



## تعیین سن بهره‌برداری با توجه به بهینه‌سازی ارزش خالص فعلی سری‌های دوره‌ای متناهی چوب و ترسیب کربن در جنگلکاری‌های صنوبر (*Populus deltoides* Marshall) استان گیلان

طوبی عابدی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا مسکنی<sup>۲</sup>، رؤیا عابدی<sup>۳</sup> و بهزاد بخشنده<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>استادیار پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران  
<sup>۲</sup>استادیار پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران  
<sup>۳</sup>دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی اهر، دانشگاه تبریز  
<sup>۴</sup>رئیس اداره جنگلداری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان، رشت، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۲۹)

### چکیده

در این تحقیق برای تعیین سن بهینه بهره‌برداری از مدل توسعه‌یافته فاستمن به منظور تعیین ارزش‌های چوبی و غیرچوبی در جنگل‌های همسال استفاده شده است. چهار منطقه جنگلکاری صنوبر از غرب (حفظ‌آباد تالش)، مرکز (چوبر شفت)، شرق (چالشم سیاهکل) و ساحل (چاف و چمخاله لنگرود) استان گیلان انتخاب شدند. رویش حجم با استفاده از نتایج آنالیز تنه و مقدار کربن اندام‌های هوایی با استفاده از روش احتراق محاسبه شد. سپس ارزش خالص فعلی چوب و ترسیب کربن برای سری‌های دوره‌ای متناهی با استفاده از رویش حجمی و اندوخته کربن، نرخ تنزیل، قیمت تعدیل‌شده چوب با استفاده از مدل خودکاهشی مانا، قیمت تعدیل‌شده کربن با استفاده از مدل خودکاهشی نامانا، درآمد نهایی و هزینه نهایی محاسبه شد. سن بهینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن ارزش خالص فعلی چوب در این مناطق از ۶ تا ۹ سال و با در نظر گرفتن ارزش خالص فعلی کربن از ۱۱ تا ۱۵ سال و ارزش خالص فعلی چوب و کربن به‌طور توأم ۷ تا ۱۰ سال به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز تنه، ارزش کربن، درآمد نهایی، رویش، قیمت تعدیل‌شده.

### مقدمه

درآمد خالص پذیرفته شده است (Faustmann, 1849). مدل Faustmann (1849) و تعمیم‌های آن معیار اقتصادی تصمیم‌گیری در توده‌های همسال محسوب می‌شود (Heshmatol Vaezin et al., 2020). Englin & Callway (1995) با توسعه مدل Hartman (1976) به بررسی تأثیر تنوع زیستی، ارزش زیبایی‌شناختی، پایداری خاک، جمعیت گوزن‌ها در جنگل، ارزش آب و ارزش کربن در سن بهره‌برداری بهینه جنگل پرداختند. (Wurzbacher & Creedy مدلی ساختند که در آن ترسیب کربن و

سن بهره‌برداری بهینه سنی است که در آن مقدار ارزش خالص فعلی جنگلکاری با توجه به قیمت، درصد بهره بانکی و مقدار رویش سالیانه به بیشینه برسد (Faustmann (1849). (Mohammadi et al., 2013). روش تعیین سن بهره‌برداری بهینه جنگل را ارائه کرد و Hartman (1976) مدل او را با ارزش‌هایی افزون‌بر ارزش درختان سرپا توسعه داد. از بین پژوهش‌ها، مدل Faustmann (1849) به‌عنوان بهترین مدل برای تعیین سن بهینه بهره‌برداری از طریق بیشینه کردن

گرفت. با توجه به اهمیت موضوع گرمایش جهانی و تأثیرات گازهای گلخانه‌ای بسیاری از توافق‌نامه‌های ملی و بین‌المللی مانند توافقنامه پاریس که در سال ۲۰۱۵ منعقد شده است بر ثبات کربن جو تأکید دارند. جذب و ذخیره کربن فرایندی حیاتی در مبارزه جهانی با تغییر اقلیم است (Rhodes, 2016). جنگل‌ها کم‌هزینه‌ترین روش از لحاظ اقتصادی برای کاهش اثر گلخانه‌ها و سیاست‌های اقلیمی مربوط به تعادل کربن شناخته شده‌اند. پیمان کیوتو که در سال ۲۰۰۷ منعقد شده در راهکار توسعه پاک بر توسعه جنگلکاری‌ها برای کاهش گازهای گلخانه‌ای تأکید کرده است (Asante, et al., 2011; United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC, 2007).

Liski et al. (2001) سن بهینه بهره‌برداری توده‌های سی‌ساله *Pinus sylvestris* L. و *Picea abies* (L.) H. Karst. در فنلاند را با توجه به کربن و تأثیر آن در سن بهره‌برداری تعیین کردند (Liski et al., 2001). سن بهره‌برداری *P. sylvestris* L. بیشتر از *P. abies* (L.) به دست آمد و نتایج نشان داد که سن بهره‌برداری با در نظر گرفتن کربن، طولانی‌تر می‌شود. سن بهینه بهره‌برداری جنگلکاری *Pinus brutia* Ten. در ترکیه با توجه به ارزش‌های تولید چوب و ترسیب کربن تعیین شد (Keleş, 2017). از داده‌های رویش و محصول، معادلات بیوماس و عوامل تبدیل کربن، هزینه جنگلکاری و درآمد حاصل از چوب برای تعیین سن بهره‌برداری استفاده شد. نتایج نشان داد که در همه فواصل کاشت، سن بهینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن ترسیب کربن، بیشتر از این سن بهره‌برداری با در نظر گرفتن ارزش اقتصادی چوب است.

Zhang et al. (2020) زی‌توده و ذخیره کربن درختان را در ۲۴ کلن صنوبر سیزده‌ساله با توجه به فاصله کاشت با استفاده از روش آنالیز تنه اندازه‌گیری کردند (Zhang et al., 2020). براساس مقادیر پیش‌بینی رویش دوره‌ای حجم درخت توسط مدل

ارزش آب را بر طولانی شدن چرخش بهینه بهره‌برداری در مقابل چرخشی که فقط با حداکثر کردن ارزش خالص فعلی به دست آمده مقایسه کردند. در ابتدای دهه ۱۹۸۰ بسیاری از محققان آمریکایی مطالعه هزینه‌های جنگلکاری همراه با ترسیب کربن را آغاز کردند و بسیاری از آنها به برآورد هزینه‌ها پرداختند و نتایج متفاوتی به دست آوردند (Asante, 2017; Ben Abdallah & Lasserre, 2011). از مدل Hartman (1976) برای تعیین سن بهینه با توجه به ارزش‌های اقتصادی چوب و پویایی کربن در توده‌های *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. جنوب چین استفاده شد که نتایج نشان داد سن بهره‌برداری با در نظر گرفتن ارزش کربن افزایش یافت (Zhou & Gao, 2016).

مدل Hartman (1976) توسط Van Kooten (1995) به‌عنوان اولین تحقیقات اثر قیمت کربن بر سن بهینه بهره‌برداری جنگل در غرب کانادا استفاده شد. در بررسی آنها کربن ذخیره‌شده در توده جنگلی نسبتی از حجم دادوستد چوب در توده در سن خاص است (Van Kooten et al., 1995). جنگلکاری یک حجم سرپای در حال رشد از چوب دارد و همزمان خدمات محیط زیستی نیز فراهم می‌کند، مثل ترسیب کربن جو که موجب رشد و ذخیره کربن در زی‌توده جنگل می‌شود.

بیشتر پژوهش‌ها درباره ترسیب کربن در اقتصاد جنگل از مدل Hartman (1976) استفاده کرده‌اند که بیان می‌کند سن بهینه بهره‌برداری جنگل ممکن است با در نظر گرفتن ارزش‌های غیرچوبی جنگل یا ارزش‌های غیرچوبی همراه با ارزش چوب افزایش یابد (Hartman, 1976). از مزایای این مدل آن است که می‌توان ارزش‌هایی همچون ترسیب کربن را به‌عنوان عامل اساسی در کاهش تغییرات اقلیمی و گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان ارزش‌های زیست‌محیطی جنگل در ارزشگذاری جنگلکاری‌ها دخیل کرد و در مطالعات آینده‌نگاری از این نتایج برای مدیریت توده‌ها بهره

محاسبه ارزش خالص فعلی چوب و ترسیب کربن در سری‌های دوره‌ای متناهی است. سری‌های دوره‌ای متناهی به این معناست که جنگلکاری در پایان دوره بهره‌برداری قطع یکسره شده و کامل برداشت می‌شود. درآمد دوره‌ای بیش از یک سال، سری‌های دوره‌ای متناهی نامیده می‌شود. دو مبحث مهم اقتصادی و زیست‌محیطی به‌طور توأم برای گونه صنوبر که گونه‌ای تندرشد و با اهمیت اقتصادی در کشور محسوب می‌شود بررسی شد. مزایای محیط زیستی جنگلکاری‌ها امروزه به مزایای سنتی چوب اضافه شده است. با توجه به وجود جنگلکاری‌های سنواتی صنوبر با سنین بسیار زیاد در استان گیلان که از سن بهینه بهره‌برداری آنها گذشته است، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان تصمیم به قطع و جنگلکاری مجدد گرفته است و در این کار برای تعیین سال‌های قرارداد و بهره مالکانه با پیمانکاران نیاز به تعیین سن بهینه و ارزش خالص فعلی جنگلکاری دارد. تحقیق حاضر برای رفع این نیاز انجام گرفته است.

