

مدیریت بهینه جنگل با استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی آرمانی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی در جنگل‌های هیرکانی

سیده سوما اعتماد^{۱*}، سلیمان محمدی لیمائی^۲ و رسول یوسف‌پور^۳

۱- دانشجوی دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. (s.etemad7@gmail.com)

۲- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. (limaei@guilan.ac.ir)

۳- استادیار، گروه اقتصاد جنگلداری و برنامه‌ریزی جنگل، دانشگاه فرایبورگ، فرایبورگ، آلمان. (rasoul.yousefpour@ife.uni-freiburg.de)

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۲۳

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۱۸

چکیده

هدف از این تحقیق تعیین سطح بهینه موجودی در جنگل‌های ایران است. در این بررسی، از مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای محاسبه حجم بهینه گونه‌های مختلف با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی استفاده شد. در این روش چندین هدف در فرآیند تصمیم‌گیری برای رسیدن به حداکثر ارزش خالص فعلی، ترسیب کربن و اشتغال مدنظر قرار گرفت. از تحلیل رگرسیون برای تعیین مدل رویش جنگل استفاده شد. همچنین از معادلات آلومتریک برای تعیین مقدار ترسیب کربن استفاده شد. سپس میانگین قیمت مورد انتظار با استفاده از قیمت چوب و هزینه‌های بهره‌برداری برای تعیین ارزش خالص فعلی برآورد شد. برای وزن‌دهی اهداف و تعیین موجودی بهینه در جنگل، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و نظر متخصصین با استفاده از پرسشنامه استفاده شد. بر اساس نتایج، حجم بهینه برای راش ۲۵۶/۲ مترمکعب در هکتار، ممرز ۶۱/۲ مترمکعب در هکتار، بلوط ۳۸/۸ مترمکعب در هکتار، توسکا ۲۰/۴ مترمکعب در هکتار و دیگر گونه‌ها ۲۰/۴ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که حجم بهینه کل ۳۹۷/۰۰۵ مترمکعب در هکتار محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، ترسیب کربن، جنگل‌های شفا رود، مدیریت چندمنظوره.

مقدمه

طی چند دهه گذشته مدیریت جنگل در سراسر جهان از یک مدل تک هدفه و مبتنی بر یک منبع خاص، بر روی چندین موضوع متمرکز شده و در راستای تحقق اهداف چندگانه گام برمی‌دارد؛ بنابراین برای تصمیم‌گیری و رسیدن به اهداف متعدد در مدیریت جنگل در راستای حفظ جنگل‌ها و ارائه محصولات و خدمات ارزشمند اکولوژیکی در آینده، به ابزار و روش‌های جدیدی نیاز خواهد بود (Sporcic *et al.*, 2010) و روش تصمیم‌گیری چند معیاره، به‌عنوان ابزاری مناسب در زمینه مسائل و موضوعات چندهدفه در نظر گرفته شده است (Mohammadi Limaie *et al.*, 2014, Amiri *et al.*, 2017). روش‌هایی برای برنامه‌ریزی مدیریت جنگل برای ادغام اهداف متعدد وجود دارد که یکی از آن‌ها روش برنامه‌ریزی آرمانی (Goal Programming) است (Diaz-Balteiro *et al.*, 2013). برنامه‌ریزی آرمانی یک مدل ریاضی و شاخه‌ای از بهینه‌سازی چندهدفه است که ابتدا توسط Charnes and Cooper (1971) معرفی شد. این روش می‌تواند به‌طور هم‌زمان چندین هدف را مورد تحلیل قرار داده و بهترین راه‌حل را برای اهداف موردنظر با توجه به محدودیت‌ها و اولویت‌های آن ارائه دهد. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) که اولین بار توسط Saaty (1980) ابداع شد، به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای تخمین وزن در موارد مختلف است. در این روش، اجزا در هر سطح سلسله‌مراتب، جفت‌جفت باهم مقایسه می‌شوند تا ترجیح نسبی هریک در راستای گزینه‌ها تعیین شود (Pohekar and Ramachandran, 2004). عدم اطمینان موجود در قضاوت‌های ترجیحی منجر به ارائه روش AHP فازی توسط Chang and Buongiorno (1981) شد. کاربرد روش AHP فازی در جنگل‌ها و روش‌های مختلف

