاشت و سن برداشت اقتصادی در ادبیات پژوهش همخوانی دارد. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که با اجرای فاصله کاشت، الگوی کاشت و سن برداشت اقتصادی، تولید حجم تجاری، قطر درخت متوسط و ارزش مورد انتظار زمین به ترتیب ۵۶، ۴۶ و ۱۴۳ درصد افزایش می‌یابد.

برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی پاسخ رویشی به فعالیت‌های مدیریتی (نوع گیاه یا قلمه کاشت، شخم، کوددهی، آبیاری، تنک‌سازی و کنترل علف هرز و ...) باید پژوهش‌های بیشتری انجام گیرد.

اثر منفی با افزایش سن بیشتر می‌شود. با این‌حال، مطابق مرور منابع (Amateis & Burkhardt, 2012)، در فاصله کاشت‌های مستطیلی منطقه (3×1) این اثر منفی در دوازده‌سالگی کمتر از ۳ درصد پیش‌بینی شد (جدول ۹).

شبیه‌سازی مدل زیستی اقتصادی در فاصله کاشت‌های مختلف (جدول ۹) نشان داد که با افزایش فاصله کاشت ابتدا ارزش مورد انتظار زمین به دلیل افزایش میانگین قطر پایه‌ها افزایش و سپس به دلیل کاهش حجم توده کاهش می‌یابد (Khan & Chaudhry, 2007). اگرچه حجم سرپای توده در فاصله کاشت $1/5 \times 1/5$ و 2×2 متر بیشینه می‌شود، بیشینه ارزش مورد انتظار زمین در فاصله کاشت مربعی $2/5 \times 2/5$ متر به دست آمد. به دیگر سخن، منافع نهایی افزایش فاصله کاشت تا $2/5 \times 2/5$ متر (افزایش قطر و قیمت چوب سرپا) از هزینه نهایی آن (کاهش حجم سرپا) بیشتر است.

در نهایت، مطابق با منابع علمی موجود، یافته‌های این پژوهش نیز نشان داد که سن اقتصادی برداشت توده با افزایش فاصله کاشت افزایش می‌یابد (Engindeniz, 2003; Hajjarian et al., 2013; Mohammadi Limaie et al., 2013). با این‌حال، سن اقتصادی برداشت به شدت به محصول هدف (در این پژوهش، چوب خمیری و بینه‌های کم‌قطر چوب‌بری) و شکل منحنی قیمت-قطر وابسته است (Peyron & Guo, 1995) و به همین دلیل، تغییر فاصله کاشت، سن برداشت را فقط ۱ سال تغییر می‌دهد.

در این پژوهش فاصله کاشت و سن بهینه برداشت کلن‌های تاج‌بسته تبریزی در حاصلخیزی متوسط به کمک مدل زیستی-اقتصادی سنوبر $2/5 \times 2/5$ متر و ۱۲ سال برآورد شد. بررسی پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه فاصله کاشت و سن برداشت اقتصادی سنوبر، نتایج کاملاً مختلفی را برحسب نوع گونه و