### مواد و روش‌ها

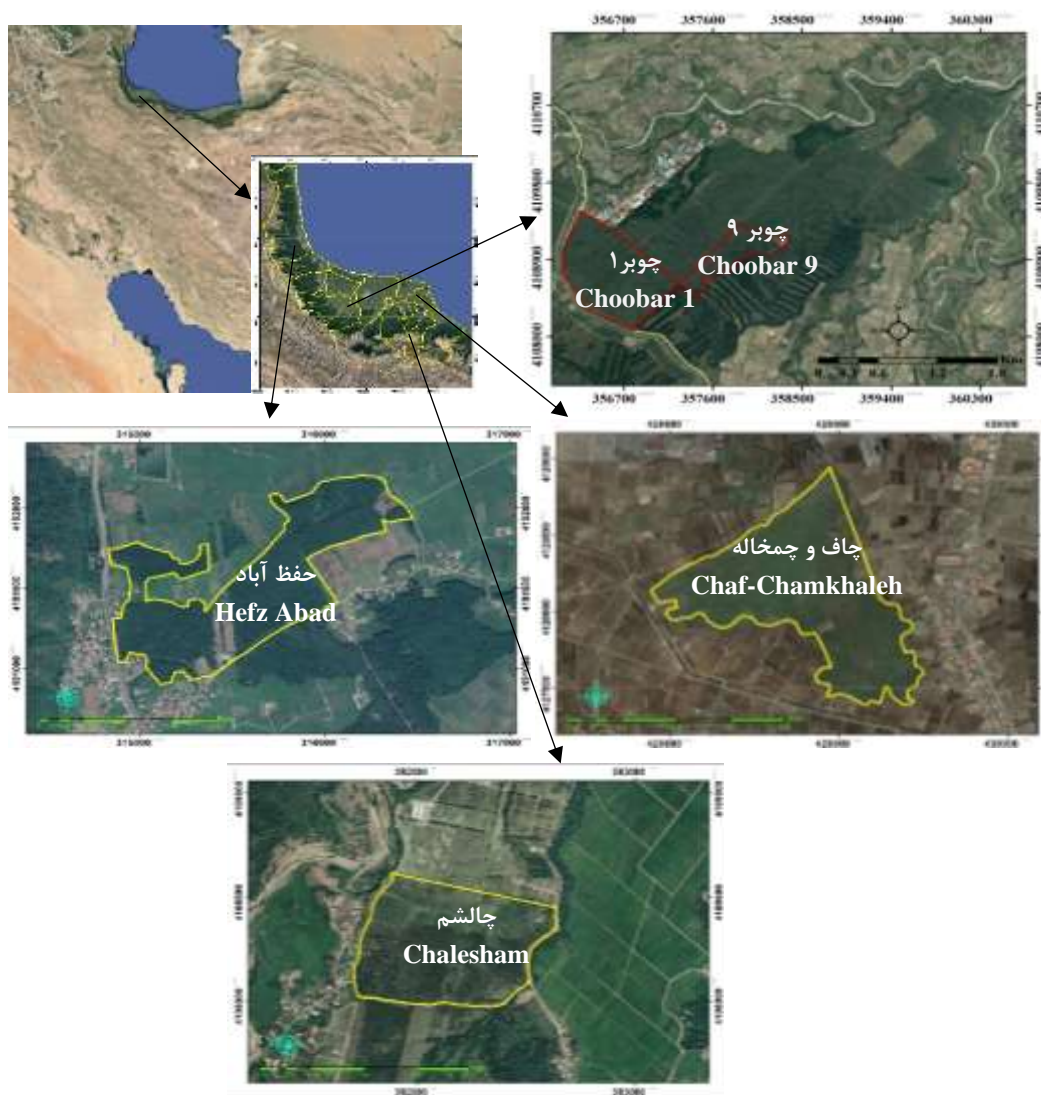
#### منطقه پژوهش

پنج قطعه جنگلکاری صنوبر در استان گیلان از غرب تا شرق و ساحل برای بررسی انتخاب شد (شکل ۱) که مشخصات آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. این مناطق از جنگلکاری‌های سنواتی در عرصه‌های ملی متعلق به اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان هستند که گذشته از اینکه هیچ عملیات پرورشی یا کوددهی در آنها انجام نگرفته، در طی سالیان متمادی برداشت‌های غیرمجاز توسط افراد محلی نیز در این مناطق صورت گرفته است. درختان سرشکسته و بادافتاده در توده‌های بررسی شده به دلیل اجرا نشدن عملیات تنک کردن و برداشت‌های غیرمجاز و لکه‌های مشاهده می‌شوند. جنگلکاری با صنوبر در این عرصه‌ها به دلیل حفظ اراضی ملی توسط اداره کل منابع طبیعی استان گیلان انجام گرفته است.

Chapman-Richards سن مناسب بهره‌برداری با توجه به حجم توده جنگلکاری شده از ۱۴ تا ۱۷ سال به دست آمد. همچنین در جنگلکاری *Pinus brutia* Ten. در خرم‌آباد از مدل Faustmann (1849) استفاده (Mohammadi & Moayeri, 2016; Latifi nia et al., 2021) و رویش حجمی با استفاده از آنالیز تنه محاسبه شد و رویش سالانه، متوسط رویش برحسب سن و موجودی حجمی سرپا کاج بروسیا برحسب مترمکعب به‌ازای سنین مختلف استخراج شد (Askarii et al. (2021). (Latifi nia et al., 2021) ارزش اقتصادی و ذخیره کربن در رویشگاه‌های جنگلی کهگیلویه و بویراحمد را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ذخیره کربن در این رویشگاه‌ها بین ۱۷ تا ۳۱ تن در هکتار است که در رویشگاه‌های مختلف با هم اختلاف معنی‌دار داشتند (Askarii et al., 2021). تعیین میزان رویش و مدل‌های رویش از مهم‌ترین عوامل در تعیین سن بهره‌برداری است. آگاهی از مقدار دقیق رویش در هر نوع برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از جنگل امری بدیهی است (Nghiem, 2014)، روش آنالیز تنه به‌عنوان روشی کارآمد در بررسی مشخصه‌های رویشی درختان در طول سال‌های زندگی آنها از ابتدای کاشت تا زمان قطع و سیر تحول مشخصه‌های تحت بررسی بوده و راهکاری علمی برای دستیابی به نتایج مطلوب در مورد داده‌های تاریخی جنگلکاری است (Metsaranta & Bhatti, 2016). براساس پژوهش‌ها، سن بهره‌برداری با در نظر گرفتن ارزش کربن افزایش و با افزایش نرخ تنزیل به دلیل هزینه فرصت جنگلکاری کاهش می‌یابد. در این تحقیق ارزش اقتصادی (تولید چوب) و ارزش زیست‌محیطی (ترسیب کربن) بررسی شده است و فرض بر این است که هدف مدیریت جنگل، حداکثر کردن ارزش خالص فعلی هر دو نوع تولید جنگل (چوبی و غیرچوبی) در سری‌های دوره‌ای متناهی است. هدف این تحقیق تعیین سن بهینه بهره‌برداری جنگلکاری صنوبر (*Populus deltoides* Marshall) با

جدول ۱- مشخصات جنگلکاری‌ها  
Table 1. Characteristics of plantations in study area

منطقه	قطعه	سن (سال)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	فاصله کاشت (متر)	مساحت (هکتار)
Study area	Parcel	Age (year)	Altitude (m)	Plantation distance (m <sup>2</sup> )	Area (ha)
تالش	حفظ آباد	37	13	5×3.5	89
Talesh	Hefz Abad				
شفت	چوبر ۱	38	70	3×3	66
Shaft	Choober 1				
شفت	چوبر ۹	37	70	3×4	43
Shaft	Choober 9				
سیاهکل	چالشم ۷۲۳	29	60	5×3	48
Siahkal	Chalesham 723				
لنگرود	چاف و چمخاله ۱	32	-20	5×5	38.9
Langeroud	Chaf-Chamkhaleh 1				



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی جنگلکاری‌ها

Figure 1. Geographical location of plantations in study area

## شیوه اجرای پژوهش آماربرداری و آنالیز تنه

در هر یک از قطعات جنگلکاری صنوبر یک قطعه نمونه یک هکتاری برداشت شد. به دلیل خالص بودن از لحاظ ترکیب گونه‌ای و همگنی شرایط محیطی، یک قطعه نمونه یک هکتاری برداشت شد. معیار انتخاب قطعات این بود که معرف مناسبی برای نشان دادن شرایط عرصه باشند که این موضوع با جنگل‌گردشی تعیین شد. در هر قطعه نمونه قطر برابر سینه همه درختان با کالیپر تا دقت سانتی‌متر و ارتفاع کل درخت تا دقت متر اندازه‌گیری شد.