مدیریتی آن به‌خوبی تعریف شده است و در مواردی که معیارهای کمی و کیفی موجود باشند، ترکیب روش‌های AHP فازی و برنامه‌ریزی هدف (Goal programming) می‌تواند برای حل مسائل بهینه‌سازی مؤثر باشد (Vahidnia *et al.*, 2009). Gharagozlou and Barzegar (2008) در تحقیقی برای بنگاه‌های تولیدی که محصولات متنوعی تولید می‌کنند و تقاضا برای آن‌ها قطعی نیست، از رویکرد AHP و فن برنامه‌ریزی آرمانی برای بهینه‌سازی ترکیب تولید استفاده کردند. Samghabadi و همکاران (2004) بنا بر تحقیقی در حوضه ۳۰ رامسر از مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای تعیین مقدار بهینه از هریک از اهداف استفاده کردند. در پژوهشی Mohammadi Limaie و همکاران (2014) به‌منظور مدیریت پایدار جنگل، امکان استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی را برای تعیین موجودی سرپای بهینه گونه‌های درختی با توجه به مقدار رویش در هکتار، کربن ذخیره‌شده، ارزش خالص فعلی و تعداد کارکنان بررسی کردند. Ostadhashemi و همکاران (2013) با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی و AHP و با مدنظر قرار دادن اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و اکولوژیکی، ترکیب گونه‌ای مناسبی با سطوح مشخص برای جنگل‌های آستاراچای و لوندویل ارائه دادند. Niknejad و همکاران (2018) از مدل برنامه‌ریزی آرمانی و AHP فازی برای بررسی توسعه پایدار جنگلکاری‌ها و مناسب‌ترین ترکیب گونه‌ای با در نظر گرفتن معیارها و شاخص‌های مختلف در حوضه آبخیز دارابکلا استفاده کردند. در تحقیقی دیگر مدل GP نیز برای مدیریت بهینه جنگل با در نظر گرفتن ترسیب کربن در اسپانیا انجام شد (Diaz-Balteiro *et al.*, 2013). اهداف مدل افزایش NPV، کنترل حجم برداشت، کنترل منطقه در سنین مختلف و حجم نهایی

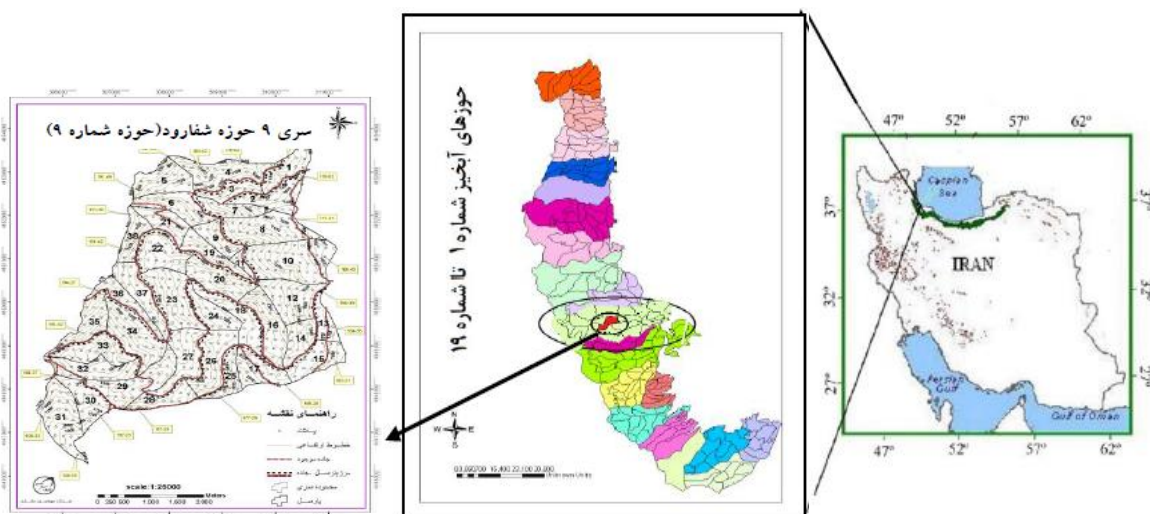
مدیریت بهینه را معرفی کند دیده می‌شود؛ بنابراین هدف از این بررسی، ارائه یک مدل چندمعیاره بر اساس رویکردهای برنامه‌ریزی آرمانی و AHP فازی برای کمک به تصمیم‌گیرندگان برای مدیریت پایدار جنگل‌ها و همچنین برآورد موجودی بهینه جنگل است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