References

- Abrishami, H. (2014). *Basic Economics*, University of Tehran Press, 7th Edition.
- Adeli, K., Saeedi, S., Namdari, S., Mohammadi Samani, K., & Yosefi, B. (2016). Financial maturity of *Populus deltoides* Marsh. (Case study: Shalysheh village, Kurdistan province). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(4), 601-611.
- Alizadeh Anaraki, K., Lashgarara, F., & Kiadaliri, H. (2012). Effect of Socio-economic factors on development of poplar plantation in Guilan province (Case Study: Some-e Sara). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 20(2), 346-356.
- Amateis, R.L. & Burkhart, H.E. (2012). Rotation-age results from a loblolly pine spacing trial. *Southern Journal of Applied Forestry*, 36(1), 11-18.
- Asadi, F., & Bagheri, R. (1999). Investigation on poplar cultivated area change by aerial photographs and land control. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 3(1), 89-108.
- Bagheri, R., Modir-Rahmati, A.R., Namiranian, M., & Zobeiry, M. (2003). Determination of volume tables for Zanjan-Rood river native poplars. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 11(9), 1-36.
- Barrio-Anta, M., Sixto-Blanco, H., Canellas-Rey De Vinas, I., & Castedo-Dorato, F. (2008). Dynamic growth model for I-214 poplar plantations in the northern and central plateaux in Spain. *Forest Ecology and Management*, 255, 1167-1178.
- Burkhart, H.E., & Tomé, M. (2012). *Modeling forest trees and stands*. New York: Springer.
- Chang, S.J. (1983). Rotation age, management intensity, and the economic factors of timber production: do changes in stumpage price, interest rate, regeneration cost, and forest taxation matter? *Forest science*, 29(2), 267-277.
- Diéguez-Aranda U., Castedo F., Álvarez J.G., & Rojo A. (2006). Dynamic growth model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Galicia (north-western Spain), *Ecological Modeling*, 191, 225-242.
- Engindeniz, S. (2003). Determination of economic and financial rotation lengths of hybrid poplar plantations: the case of Turkey. *Pakistan journal of Biological Sciences*, 6(4), 325- 330.
- Faustmann, M. (1995). On the determination of the value, which forestland and immature stands possess for forestry. *Journal of Forest Economics*, 1, 7-44.
- Ghasemi, R., Modir Rahmati, A. R., & Asadi F. (2012). Growth characteristics of 5 black poplar (*Populus nigra*) clones with Turkish origin in Karadj area. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 19 (4), 491-500.
- Haight, R. G. (1990). Economic models for evaluating plantation and uneven-aged forestry. In C.A. Hickman (Eds.), *Proceedings of the Southern Forest Economics Workshop on Evaluating Even and All-aged Timber Management Options for Southern Forest Lands*. *USDA Forest Service, Technical Report SO-79* (pp. 25-34).
- Hajjarian, M., Heshmatol Vaezin, S.M., Diéguez-Aranda, U., Namiranian, M., & Etemad, V. (2013). Basal area growth equations for poplar (*Populus deltoides*) in Some-e Sara, Guilan province, Iran. *Iranian Journal of Forest*, 5(3), 281-294.
- Halbritter A., & Deegen P.A. (2015). Combined economic analysis of optimal planting density, thinning and rotation for an even-aged forest stand. *Forest Policy and Economics*, 51, 38-46.
- Hemati, A., & Modir-Rahmati, A.R. (2005). Effects of spacing on yield of various clones of *Populus nigra* L. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 13(3), 343-352.

Hesami, M., & Asadi, H. (2016). Variations in vegetative traits of white poplar (*Populus alba* L.) for wood farming in riverbanks of Zayandehrood River in Isfahan. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(3), 520-528.

Heshmatol Vaezin, S.M., Barkaoui A., & Peyron J-L. (2007). Estimating the value of standing timber on the basis of parcel characteristics - the case of beech in Lorraine prior to the 1999 storms. *French Journal of Forest*, 6, 625-638.

Heshmatol Vaezin. S. M., Peyron. J. L., & Lecocq, F. (2009). A simple generalization of the Faustmann formula to tree level. *Canadian Journal of Forest Research*, 39, 699-711.

Kavcic, S., & Zadnic-Stirn, L. (1998). Activity-based costing in forestry. In: Buttoud, G., Jöbstl, H. & Merlo, M. (eds.), Accounting and managerial economics for an environmentally friendly forestry, *Économie et sociologie rurales, Actes et Communication*, no. 15 (pp. 87- 96).

Keča, L., Keča, N., & Pantić D. (2012). Net Present Value and Internal Rate of Return as indicators for assessment of cost-efficiency of poplar plantations: a Serbian case study. *International Forestry Review*, 14(2), 145-156.

Keča, L. (2017). Determination of the optimal financial rotation period in poplar plantation. *Baltic Forestry*, 23(1), 673-682.

Khan, G.S., & Chaudry A.K. (2007). Effect of spacing and plant density on the growth of poplar (*populus deltoids*) trees under agro-forestry system, *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 44(2), 321-327.

Latify R., Alijanpour A., Shafiei A.B. & Sadeghi A. (2018). Effects of planting interval and soil type on volume production and slenderness index of poplar (*Populus nigra* L.) plantations in Diwandareh region (Kurdistan province, western Iran). *Journal of forest science*, 64, 171-177.

Mohammadi Limaei, S., Bahramabadi, Z., Rostami Shahrage, T., Adibnejad, M., & Mousavi Koupar, S.A. (2013). Determination of economically optimal rotation age of (*Populus deltoides*) in Guilan Province, *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(1), 63-75.

Namiranian, M. (2009). Measurement of Tree and Forest Biometry. Tehran: University of Tehran Press.

Olson, J.T., & Lundgren, A.L. (1978). Converting partially-stocked aspen stands to fully-stocked stands in the Lake States: an economic analysis (General Technical Report NC 47). Minnesota: USDA Forest Service. https://digitalcommons.usu.edu/aspen_bib/4751

Peyron, J.L., & Guo, B. (1995). Timber and pulpwood, which production strategy? *French Journal of Forest*, 5, 559-571.