از هر قطعه نمونه دو اصله درخت صنوبر به صورت تصادفی انتخاب و برای آنالیز تنه قطع شد (Parsapour et al., 2013; Bakhtiarvand Bakhtiari & Sohrabi, 2012). پس از ثبت ارتفاع کنده، تنه‌ها به بینه‌های ۲/۳۰ متری تقسیم شدند و از انتهای هر بینه یک دیسک تهیه شد. عرض دیسک‌ها برای جلوگیری از شکستن در هنگام حمل و نقل ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در طول بینه تا رسیدن به قطر ۱۵ سانتی‌متر دیسک تهیه شده و ارتفاع تا نوک بینه ثبت شد.

سطح دیسک‌ها با سنباده صیقل داده شد و دوایر سالیانه شمارش شد تا سن درخت در ارتفاع‌های مختلف درخت مشخص شود. برای اندازه‌گیری قطر درختان، دو قطر کوچک و بزرگ عمود بر هم مشخص و برحسب میلی‌متر اندازه‌گیری شد. پهنای دوایر سالیانه به منظور تعیین رویش قطری و حجمی سالیانه با استفاده از بینوکولار تا دقت یک‌صدم میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

حجم با استفاده از فرمول اسمالیان (رابطه ۱) تعیین شد. از مجموع حجم قطعات حجم کامل هر درخت به دست آمد (Zobeiry, 1994; Eslamdoust et al., 2015; Ghorani, 2014; Aminu et al., 2019).

$$V = \frac{1}{2}(S_a + S_b) \times L \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن  $V$ : حجم (مترمکعب هر درخت)،  $S_a$ : سطح مقطع ابتدای بینه (مترمربع)،  $S_b$ : سطح مقطع انتهایی بینه (مترمربع) و  $L$ : طول بینه (متر) است. رویش جاری (سالیانه) حجم در سنین مختلف با توجه به جدول آنالیز تنه به صورت رابطه ۲ محاسبه شده است (Zobeiry, 1994):

$$V'(t) = V_{(t+1)} - V_{(t)} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن،  $V'(t)$ : رویش جاری حجم (مترمکعب)،  $V_{(t+1)}$ : حجم در سن  $(t+1)$  (مترمکعب) و  $V_{(t)}$ : حجم در سن  $(t)$  (مترمکعب) است.

به منظور بررسی جرم حجمی چوب از مرکز دیسک به سمت بیرون دیسک، ۲۰ قطعه چوبی با ابعاد مساوی ۴ در ۴ در ۴ سانتی‌متر جدا شد. وزن و حجم اولیه نمونه‌های تهیه‌شده اندازه‌گیری شد و نمونه‌ها ۲۴ ساعت درون آب قرار داده شدند تا اشباع شوند. سپس ابعاد و حجم هر یک از نمونه‌ها توسط کولیس به دقت یک‌صدم میلی‌متر اندازه‌گیری شد. پس از تعیین حجم کاملاً اشباع، نمونه‌ها در داخل آون با درجه حرارت  $5 \pm 100$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند تا کاملاً خشک شوند. در پایان، نمونه‌ها پس از خشک شدن با ترازو توزین شدند و حجم آنها محاسبه شد. با استفاده از رابطه ۳ جرم حجمی بحرانی محاسبه شد (Henry et al., 2010; Kiaei, 2014; Mohammadi & Moayeri, 2016).

$$D_r = \frac{m_0}{v_w} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن،  $D_r$ : جرم حجمی بحرانی (کیلوگرم بر مترمکعب) چوب صنوبر،  $m_0$ : وزن خشک (کیلوگرم) و  $v_w$ : حجم اشباع (مترمکعب) است.

### اندازه‌گیری کربن

از درختان صنوبر قطع‌شده، ۲۲ دیسک برای اندازه‌گیری کربن به آزمایشگاه انتقال داده شد. کربن اندوخته‌شده در زی‌توده درخت به روش احتراق در

قیمت چوب صنوبر با استفاده از روش رگرسیون ارائه شد.

$$P_{t+1} = \alpha + \beta P_t \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن،  $P_{t+1}$  قیمت در زمان  $t+1$ ،  $P_t$  قیمت در زمان  $t$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایبی که از طریق رگرسیون به دست آمده‌اند و  $0 < \beta < 1$  است. دیدگاه دوم این است که قیمت نامانا است و طبق آزمون دیکی-فولر شرط مانایی را که پیشتر ذکر شد دارا نیست (Olschewski & Benítez, 2010; Mohammadi Limaiei, 2011; Moftakhar Juybary & Heshmatol Vaezin, 2007; Mohammadi & Lohmander, 2016). یعنی قیمت در دوره یا سال آینده کاملاً به دوره یا سال قبل وابسته است. در این صورت می‌توان قیمت را با استفاده از رابطه ۶ برآورد کرد.

$$P_{t+1} = \beta P_t \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن  $\beta=1$  است (Mohammadi Limaiei, 2011).

به منظور پیش‌بینی قیمت چوب صنوبر ابتدا مطابق رابطه ۷ قیمت‌های اسمی به قیمت‌های واقعی یا تعدیل‌شده تبدیل شدند و تورم حذف شد. از شاخص بهای کالاها و خدمات مصرفی (Consumer price index, CPI) بانک مرکزی به منظور حذف تورم و به دست آوردن قیمت‌های واقعی (تعدیل‌شده) استفاده شد و رابطه ۶ برای محاسبه قیمت واقعی چوب صنوبر به کار گرفته شد (Central Bank of Iran, 2017). این شاخص هر ساله توسط بانک مرکزی تعیین و اعلام می‌شود. عدد ۱۰۰ شاخص قیمت مصرف‌کننده در سال پایه است که تورم نسبت به آن سال حساب شده و قیمت‌های واقعی نسبت به سال پایه محاسبه می‌شود. شاخص بهای کالاها و خدمات مصرفی (CPI) معیار سنجش تغییرات قیمت کالاها و خدمات مصرفی است. این شاخص به‌منزله وسیله‌ای برای اندازه‌گیری سطح عمومی قیمت کالاها و خدمات مورد مصرف، از بهترین معیارهای سنجش تغییر قدرت خرید پول داخل کشور به‌شمار می‌رود. نرخ تورم منتهی به هر

کوره الکتریکی اندازه‌گیری شد (Arora et al., 2014; Heidari Safari Kouchi, 2016).

برای اندازه‌گیری درصد کربن، تعدادی نمونه از فاصله بین مغز تا پوست دیسک‌ها برداشت شد و نمونه‌ها در آون در دمای ۱۰۵ درجه به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. نمونه‌هایی که کاملاً خشک شدند توسط آسیاب برقی آسیاب شدند و بعد از توزین با ترازوی دیجیتال در کوره قرار داده شده و به مدت چهار ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شدند. نمونه‌های سوخته‌شده در دسیکاتور وزن شدند. با تعیین وزن خاکستر، وزن اولیه و نسبت کربن آلی به مواد آلی مقدار کربن آلی به صورت رابطه ۴ درمی‌آید (Forouzeh et al., 2008; Ghasemi Nejad, 2021; Raeini & Sadeghi, 2018; Naghdi et al., 2021).

$$OC\% = \frac{OM}{50} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن OM ماده آلی و OC کربن آلی است.

#### تعدیل قیمت چوب و کربن

قیمت چوب سرپای صنوبر در سری زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۰ از بخش بازرگانی و فروش شرکت سهامی جنگل شفاورد جمع‌آوری شد. قیمت چوب به‌ازای هر تن به ریال و براساس طبقات قطری مختلف طبقه‌بندی شده بود. طبقات قطری قیمت‌گذاری شده شامل بینه‌های ۲/۳-۲/۵ متری با قطر میانی کمتر از ۱۲ سانتی‌متر، ۱۵-۱۲ سانتی‌متر، ۱۹-۱۶ سانتی‌متر، ۲۵-۲۰ سانتی‌متر و بیشتر از ۲۶ سانتی‌متر بود.