داده‌های مربوط به مدل از سری نه جنگل‌های شفارود واقع در استان گیلان جمع‌آوری شد. منطقه مورد بررسی بین دو طول جغرافیای شرقی $48^{\circ}48'$ و $48^{\circ}51'$ و دو عرض جغرافیایی شمالی $37^{\circ}26'$ و $37^{\circ}30'$ و در دامنه ارتفاعی بین ۲۰۰۰-۸۵۰ متر به مساحت ۲۳۸۲ هکتار واقع شده است. گونه‌های موجود در این منطقه شامل راش (*Fagus orientalis*)، ممرز (*Carpinus betulus*)، بلوط (*Quercus sp.*)، توسکا (*Alnus subcordata* CA) و افرا (*Acer sp.*)، ملج (*Ulmus glabra*) و نمدار (*Tilia sp.*) است.

بود که از ۸ سناریو با اهداف متنوع برای حل مدل استفاده شد Aldea و همکاران (2014) در تحقیق خودروشی را برای ادغام خدمات مختلف اکوسیستم برای مدیریت جنگل با استفاده برنامه‌ریزی آرمانی پیشنهاد کردند. Bilbao-Terol و همکاران (2016) برای مدیریت پایدار جنگل، از مدل برنامه‌ریزی آرمانی با در نظر گرفتن اهداف و شاخص‌های مختلف در اسپانیا استفاده کردند. با توجه به اهمیت زیادی که جنگل‌های شمال ایران دارند و لزوم مدیریت صحیح به‌منظور حفظ این میراث جهانی، لازم است در برنامه‌های مدیریتی به تمام جنبه‌ها توجه شود. نگاه تک‌محوری در برنامه‌ها و غفلت از دیگر جنبه‌ها نه تنها سبب عدم موفقیت برنامه می‌شود بلکه سبب آسیب به موجودیت جنگل خواهد شد (Alizadeh et al., 2019). لازم است برنامه‌ریزی‌ها با توجه به اهداف چندگانه انجام تا تمام نیازهای جنگل تأمین و سبب افزایش کیفیت و کمیت شود. در تحقیقات انجام‌شده در ایران نیز اغلب از یک جنبه مانند اقتصادی یا اجتماعی یا... به موضوع پرداخته‌شده است و فقدان تحقیقاتی که با در نظر گرفتن چندین معیار یا هدف



شکل ۱- منطقه مورد بررسی در جنگل‌های شفارود، استان گیلان (سری ۹)
Figure 1. Study area in Shafaroud forest, Gilan province (district# 9)

رابطه (۱) $G = f(v)$

به طوری که G مقدار رویش ($m^3 \cdot ha^{-1}$) و v حجم ($m^3 \cdot ha^{-1}$) است. سپس با توجه به مقادیر داده‌های موجود و برقراری روابط رگرسیونی بین آن‌ها، روابط و معادلات بین رویش سالیانه و حجم در هکتار برای هر کدام از گونه‌ها مشخص شد و در نهایت با استفاده از مقادیر حجم اپتیمم که از پرسشنامه به دست آمده بود، مقدار رویش اپتیمم برای گونه‌های موجود به دست آمد.