Piticar, M.A. (2016). The effects of thinning on a spruce stand, over a period of 40 years of monitoring. *AAB Bioflux*, 8(2), 77-86.

Porte, A., & Bartelink H. (2002). Modelling mixed forest growth: a review of model for forest management, *Ecological Modeling*, 150 (1-2), 141-188.

Ryan, M., O'Donoghue, C., & Phillips, H. (2015). Modelling financially optimal afforestation and forest management scenarios using a bio-economic model. *Open Journal of Forestry*, 06, 19-38.

Reineke, L.H. (1933). Perfecting a stand-density index for even-aged forests, *Journal of Agricultural Research*, 46(7), 627-638.

Saeed, A. (2008). Fundamentals of Practical- Economics in Forest Management. Tehran: University of Tehran Press.

Salari. A., Modirrahmati, A.R., Zargarani, M.R., Falahi, S., & Aliakbari G. (2008). Application of *Populus* researches in wood culture. Proceedings of the Second National Congress on Poplar and Potential Use in Poplar Plantation 2, 409-418.

- Skovsgaard, J.P., & Vanclay, J. K. (2008). Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands, *Forestry*, 81(1), 13-31.
- Truax, B., Fortier, J., Gagnon, D., & Lambert, F. (2018). Planting density and site effects on stem dimensions, stand productivity, biomass partitioning, carbon stocks and soil nutrient supply in hybrid poplar plantations. *Forests*, 9, 293.
- Vanclay, J.K. (1994). Modeling forest growth and yield: Application to mixed tropical forests. Wallingford UK: CAB international.
- Vanclay, J.K. (1992). Assessing site productivity in tropical moist forests: a review. *Forest Ecology and Management*, 54 (1), 257-287.
- Weiskittel, A.R. (2014). Forest growth and yield models for intensively managed plantations. In: Borges, J.G., Diaz-Balteiro, L., McDill, M.E., & Rodriguez, L.C.E. (Eds.), *The Management of Industrial Forest Plantations: Theoretical Foundations and Applications* (pp. 61–90). Dordrecht: Springer.
- Yousefi, B. (2012). Frequency analysis in the wood production of different Poplars (*Populus* spp.) in Sanandaj. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 19(4), 543-561.
- Zobeiry, M. (2011). Forest Inventory. Tehran: University of Tehran Press.



Research Article

Determining the economically optimal planting interval, planting pattern and rotation age for high-yielding black poplar (*Populus nigra L.*) clones in West Azerbaijan province, Iran

S. M. Heshmatol Vaezin^{1*}, B. Khezriyan², M. Namiranian³, M. Hajjarian⁴, M. Janat Babai⁵ and F. Shaykhkanlooy Milan²

¹ Associate Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

² M.Sc., Graduate, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

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

⁴ Assistant prof., Faculty of Natural Resources, University of Urmia, Urmia, I. R. Iran

⁵ Expert of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

(Received: 1 December 2018, Accepted: 26 May 2019)

Abstract

This research aimed at determining the economic planting interval, planting pattern, and rotation age for high-yield black poplar in the West Azerbaijan Province, Iran. For this purpose, a decision support system called the bio-economic model was employed. The model simulates the dynamics of stand's bio-economic variables over time. The statistical population consists of poplar farmers and timber merchants in Orumiyeh and Naghadeh counties where black poplar plantations were highly concentrated. Biological data were collected using full calipering inventory (diameter) and systematic random sampling (height and wet wood density). The economic data (stumpage price and costs) were obtained through a field survey based on a semi-structured interview. Multiple regression analysis and OLS estimator were used to estimate the biological (*e.g.*, growth and yield) and economic (*e.g.*, planting cost) sub-models. By integrating sub-models within an Excel spreadsheet, a bio-economic model was constructed for black poplar plantations. Finally, land expectation value (Faustmann formula) was simulated over a wide range of planting intervals, planting patterns and rotation age. As a result, the economic planting interval/pattern and rotation age of average-fertility plantations appeared to be square, 2.5×2.5 meter and 12 years while the common standards are rectangular, 3×1 meter and 8 years, respectively. The results revealed that implementing economically optimal planting and harvest standards increase the per-hectare merchantable volume production, quadratic mean diameter and land expectation value by 56, 46 and 143 percent, respectively. Further research will be required to model and to optimize the growth response of poplar plantations to management activities (*e.g.*, ploughing, fertilization, irrigation, vegetation control, and thinning).

Key words: Bio-economic model, land expectation value, management activities, merchantable volume production, quadratic mean diameter