دو دیدگاه درباره برآورد قیمت‌ها در بین اقتصاددانان وجود دارد. دیدگاه اول این است که قیمت از مدل خود کاهشی مانا پیروی می‌کند (Olschewski & Benítez, 2010; Mohammadi Limaiei, 2011). بدین مفهوم که تغییرات در یک دوره تأثیر زیادی بر قیمت دوره بعد نخواهد داشت و بهترین شیوه برآورد قیمت‌ها، میانگین قیمت‌های گذشته است که قیمت با استفاده از رابطه ۵ برآورد می‌شود. مدل پیش‌بینی

تعیین ارزش خالص فعلی برای سری دوره‌ای متناهی داده‌های مورد نیاز برای این محاسبات شامل مقدار حجم در هکتار جنگلکاری، رویش جاری سالیانه حجم، قیمت تعدیل‌شده چوب، نرخ تنزیل و درآمد حاصل از چوب است. محاسبه ارزش خالص فعلی در رابطه‌های ۸ تا ۱۲ آمده است.

$$\pi = PV_{(t)} e^{-rt} = \frac{PV_{(t)}}{e^{rt} - 1} \quad \text{رابطه ۸}$$

بهینه‌سازی

$$\max \left\{ \pi = \frac{PV_{(t)}}{e^{rt} - 1} \right\} \quad \text{رابطه ۹}$$

مشتق‌گیری

$$\frac{d\pi}{dt} = \frac{PV'_{(t)}}{e^{rt} - 1} + \frac{PV_{(t)}(-1)(e^{rt})}{(e^{rt} - 1)^2} = 0 \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$PV'_{(t)} = \frac{PV_{(t)} e^{rt}}{e^{rt} - 1} = \frac{rPV_{(t)}}{e^{rt} - 1} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$P_T V'_{(t)} = P_T V_{(t)} r \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$\pi$ : ارزش خالص فعلی (ریال)،  $P_T$ : قیمت تعدیل‌شده مورد انتظار چوب (ریال) در سال  $t$ ،  $V$ : حجم در هکتار (مترمکعب) در سال  $t$ ،  $V'$ : رویش جاری سالیانه حجم (مترمکعب) در سال  $t$  و  $r$ : نرخ تنزیل (درصد) قیمت چوب است.

در سال‌های اولیه رشد درختان، به دلیل کم بودن تولید، سود منفی است؛ زیرا درآمد کافی نیست. در این سطح تولید، درآمد نهایی بزرگ‌تر از هزینه نهایی است که نشان می‌دهد سود با افزایش تولید، اضافه می‌شود. با افزایش تولید سرانجام سود مثبت می‌شود. افزایش سود تا سطحی ادامه می‌یابد که در این سطح تولید، هزینه نهایی و درآمد نهایی برابر باشند و سطح تولید متضمن سود بهینه باشد؛ در این نقطه (سن) است که سود به بیشترین حد می‌رسد. از این سطح تولید (سن بهینه) به بعد درآمد نهایی کمتر از هزینه‌هاست. بنابراین سود افت می‌کند که مبین افزایش سریع هزینه کل تولید است. سود تنها هنگامی می‌تواند بهینه باشد که هزینه نهایی برابر با درآمد نهایی باشد.

ماه از محاسبه درصد تغییر متوسط شاخص CPI در دوازده ماه منتهی به ماه مورد نظر نسبت به دوره مشابه قبل به دست می‌آید. داده‌های پولی براساس سال پایه تعدیل شدند یا به عبارتی تصحیح پولی انجام گرفت و براساس آمار و داده‌های اقتصادی بانک مرکزی سال پایه در این پژوهش سال ۱۳۹۵ بود. بدیهی است چنانچه ماه مورد نظر اسفند باشد، به آن نرخ تورم سال مورد نظر می‌گویند.

$$P_t = \frac{P_t \times 100}{Y_t} \quad \text{رابطه ۷}$$

$P_t$ : قیمت تعدیل‌شده به سال پایه،  $P_t$ : قیمت در سال  $t$ ،  $Y_t$ : شاخص قیمت‌ها در سال  $t$  و عدد ۱۰۰ مقدار شاخص قیمت‌ها در سال پایه (۱۳۹۵) است (Lohmander & Mohammadi, 2008).

برای تعدیل قیمت کربن از سری‌های زمانی قیمت کربن در بازه ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۱ ارائه‌شده توسط European Climate Exchange استفاده شد (Asante et al., 2011; Carbon Emissions Futures (Historical Prices, 2017).

به منظور پیش‌بینی قیمت کربن ابتدا مطابق رابطه ۷ قیمت‌های اسمی به قیمت‌های واقعی یا تعدیل‌شده تبدیل و مطابق آنچه در مورد تعدیل قیمت چوب در بالا ذکر شد، عمل شد.

با توجه به اینکه قیمت کربن دارای دامنه وسیعی است و در واقع مقدار مشخصی برای آن در دنیای واقعی تعریف نشده و قیمت آن در طی زمان بسیار متغیر است، اگر اقدامات کاهش دی‌اکسید کربن جو به شیوه‌ای مقرون به صرفه انجام گیرد، قیمت کربن در طی زمان ممکن است با نرخی افزایش یابد و به بهره‌وری نهایی سرمایه نزدیک شود. در این تحقیق با بررسی منابع، متوسط نرخ تنزیل کربن در محاسبه ۳ درصد در نظر گرفته شد. نرخ‌های تنزیل صفر، ۱ و ۳ درصد که اغلب برای برآورد هزینه اجتماعی کربن در نظر گرفته می‌شوند، نشان‌دهنده نبود اجماع بر نرخی معین برای ارزش‌گذاری کربن تا به امروز است (Ekholm, 2016).

## تعیین سن بهینه بهره‌برداری

تا زمانی به درخت اجازه رشد داده می‌شود که نرخ بازدهی حاصل از رشد درخت با نرخ بهره بازار (بازدهی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های دیگر) برابر باشد. بنابراین معیار قطع درختان زمانی است که در هر نرخ بهره، ارزش فعلی سود خالص حداکثر باشد. مطابق رابطه ۱۲ ارزش خالص فعلی این سرمایه‌گذاری زمانی حداکثر می‌شود که درآمد نهایی (سمت راست رابطه ۱۲) فروش چوب با هزینه فرصت ازدست‌رفته سرمایه با مقدار خالص تنزیل برابر باشد (Assmuth & Tahvonen, 2018). به عبارت دیگر درآمد نهایی برابر با هزینه نهایی باشد (Adetoye et al, 2018). بنابراین قطع بهینه، زمانی است که درآمد نهایی و هزینه نهایی مساوی شود (Faustmann, 1849).

از مجموع ارزش خالص فعلی چوب و کربن، نقطه‌ای که حداکثر این مقدار حاصل شود، سن بهینه بهره‌برداری بهینه چوب و کربن است که به صورت رابطه ۱۳ نشان داده شده است که در واقع نقطه بهینه‌ای که در سناریوهای ارزش چوب و کربن به‌طور توأم به دست می‌آید.

$$NPV_S = \sum_{t=1}^n NPV_{T(t)} + NPV_{C(t)} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$NPV_S$ : ارزش خالص فعلی کل،  $NPV_T$ : ارزش خالص فعلی چوب و  $NPV_C$ : ارزش خالص فعلی کربن است.

## نتایج

مشخصات کمی توده‌ها در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مشخصات کمی جنگلکاری‌ها

Table 2. Quantitative characteristics of plantations in study area

Parcel	تراکم (تعداد در هکتار) Density (N/ha)	میانگین قطر برابر سینه (سانتی‌متر) Mean DBH (cm)	میانگین ارتفاع (متر) Mean height (m)	میانگین سطح مقطع برابر سینه (مترمربع در هکتار) Mean basal area (m <sup>2</sup> /ha)	میانگین افزایش قطر در سال Annual diameter increment (m <sup>2</sup> /ha/yr)	رویش جاری سالیانه (مترمکعب در هکتار در سال) Annual increment based on age (m <sup>3</sup> /ha)	رویش متوسط بر حسب سن (مترمکعب در هکتار) Mean annual increment based on age (m <sup>3</sup> /ha)	حجم (مترمکعب در هکتار) Volume (m <sup>3</sup> /ha)	نسب کربن (تن در هکتار) Carbon sequestration (ton/ha)
حفظ‌آباد Hefz Abad	190	35.04±7.06	26.74±5.85	19.04±0.04	12.07	7.71	285.33	52	
چوب ۱ Choober 1	326	26.59±6.85	19.01±4.11	19.29±0.03	10.28	5.58	212.29	38.7	
چوب ۹ Choober 9	145	35.67±6.28	23.22±3.36	17.50±4.9	17.8	4.85	179.36	26.02	
چالشام ۷۲۳ Chalesham 723	216	27.59±4.67	21.68±1.98	13.27±0.02	9.08	5.36	155.58	28.3	
چاف و چمخاله Chaf-Chamkhaleh 1	129	30.68±7.54	22.93±4.61	10.10±0.04	4.75	4.14	132.48	24.16	



با در نظر گرفتن مدل‌های خودکاهشی (جدول ۳) و مؤلفه‌های برآوردشده ( $\alpha$  و  $\beta$ ) قیمت تعدیل‌شده چوب صنوبر در جدول ۴ نشان داده شده است. سن بهره‌برداری بهینه جنگلکاری‌های یادشده با توجه به ارزش خالص فعلی چوب صنوبر (رابطه ۱۰)، یعنی زمانی که درآمد نهایی برابر هزینه باشد در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ نشان داده شده است. محتوای کربن بخش‌های مختلف درختان صنوبر دلتوئیدس در جدول ۵ ارائه شده است.