مقدار کربن ذخیره شده در توده بر اساس ۵۰ درصد وزن خشک توده در نظر گرفته می‌شود (Snowdon, 2002). به این ترتیب وزن خشک توده از طریق محاسبه وزن تنه و تاج قابل محاسبه است. از این رو وزن تنه درختان توده در طبقات قطری مختلف با استفاده از حجم و جرم حجمی برای گونه‌های مورد نظر به دست آمد و برای تعیین وزن تاج، از معادلات آلومتریک (جدول ۱) استفاده شد.

منطقه مورد بررسی با استفاده از روش تصادفی سیستماتیک با ابعاد شبکه 200×150 متر و قطعات نمونه ۱۰ آری مورد آماربرداری قرار گرفت. در هر پلات متغیرهایی همچون نوع گونه، قطر در ارتفاع برابر سینه درختان با قطر بیش از $7/5$ سانتی متر و ارتفاع کل درختان برحسب متر اندازه‌گیری شد. داده‌های رویش منطقه مورد بررسی از پژوهش‌های پیشین استخراج و جمع‌آوری شد (Mohammadi *et al.*, 2018). هزینه‌های بهره‌برداری و قیمت محصولات چوبی از دفتر فنی چالوس و شرکت شفارود اخذ شده و شاخص قیمت مصرف‌کننده نیز از اطلاعات بانک مرکزی مربوط به دوره ۱۳۹۶-۱۳۷۲ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به منظور وزن‌دهی اهداف مختلف برای تعیین محدودیت‌های مدل و مقدار حجم اپتیمم، از پرسشنامه‌ای که تهیه شد استفاده شد. این پرسشنامه توسط ۲۴ نفر از افراد صاحب نظر و متخصص تکمیل و توسط نرم افزار Expert choice تحلیل شد. رویش در هکتار به عنوان تابعی از حجم در هکتار به صورت زیر فرض می‌شود (Mohammadi Limaiei, 2006):

جدول ۱- معادلات آلومتریک برای محاسبه ترسیب کربن گونه‌های مختلف

Table 1. Allometric equations for estimating carbon sequestration of various species

گونه‌ها Species	A	b	معادله Function	منبع Recourse
راش Beech	0.003	2.802		Kabiri Koupaei, 2009
ممرز Hornbeam	0.013	2.492		Kabiri Koupaei, 2009
بلوط Oak	0.0021	3.306	$Y = aD^b$	Johansson, 1999
توسکا Alder	0.000003	2.8805		Yuste <i>et al.</i> , 2005
دیگر گونه‌ها Other species	0.005	2.696		Kabiri Koupaei, 2009

با استفاده از پرسشنامه به‌دست آمد که برای تمام گونه‌ها ثابت فرض شد.

در روش AHP فازی هریک از تصمیم‌گیرندگان مقایسه‌های زوجی خویش را با کاربرد عبارت‌های زبانی ایجاد می‌کنند که به‌صورت اعداد فازی مثلثی $M = (l, m, u)$ تبدیل می‌شود. عملگرهای ریاضی در زبان فازی به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$M_1 + M_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$M_1 \times M_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \\ M^{-1} = \left(\frac{1}{U_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1} \right) \quad \text{رابطه (۷)}$$

گام اول: تعیین اوزان معیارها و گزینه‌ها نسبت به معیارها برای هریک از سطرهای ماتریس مقایسه‌های زوجی، مقدار S_k که خود عدد فازی مثلثی است، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Asgharpour, 2008):

$$S_k = \sum_{j=1}^n M_{kj} \times \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ij} \right]^{-1} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که k بیانگر شماره سطر، i گزینه‌ها و j نشان‌دهنده معیارها است. در روش مذکور پس از محاسبه S_k ها، درجه بزرگی آن‌ها نسبت به هم باید به‌دست آید. به‌طورکلی اگر M_1 و M_2 دو عدد فازی مثلثی باشند، درجه بزرگی M_1 بر M_2 ، که با $V(M_1 \geq M_2)$ نشان داده می‌شود، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} V(M_1 \geq M_2) = 1 & \text{if } m_1 \geq m_2 \\ (M_1 \geq M_2) = hgt(M_1 \cap M_2) \\ \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه (۹)}$$

همچنین داریم:

$$\text{رابطه (۱۰)}$$

$$Hgt(M_1 \cap M_2) = \frac{u_1 - l_2}{(u_1 - l_2) + (m_2 - m_1)}$$

مقدار بزرگی یک عدد فازی مثلثی از k عدد فازی مثلثی دیگر نیز از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{رابطه (۱۱)}$$

سپس با استفاده از داده‌های محاسبه شده، از طریق رگرسیون رابطه بین مقدار کربن و حجم توده به‌دست آمد و مقدار کربن ایتیمم برای هرگونه تعیین شد.

برای تعیین میانگین قیمت مورد انتظار گونه‌های درختی، داده‌های قیمت محصولات چوبی (گرده‌بینه، کاتین و هیزم)، هزینه بهره‌برداری و شاخص قیمتی مصرف‌کننده (CPI) طی سال‌های موردبررسی (۱۳۷۲-۱۳۹۶) مورداستفاده قرار گرفت. پس از محاسبه قیمت خالص هرگونه، با استفاده از شاخص قیمت مصرف‌کننده و رابطه ۲ تورم نسبت به سال شاخص از قیمت‌ها حذف شد.

$$P = \frac{P_n}{CPI_n} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

به‌طوری‌که P_n قیمت چوب در سال n ام (قیمت اسمی)، CPI_n شاخص قیمت مصرف‌کننده در سال n ام و P قیمت تعدیل‌شده نسبت به سال شاخص (قیمت واقعی) است. سپس طبق رابطه ۳ میانگین قیمت مورد انتظار گونه‌های مختلف از طریق قیمت خالص واقعی گونه‌ها به‌دست آمد.

$$P_{t+1} = \alpha + \beta P_t + \varepsilon \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن: P_{t+1} قیمت در سال $t+1$ بوده و P_t قیمت در سال t است. α و β نیز مقادیری هستند که از رابطه رگرسیون بین قیمت واقعی و قیمت مورد انتظار حاصل می‌شوند. در نهایت میانگین قیمت مورد انتظار برای گونه‌های مختلف درختی طبق رابطه ۴ مشخص شد (Mohammadi Limaiei, 2011).

$$P_{eq} = \frac{\alpha}{1 - \beta} \quad \text{رابطه (۴)}$$

به‌طوری‌که P_{eq} میانگین قیمت مورد انتظار است. تعداد کارکنان (اعم از کارشناسان و کارگران) مورداستفاده برای تعیین حداقلی مقدار اشتغال‌زایی نیز

رابطه (۱۶)

$$b_n \lambda^n + b_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + b_0 = 0 \rightarrow \begin{cases} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_v \end{cases}$$

$$\lambda_{ck} = \text{Max}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

با توجه به اینکه λ_{ck} ها بر اساس اندازه ماتریس

A_{ck} متغیرند، برای قرار گرفتن λ_{ck} ها در فاصله [۱ و

۰]، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

رابطه (۱۸)

$$\lambda'_{ck} = \frac{\lambda_{ck} - \lambda_{ck}^{\min}}{\lambda_{ck}^{\max} - \lambda_{ck}^{\min}}; \quad \lambda_{ck}^{\max} = \text{size of } A_{ck}, \quad \lambda_{ck}^{\min} = 1$$

حال λ'_{ck} طبق رابطه زیر نرمال می‌شود:

$$\lambda''_{ck} = \frac{\lambda'_{ck}}{\sum_{j=1}^r \lambda'_{ck}} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

بنابراین با ترکیب تمامی λ'_{ck} ها مقادیر W^k

محاسبه می‌شود.