معادله‌های تعدیل قیمت چوب صنوبر براساس طبقات قطری مورد نظر در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که رابطه معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد و سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ بین قیمت پیش‌بینی‌شده در سال آینده  $P_{t+1}$  به‌عنوان متغیر وابسته و  $P_t$  به‌عنوان متغیر مستقل وجود دارد. مقادیر آماره  $t$  به‌دست‌آمده بزرگ‌تر از جدول آماره  $t$  (۲/۰۶) است و روابط به‌دست‌آمده از لحاظ آماری معنی‌دار است. معادله‌های رگرسیونی برای تعیین میانگین قیمت مورد انتظار صنوبر براساس قطر بینه‌ها به‌صورت معادله در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- تعدیل قیمت چوب طبقات قطری گرده‌بینة صنوبر (۱۴۰۰-۱۳۷۵)

Table 3. Adjusted price of timber diameter classes of round wood from 1996 to 2022

قطر (سانتی‌متر) Diameter (cm)	معادله قیمت تعدیل‌شده (ریال) Adjusted price equation (Iranian Rials)	R <sup>2</sup>	P-value	t-test	SE
<12	$P_{t+1}=207102.0+0.4658720 P_t$	0.9990	0.041469	2.171	95358.23
12-15	$P_{t+1}=525535.2+0.473328 P_t$	0.9940	0.020538	2.505	209762.2
16-19	$P_{t+1}=581810.2+0.469544 P_t$	0.9990	0.015865	2.623	221742.1
20-25	$P_{t+1}=591786.4+0.467852 P_t$	0.9997	0.015305	2.640	224148.3
26<	$P_{t+1}=822111.8+0.433708 P_t$	0.9997	0.006919	2.993	274603.5

جدول ۴- میانگین قیمت تعدیل‌شده مورد انتظار صنوبر در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۷۵ (سال پایه ۱۳۹۵)

Table 4. Mean adjusted price of Poplar timber from 1996 to 2022 (2016 base year)

قطر (سانتی‌متر) Diameter (cm)	قیمت تعدیل‌شده هر تن چوب صنوبر (ریال) Mean adjusted price a tone Poplar timber (Rials)
<12	387738
12-15	997842
16-19	1096811
20-25	1112070
26<	1451746
Mean	1009242

جدول ۵- سهم کربن در تنه درختان صنوبر و ضرایب استفاده‌شده در تجزیه و تحلیل

Table 5. Carbon content in stem of *P. deltoides* and coefficients used in analysis

کربن و ضرایب استفاده‌شده Carbon content and coefficients used in analysis	مقدار value
کربن تنه (درصد) Stem carbon (%)	56.7±0.26
چگالی چوب (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Wood density (gr/cm <sup>3</sup> )	0.32
عامل تبدیل حجم و کربن (تن به مترمکعب) Conversion factor of volume to carbon (ton/m <sup>3</sup> )	V= 0.1792 C R <sup>2</sup> =0.99

V: volume (m<sup>3</sup>), C: carbon (tone)

### تعیین سن بهینه بهره‌برداری

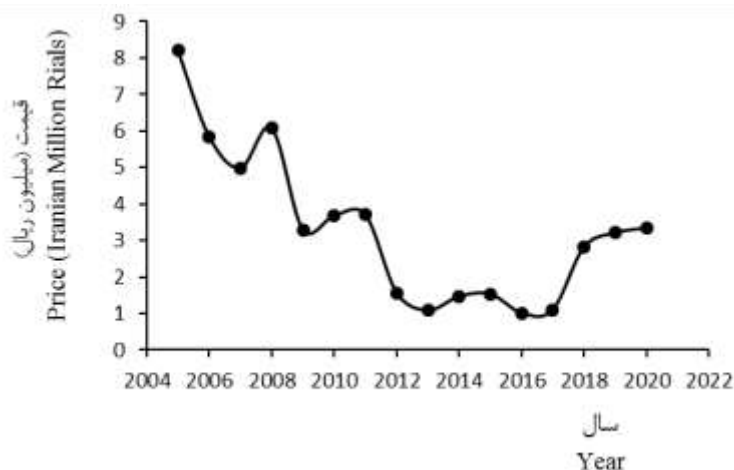
سن بهینه بهره‌برداری براساس ارزش خالص فعلی چوب محاسبه شده در حفظ آباد تالش ۷ سال، در پارسل یک و نه چوبر ۸ سال، در چالشم ۶ سال و در جنگلکاری چاف و چمخاله ۹ سال به دست آمد (شکل ۳).

سن بهینه بهره‌برداری در سری‌های دوره‌ای متناهی با توجه به ارزش خالص فعلی کربن در شکل ۴ نشان داده شده است. این سن با توجه به ارزش کربن در حفظ آباد و پارسل یک چوبر ۱۴ سال، در پارسل نه چوبر و چالشم، ۱۱ سال و در چاف و چمخاله لنگرود ۱۵ سال به دست آمد (شکل ۴).

سن بهینه بهره‌برداری در سری‌های دوره‌ای متناهی با توجه به ارزش خالص فعلی چوب و کربن در شکل ۵ نشان داده شده است. سن بهینه بهره‌برداری با توجه به ارزش خالص فعلی چوب و کربن در حفظ آباد ۸ سال، در پارسل یک و نه چوبر ۹ سال، در چالشم ۷ سال و در چاف و چمخاله لنگرود ۱۰ سال به دست آمد (شکل ۵).

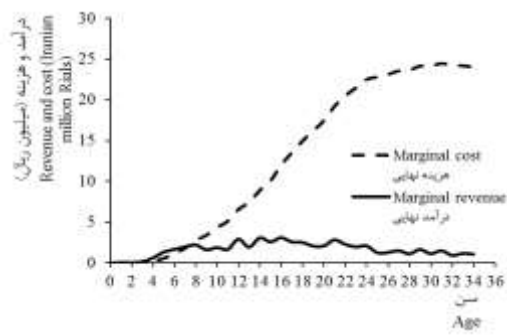
قیمت کربن به‌ازای هر تن کربن به یورو است که با استفاده از نرخ ارز تبدیل به ریال و شاخص قیمت‌ها، تورم حذف شده است یا به عبارت دیگر قیمت کربن واقعی و تعدیل شده است. شکل ۲ تغییرات قیمت تعدیل شده کربن از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. برای قیمت کربن، شرط مانایی با استفاده از مدل رگرسیون پیش‌بینی قیمت کربن در سطح احتمال ۹۵ درصد رد شد؛ به طوری که قیمت تعدیل شده با استفاده از مدل مانا معنی‌دار نبود. بنابراین برای به دست آوردن قیمت تعدیل شده کربن از مدل نامانا (رابطه ۵) استفاده شد، بدین معنا که قیمت در دوره یا سال آینده کاملاً به دوره یا سال قبل وابسته است.

معادله قیمت تعدیل شده کربن مطابق رابطه ۵ به صورت  $P_{t+1} = 1/0.415 P_t$  برابر ۳,۳۰۳,۵۸۹ ریال به ازای هر تن به دست آمد.

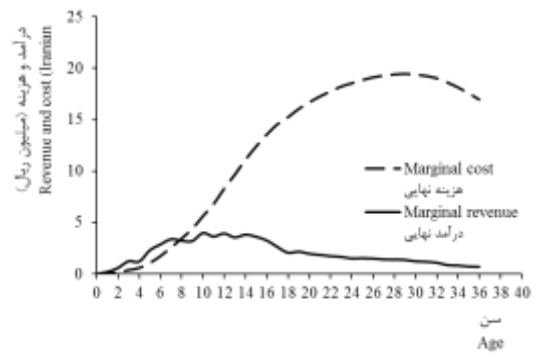


شکل ۲- قیمت تعدیل شده کربن (تن) از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۱ (سال پایه ۱۳۹۵)

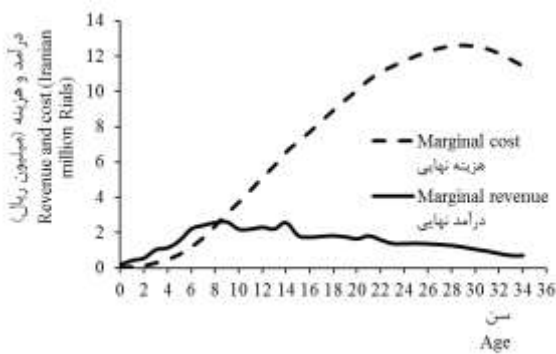
Figure 2. Adjusted price of carbon (tone) from 2005 to 2021 (2016 base year)