گام سوم: تلفیق گام‌های اول و دوم برای به‌دست آوردن

اوزان نهایی

با استفاده از $a_{mk}(W^k)$ های به‌دست‌آمده در گام اول

و W های به‌دست‌آمده در گام دوم برای هریک از

ماتریس‌های زوجی ارائه‌شده توسط تصمیم‌گیرندگان،

اوزان نهایی با استفاده از رابطه میانگین هندسی موزون

به‌صورت زیر تعیین می‌شود.

$$a_m = \prod_{k=1}^r (a_{mk})^{W^k} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

گام چهارم: رتبه‌بندی گزینه‌ها

در این مرحله با به‌کارگیری فن تحلیل سلسله‌مراتبی و

حاصل‌ضرب ماتریس‌های اوزان معیارها و اوزان

گزینه‌ها نسبت به معیارها، رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

حاصل می‌شود.

در مدل برنامه‌ریزی آرمانی، هدف در یک‌طرف و

محدودیت مربوطه با توجه به حداقل یا حداکثر کردن

محدودیت در طرف دیگر نوشته می‌شود (رابطه ۲۱).

معادله با مقدار نهایی که در آن هدف مدنظر است

$$V(M_1 \geq M_2, \dots, M_k)$$

$$= \text{Min}[V(M_1 \geq M_2), \dots, V(M_1 \geq M_k)]$$

در روش تحلیل توسعه‌ای برای محاسبه وزن

معیارها در ماتریس مقایسه‌های زوجی به‌صورت زیر

عمل می‌شود:

رابطه (۱۲)

$$W'(x_i) = \text{Min}\{V(S_i \geq S_k)\}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad k \neq i$$

بنابراین بردار وزن معیارها به‌صورت زیر خواهد

بود که بردار ضرایب ناهنجار AHP فازی است.

$$W' = [W'(c_1), W'(c_2), \dots, W'(c_n)]^T \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

گام دوم: تعیین وزن‌های تصمیم‌گیرندگان

به هر مقایسه زوجی یک سطح اطمینان توسط

تصمیم‌گیرنده اختصاص داده می‌شود. سپس تمامی

سطوح اطمینان ارائه‌شده توسط یک تصمیم‌گیرنده،

برای به‌دست آوردن یک سطح اطمینان کلی ترکیب

می‌شوند و به‌عنوان وزن تصمیم‌گیرنده در نظر گرفته

می‌شود. اگر W^k نشان‌دهنده وزن تصمیم‌گیرنده k ام

باشد، ابتدا هر سطح اطمینان زبانی به مقدار عددی

تبدیل می‌شود. اگر a_{xyk} سطح اطمینان عددی

تصمیم‌گیرنده k ام برای مقایسه زوجی معیار x نسبت

به معیار y باشد آنگاه:

$$\begin{cases} 1 & \text{High confidence} \\ 0.5 & \text{Average confidence} \\ 0 & \text{Low confidence} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

سپس a_{xyk} در ماتریس‌های مجزا $A_{ck} = a_{xyk}$

مشابه گروه‌بندی مقایسه‌ای زوجی تحلیل سلسله‌مراتبی

گروه‌بندی می‌شود. در مرحله بعد بیشینه مقدار

ویژه‌ماتریس A_{ck} که با λ_{ck} نمایش داده می‌شود

محاسبه می‌شود. سپس مقدار W^k به‌وسیله ترکیب λ_{ck}

ها به‌دست می‌آید. همچنین برای محاسبه مقدار ویژه

می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

رابطه (۱۵)

$$|A - \lambda I| = 0 \rightarrow \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix}$$

به‌طوری‌که x_i متغیرهای تصمیم هر واحد، a_{ij} ضرایب دستیابی به هدف برای هر واحد و b_i مقدار دستیابی به هدف i است.

لازم است که انحرافات این معادلات در معادله نهایی برنامه‌ریزی هدف نوشته شود تا با به حداقل رساندن آن‌ها معادله نهایی حل شود. سپس به هر یک از انحرافات مربوط به هر هدف وزنی تعلق می‌گیرد که بسته به درجه اهمیت و مقدار آن هدف در انحراف تأثیرگذار خواهد بود (Buongiorno and Gilles, 2003). لازم به ذکر است که در این تحقیق هیچ انحراف مثبتی از هدف وجود ندارد از این‌رو فقط انحرافات منفی وارد مدل شد. در نتیجه، محدودیت‌ها و تابع هدف مدل GP به شرح رابطه ۲۳ تعیین شد:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= \sum_{j=1}^m W_j (d_j^-) \\ \text{s. t } &\sum_{i=1}^G X_i + d_T^- = g_T \\ &X_i + d_{Vi}^- = g_{Vi} \\ &\sum_{i=1}^G a_i X_i + d_C^- = g_C \\ &\sum_{i=1}^G b_i X_i + d_G^- = g_G \\ &\sum_{i=1}^G m_i X_i + d_L^- = g_L \\ &\sum_{i=1}^G n_i X_i + d_{NPV}^- = g_{NPV} \\ &d_T^-, d_{Vi}^-, d_C^-, d_G^-, d_L^-, d_{NPV}^-, d_j^-, w_j \geq 0 \end{aligned}$$

بلوط، توسکا و دیگر گونه‌ها g_T حداقل حجم مناسب کل (مترمکعب در هکتار). g_{Vi} حداقل حجم مناسب از هرگونه. g_C حداقل ترسیب کربن مناسب (تن در هکتار). g_G حداقل رویش مناسب در هکتار. g_L حداقل کارگر قابل قبول. g_{NPV} حداقل NPV قابل قبول

به‌صورت یک رابطه نوشته خواهد شد و در ادامه معادلات مربوط به معادله هدف با مقداری جریمه معادل هدف مطلوب تلفیق خواهد شد. در معادلات هدف و محدودیت‌ها، d_i^- انحراف هدف پایین‌تر از حد قابل قبول است. زمانی که منظور حداکثر کردن مقدار هدف در معادلات باشد d_i^- به کار گرفته شده و به سمت چپ معادله اضافه می‌شود. d_i^+ نیز انحراف هدف بیش‌ازحد قابل قبول است و زمانی که حداقل کردن رابطه مدنظر باشد، از سمت چپ معادله کسر می‌شود (رابطه ۲۲).

رابطه (۲۱)

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_i \leq \text{or } \geq b_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, G$$

رابطه (۲۲)

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_i + d_i^- - d_i^+ = g_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, G$$