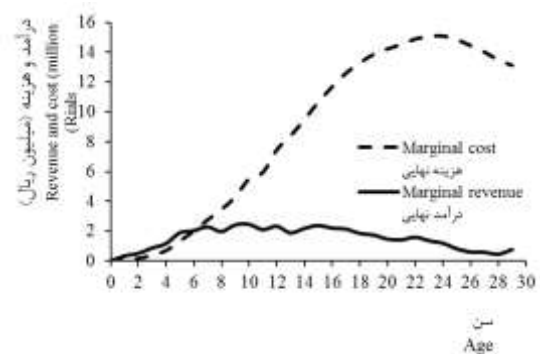
حفظ آباد  
Hefz Abad



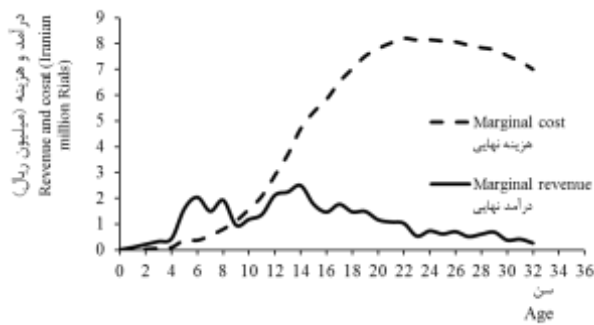
چوبر ۱  
Chobar 1



چوبر ۹  
Chobar 9

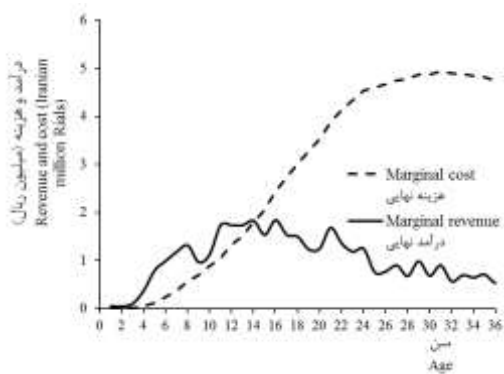


چالشم  
Chalesham

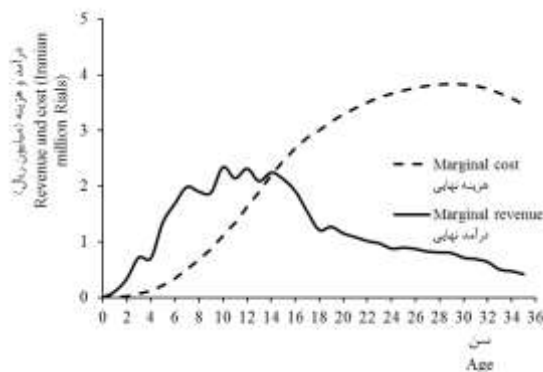


چاف و چمخاله  
Chaf-Chamkhaleh

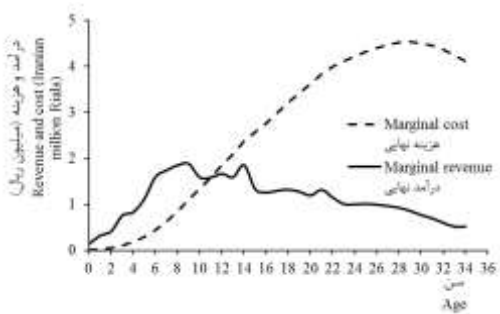
شکل ۳- سن بهینه بهره‌برداری با توجه به ارزش خالص فعلی چوب  
Figure 3. Optimum rotation in regard to NPV of timber



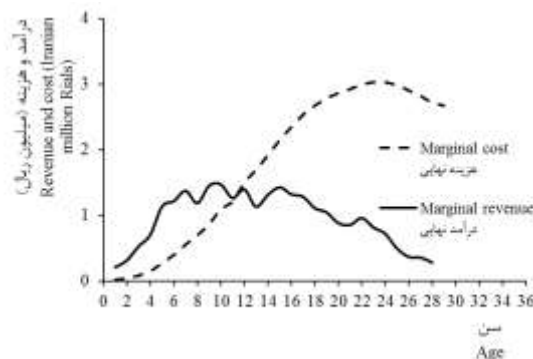
حفظ آباد  
Hefz Abad



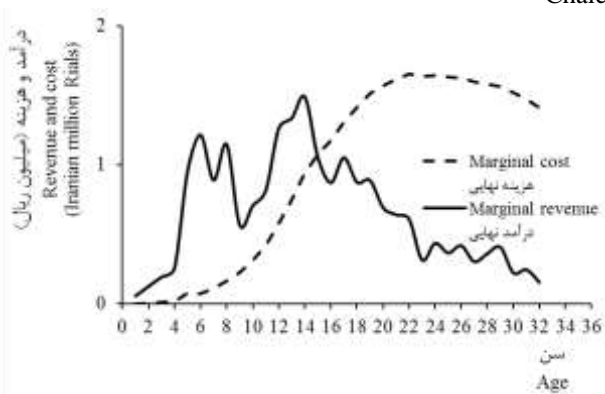
چوبر ۱  
Chobar 1



چوبر ۹  
Chobar 9

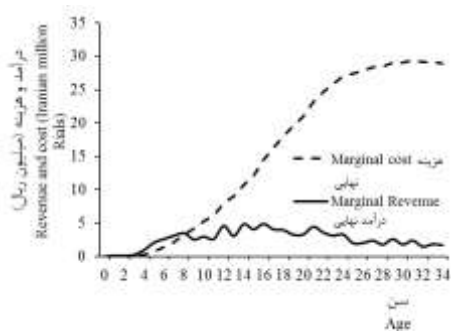


چالشم  
Chalesham

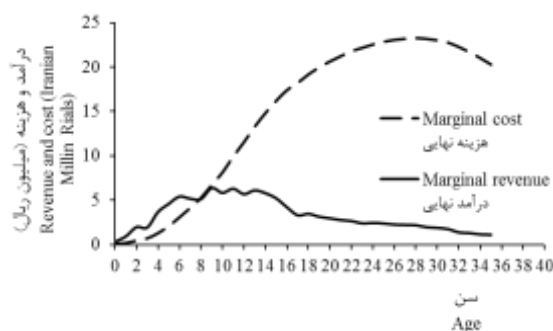


چاف و چمخاله  
Chaf-Chamkhaleh

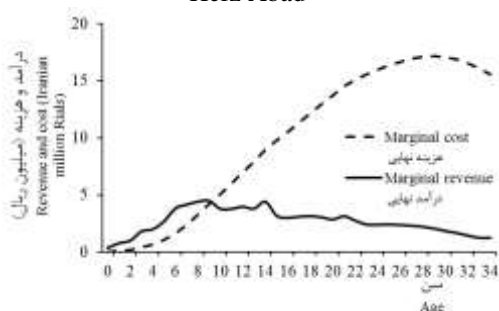
شکل ۴- سن بهینه بهره‌برداری با توجه به ارزش خالص فعلی کربن  
Figure 4. Optimum rotation in regard to NPV of carbon



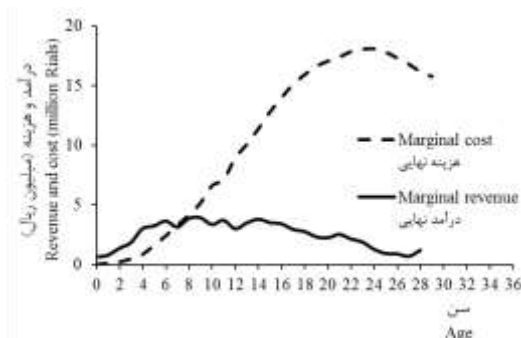
حفظ آباد  
Hefz Abad



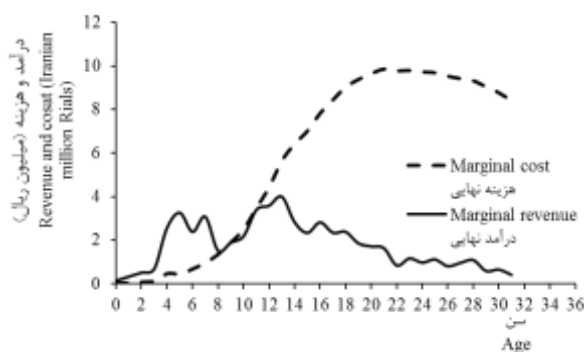
چوبر ۱  
Chobar 1



چوبر ۹  
Chobar 9



چالشم  
Chalesham



چاف و چمخاله  
Chaf-Chamkhaleh

شکل ۵- سن بهینه بهره‌برداری با توجه به ارزش خالص فعلی چوب و کربن  
Figure 4. Optimum rotation in regard to NPV of timber and carbon

جنگلکاری‌های مورد نظر به صورت سیستم جنگل‌شناسی همسال اداره می‌شوند. هر چرخش با استقرار توده در زمین عاری از پوشش آغاز می‌شود و با قطع یکسره پس از یک دوره معین رشد به پایان می‌رسد. شروع چرخش بعدی با پایان چرخش قبلی همراه است.

سهم کربن تنه و شاخه‌ها در تحقیق Zhang et al.

**بحث**

تاکنون نظریه‌های مختلفی برای تعیین سن بهینه بهره‌برداری جنگل بیان شده است. این نظریه‌ها براساس معیارهای اقتصادی، زیستی و فیزیکی بوده است. متخصصان و کارشناسان اساس تعیین سن بهینه بهره‌برداری را معیار اقتصادی پیشینه کردن درآمد خالص تعیین کرده‌اند (Asante, 2011).

ترتیب گونه‌های تندرشد کربن بیشتری ترسیب می‌کنند؛ بنابراین مدیریت توده برای تولید چوب بیشتر بر ذخیره کربن اثر مثبت دارد. مقدار ترسیب کربن در جنگلکاری‌های بررسی شده ۲۴/۱۶ تا ۵۲ تن در هکتار بود، در حالی که زی‌توده بخش‌های هوایی ارقام صنوبر در جنگلکاری‌های خرم‌آباد با گونه *Pinus nigra* L. مقدار رویش را ۲/۶۷ مترمکعب در سال و ترسیب سالانه کربن را ۲/۵ تن در هکتار در سال گزارش کردند (Jahanpour et al., 2019) که در مقابل اعداد حاصل از تحقیق حاضر (۲۴/۱۶ تا ۵۲ تن در هکتار) بسیار ناچیز است. سری‌های زمانی قیمت چوب شرط مانایی را دارا بود (جدول ۳) و به دلیل معنی‌دار نبودن رابطه خودکاهشی مانا از میانگین قیمت خالص برای کربن استفاده شد (شکل ۲) و قیمت ۳،۳۰۳،۵۸۹ ریال به دست آمد. نتایج مربوط به داده‌های قیمت واقعی (تعدیل شده) با استفاده از کسر میزان تورم از قیمت اسمی آنها و نمودارهای مربوط در رابطه با زمان به دست آمده است. مقادیر قیمت به یورو است و با استفاده از نرخ ارز در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۱ و شاخص قیمت‌ها با حذف تورم و تبدیل به ریال به دست آمده است.

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که سن بهینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن ارزش کربن بیشتر از سن بهینه با در نظر گرفتن ارزش اقتصادی چوب است. پیشنهاد می‌شود که تعیین ارزش فعلی آسیب‌های اقلیمی در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای در طی زمان (تقدم انتشار آینده به حال) و تأثیر آن بر سن بهره‌برداری و ذخیره کربن در پژوهش‌های آینده بررسی شود.

### سپاسگزاری

این تحقیق مستخرج از طرح پژوهشی با حمایت مالی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان است. بدین وسیله از مدیر کل محترم، معاونت فنی و ناظران طرح تشکر و قدردانی می‌شود.

(2020) روی صنوبر در چین به ترتیب ۴۶/۶ و ۴۶/۳ درصد و در تحقیق حاضر به ترتیب ۵۵/۶ و ۵۷/۳ درصد بود. علل متفاوتی در محتوای کربن تنه مؤثرند، مثل شرایط حاصلخیزی رویشگاه، ویژگی‌های ژنتیکی، سن، شرایط جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و ... ارزش چوب و ترسیب کربن دو هدف متناقض‌اند، با اضافه شدن ارزش ترسیب کربن به ارزش چوب، ارزش خالص کل حاصل از جنگل طی زمان افزایش می‌یابد (Henry et al., 2010; Van Kooten et al., 1995). نتایج بسیاری از پژوهش‌ها نشان داده که سن بهینه بهره‌برداری با توجه به ارزش کربن بیشتر از سن بهینه با در نظر گرفتن ارزش اقتصادی چوب است (Diaz- Balteiro & Rodriguez, 2006; Ekholm, 2016; Henry et al., 2010; Kiaei, 2014; Van Kooten et al., 1995). ارزش خالص فعلی در جنگل با افزایش سن توده، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که دلیل آن تغییر مقدار رویش و تولید است (شکل ۴).

مطابق نتایج تحقیق (Huang et al., 2002) سن بهینه بهره‌برداری صنوبر در فواصل کاشت ۶ در ۵ متر، ۱۱ سال به دست آمد. (Tang et al., 2009) سن بهره‌برداری صنوبر در فواصل کاشت ۶ در ۴ را ۱۳ سال گزارش کرده و دلایل اختلاف سن بهره‌برداری را شرایط حاصلخیزی رویشگاه و ژنوتیپ گونه دانسته‌اند که بر رویش تأثیر بسزایی دارند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که جنگلکاری قطعه ۹ چوب‌ر بیشترین رویش و رشد قطری را داشته و سن بهره‌برداری آن با توجه به ارزش خالص فعلی چوب ۸ سال به دست آمده است.

جنگل تأثیر مهمی در تعادل کربن اکوسیستم‌های زمینی دارد. تعیین سن بهینه بهره‌برداری راهی مؤثر در مدیریت ارزش‌های چندگانه جنگل‌هاست و بر مدیریت ساختار و ترکیب جنگل‌ها و کیفیت و کمیت چوب و جنگل اثر می‌گذارد (Henry et al., 2010). نوعی جریان پایدار حاصل از چوب و ترسیب کربن مطابق با رویش و موجودی سرپا در جنگل‌ها وجود دارد. مقدار ترسیب کربن در جنگل بستگی زیادی به رویش زی‌توده و تولید چوب در جنگل دارد. بدین

## References

- Adetoye, A.M., Okojie, L.O., & Akerele, D. (2018). Forest carbon sequestration supply function for African countries: An econometric modelling approach. *Forest Policy and Economics*, 90, 59-66. DOI:10.1016/j.forpol.2018.01.007
- Aminu, S.A., Daniel, S., & Yakubu, I. (2019). Tree Volume Equation for *Populus deltooides* (Poplar) Tree under Agroforestry Based. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(2), 1470-1475. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.802.170>
- Arora, G., Chaturvedi, S., Kaushal, R., Nain, A.S., Tewari, S.K., Alam, N.M., & Chaturvedi, O.P. (2014). Growth, biomass, carbon stocks, and sequestration in age series of *Populus deltooides* plantations in Tarai region of central Himalaya. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38, 550-560. DOI:10.3906/tar-1307-94
- Asante, P.W., Armstrong, G.L., & Wiktor, A. (2011). Carbon sequestration and the optimal forest harvest decision: A dynamic programming approach considering biomass and dead organic matter. *Journal of Forest Economics*, 17(1), 3-17. DOI:10.1016/j.jfe.2010.07.001
- Askarii, Y., Iranmanesh, Y., & Pourhashemi, M. (2021). The economic value and comparison of carbon storage in different forest areas in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province. *Iranian Journal of Forest*, 13(2), 169-182. (In Persian)
- Assmuth, A., & Tahvonen, O. (2018). Optimal carbon storage in even- and uneven-aged forestry. *Forest Policy and Economics*, 87, 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.09.004>
- Bakhtiarvand Bakhtiari, S., & Sohrabi, H. (2012). Allometric equations for estimating above and below-ground carbon storage of four broadleaved and coniferous trees. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 20(3), 481-492. (In Persian)
- Ben Abdallah, S., & Lasserre, P. (2017). Forest land value and rotation with an alternative land use. *Journal of Forest Economics*, 29(B), 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.09.002>
- Carbon Emissions Futures Historical Prices (2017). Available at <https://www.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>.
- Central Bank of Iran (2017). [www.cbi.ir](http://www.cbi.ir). Inflation/Inflation\_FA.asp.
- Creedy, J., & Wurzbacher, A. (2001). The economic value of a forested catchment with timber, water and carbon sequestration benefits. *Ecological Economy*, (38), 71-83.
- Diaz-Balteiro, L., & Rodriguez, L.C.E. (2006). Optimal rotation on Eucalyptus plantations including carbon sequestration a comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecology and Management*, (229), 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.005>
- Ekholm, T. (2016). Optimal forest rotation age under efficient climate change mitigation. *Forest Policy and Economics*, (62), 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.10.007>
- Englin, J., & Callaway, J. (1995). Environmental impacts of sequestering carbon through forestation. *Climate Change*, (31), 67-78.
- Eslamdoust J., Sohrabi H., & Hosseini, S.M. (2015). Evaluation of growth Feature of *Populus deltooides* and *Taxodium distichum* trees using stem analysis. *Journal of Natural Ecosystems of Iran*, 5(3), 51-58. (In Persian)
- Faustmann, M. (1849). Calculation of the value which forest land and immature stands process for forestry. *Journal of Forest Economy*, (1), 7-44. Reprinted in 1995.
- Forouzeh, M.R., Heshmati, A., Ghanbariyan, Gh.A., & Mesbah, S.H. (2008). Comparison potential carbon sequestration *Helianthemum lippii* (Pers.), *Dendrostellera lessertii* (Van Tigeh.) and *Artemisia sieberi* Besser in arid rangeland of Iran (case study: Garbayegan Fasa in Fars province). *Iranian Journal of Environmental Science*, 46(2), 65-72. (In Persian)

- Ghasemi Nejad Raeini, M., & Sadeghi, H. (2018). Evaluation of carbon sequestration in soil and plant organs of *Zygophyllum atriplicoides* and *Gymnocarpus decander* (Case study: Saleh-Abad, Hormozgan). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24(4), 699-707. (In Persian)
- Ghorani, G., Jahani, A., & Sardabi, H. (2014). Estimation of Standing Volume in *Populus Deltoides* Marsh. Plantations By Huber And Smalian Methods At Shafaroud Forest, Guilan Province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(1), 55, 74-81. (In Persian)
- Hartman, R. (1976). The harvesting decision when a standing forest has value. *Economic Inquiry*, 14, 52-58.
- Heidari Safari Kouchi, A., Y. Iranmanesh & Rostami Shahraji, T. (2016). Above-ground and soil carbon sequestration of white poplar (*Populus alba* L.) species in four different planting spaces in Chaharmahal and Bakhtiari province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(2), 200-213. (In Persian)
- Henry, M., Besnard, A., Asante, W.A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., Bernoux, M., & Saint-André, L. (2010). Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, (260), 1375-1388. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.040>.
- Heshmatol Vaezin, S.M., Khezriyan, B., Namiranian, M., Hajjarian, M., Janat Babaii, M., & Shaykhanlooy Milan, F. (2020). 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. *Iranian Journal of Forest*, 12(2), 233-256. (in Persian)
- Huang, Q.F., Sun, Q.X., Wu, Z.M., & Xiang, Y.A. (2002). Study on principal felling age of poplar plantation on Changjiang River beach. *Scientia Silvae Sinica*, (39), 154–158. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20020626.
- Jahanpour, F., Derikvandi, A., Ramak, P., Ghasemi, R.A., Calagari, M., & Karamian, R. (2019). Investigation On Adaptation and Growth Characteristics of Different Closed-Crown Poplar Clones Under Climatological Conditions Of Khorram Abad. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 4(74), 471 - 482. (in Persian)
- Keleş, S. (2017). Determining optimum cutting ages including timber production and carbon sequestration benefits in Turkish pine plantations. *Sains Malaysiana*, 46(3), 381-386. <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2017-4603-04>.
- Kiaei, M. (2014). Investigation on wood properties of Eldar pine (*Pinus eldarica* Medw) and its relations to soil chemical and physical characteristics (in western of mazandaran province plantation). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 29(2), 199-207. (in Persian)
- Latifi nia, A., Soosani, J., Adeli, K., Otakh, E., & Namdari, S. (2021). Study on Growth Performance of Pinus Brutia Ten in the Oldest Plantation Stand of in Khorramabad. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(5), 189-200. (in Persian)
- Liski, J., Pussinen, A., Pingoud, K., Makipaa, R., & Karjalainen, T. (2001). Which rotation length is favourable to carbon sequestration?. *Canadian Journal of Forest Research*, (31), 2004-2013. <https://doi.org/10.1139/x01-140>.
- Lohmander, P., & Mohammadi Limaiei, S. (2008). Optimal continuous cover forest management in an uneven-aged forest in the north of Iran. *Journal of Applied Sciences*, 8(11), 1995-2007. DOI: 10.3923/jas.2008.1995.2007
- Metsaranta, J.M., & Bhatti, J.S. (2016). Evaluation of Whole Tree growth increment derived from tree-ring series for use in assessments of changes in forest productivity across various spatial scales. *Forests*, 7(303), 1-11. <https://doi.org/10.3390/f7120303>



- Moftakhar Juybary, M., & Heshmatol Vaezin, S.M. (2016). Seasonal Fluctuations Assessment of Log and Lumber Prices Using Multiple Regression Analysis: Case Study of Azarood Forest, Mazandaran. *Journal of Forest and Wood Products*, 68(2), 371-382. (In Persian).
- Mohammadi Limaiei, S. (2011). Economics optimization of forest management, *LAP LAMBERT Academic Publication*, Germany, 140 pp.
- Mohammadi Limaiei, S., & Lohmander, P. (2007). Stumpage prices in the Iranian Caspian forests. *Asian Journal of Plant Sciences*, (6), 1027-1036. DOI: 10.3923/ajps.2007.1027.1036
- Mohammadi Limaiei, S., Bahramabadi, Z., Shahraje, T.R., Adibnejad, M., & Koupar, S.A.M. (2013). Determination of economically optimal rotation age of (*Populus deltoides*) in Guilan Province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(1), 63-75. (In Persian)
- Mohammadi Limaiei, S., Heybatian, R., Heshmatol Vaezin, S.M., & Torkman, J. (2011). Wood import and export and its relation to major macroeconomics variables in Iran. *Forest Policy and Economics*, 13 (4), 303-307. DOI:10.1016/j.forpol.2011.03.001.
- Mohammadi, A. & Moayeri, M.H. (2016). Determining the harvest age (Economic) of even-aged stands of Paulownia plantation in Dr. Bahramnia's Forestry Plan. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 23(2), 203-223. (In Persian)
- Naghdi, R., Mirzaei, M., Aghajani, A.H., & Torkaman, J. (2021). Estimation stock and economic value of carbon storage of root and stump of *Populus deltoides* in poplar plantation of Guilan province. *Iranian Journal of Forest*, 13(2), 197-208. (In Persian).
- Nghiem, N. (2014). Optimal rotation age for carbon sequestration and biodiversity conservation in Vietnam. *Forest Policy and Economics*, (38), 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.04.001>
- Olschewski, R., & Benítez, P.C. (2010). Optimizing joint production of timber and carbon sequestration of afforestation projects. *Journal of Forest Economics*, 16(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2009.03.002>
- Parsapour, M.K., Sohrabi, H., Soltani, A., & Iranmanesh, Y. (2013). Allometric equations for estimating biomass in four poplar species at Charmahal and Bakhtiari province. *Iranian Journal of Forest and Poplar*, 21(3), 517-528. (In Persian)
- Rhodes, C.J. (2016). The 2015 Paris Climate Change Conference: COP21. *Science Progress*, 99(1), 97-104.
- Tang, W.P. (2009). *Density Control Techniques and Successive Planting Effect of Poplar Plantation in Jiangnan Plain*. Ph.D. Thesis, Beijing Forestry University, Beijing, China.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2007). The mechanisms under the Kyoto Protocol: The Clean Development Mechanisms, *Joint Implementation and emission trading*. Available at [http://www.unfccc.int/Kyoto\\_protocol/mechanisms/items/1673.php](http://www.unfccc.int/Kyoto_protocol/mechanisms/items/1673.php).
- Van Kooten, G.C., Binkley C.S., & Delcourt, G. (1995). Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. *American Journal of Agricultural and Economics*, 77(2), 365-374.
- Zhang, Y., Tian, Y., Ding, S.L.Y., Samjhana, W., & Fang, Sh. (2020). Growth, Carbon Storage, and Optimal Rotation in Poplar Plantations: A Case Study on Clone and Planting Spacing Effects. *Forests*, 11 (842), 1-15. <https://doi.org/10.3390/f11080842>.
- Zhou, W., & Gao, L. (2016). The impact of carbon trade on the management of short-rotation forest plantations. *Forest Policy and Economics*, (62), 30-35. DOI: 10.1016/j.forpol.2015.10.008.
- Zobeiry, M. 1994. *Forest inventory (Measurement of tree and forest)*. Tehran University Press, 3, 401.



*Research Article*

## Rotation Age of *Populus deltoides* Marshall. Based on Optimizing Net Present Value of Timber and Carbon Sequestration at the Finite Series of Identical in Gilan

T. Abedi<sup>\*</sup>, H.R. Maskani<sup>2</sup>, R. Abedi<sup>3</sup>, and B. Bakhshandeh<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Assistant prof., Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research, Rasht, Iran

<sup>2</sup> Assistant prof., Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research, Rasht, Iran

<sup>3</sup> Associate Prof., Dept. of Forestry, Ahar Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tabriz, Iran

<sup>4</sup> General Dept. of Natural Resources and Watershed Management of Gilan Province, Rasht, Iran

(Received: 15 March 2022; Accepted: 20 August 2022)

### Abstract

The aim of this study was to determine the optimal rotation age of even-aged forests with respect to timber and non-timber values by developing the Faustmann model. We conducted the study in four regions of *Populus deltoides* Marshall. plantations located in the west (Hefz-Abad in Talesh), center (Chobar in Shaft), east (Chalesham in Siahkal), and coastal region (Chaf-chamkhaleh in Langeroud) of Gilan province. We determined the volume increment by the stem analysis method and carbon sequestration by combustion in an electric oven. Then, Net Present Value (NPV) of timber and carbon sequestration is calculated by using volume increment, carbon amount, discount rate, adjusted timber price by stationary autoregressive model, carbon price by non-stationary model, the marginal revenue and marginal cost at the finite series of identical. Results showed that when the economic value of timber is considered, optimal rotation ages are 6-9 years. Optimal rotation ages when carbon sequestration is considered increased to 11-15 years. Integration of carbon sequestration value into timber economic value increased the optimal rotation ages to 7-10 years.

**Keywords:** Adjusted Price, Carbon Value, Increment, Marginal Revenue, Stem Analysis.