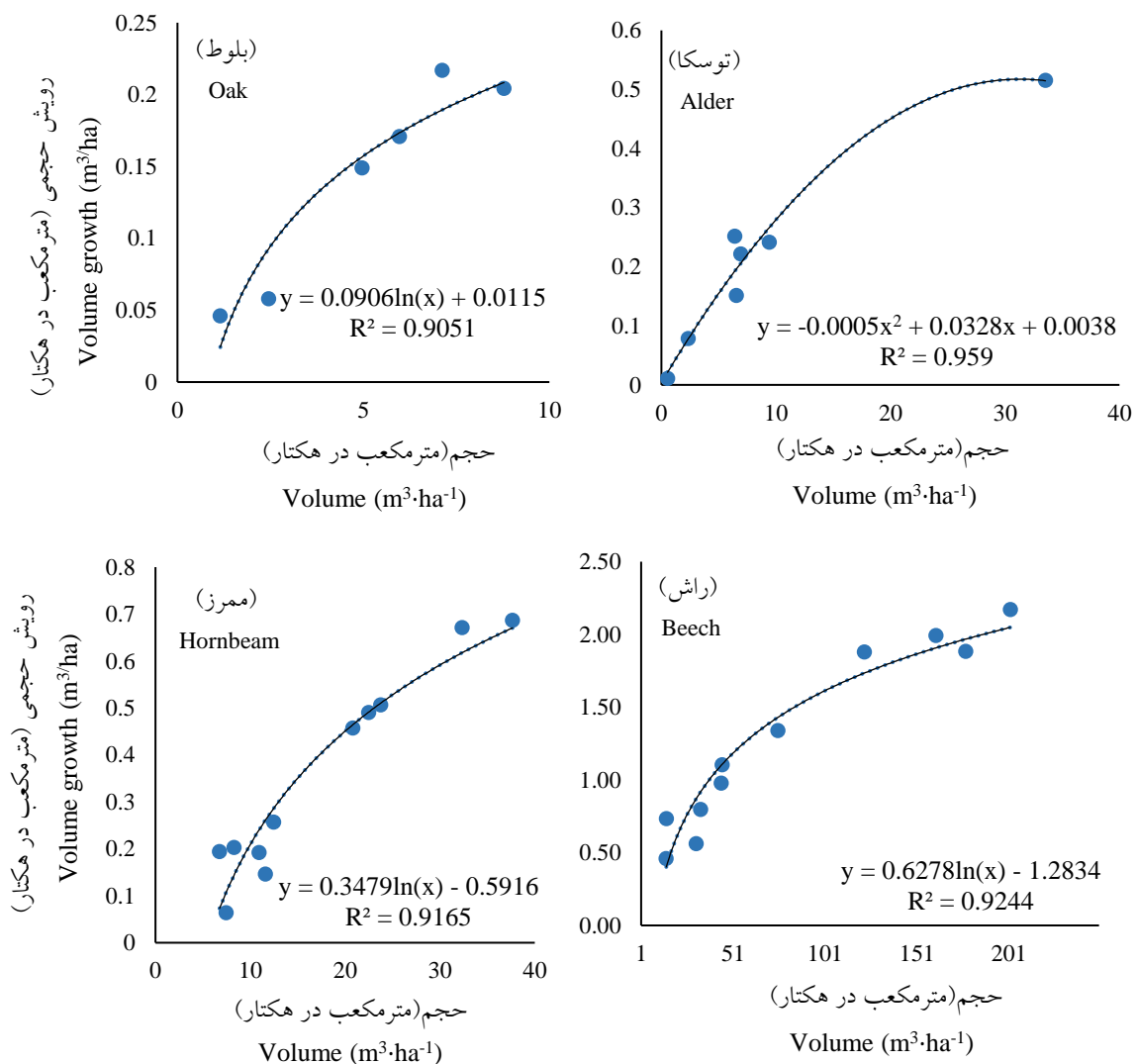
رابطه (۲۳)

به‌طوری‌که: d^- انحراف منفی از هدف. W وزن برای هر واحد انحراف. j (۱ تا ۱۰): حجم کل، حجم راش، حجم ممرز، حجم بلوط، حجم توسکا، حجم دیگر گونه‌ها، ترسیب کربن، رویش، کارگر، NPV. i (۱ تا ۵): متغیرهای تصمیم‌گیری مانند راش، ممرز،

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد که معادلات لگاریتمی و چندجمله‌ای مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی معادله رویش هستند و توابع در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار هستند. نتایج آنالیز رگرسیون و معادلات رویش در شکل ۲ نشان داده شده است.

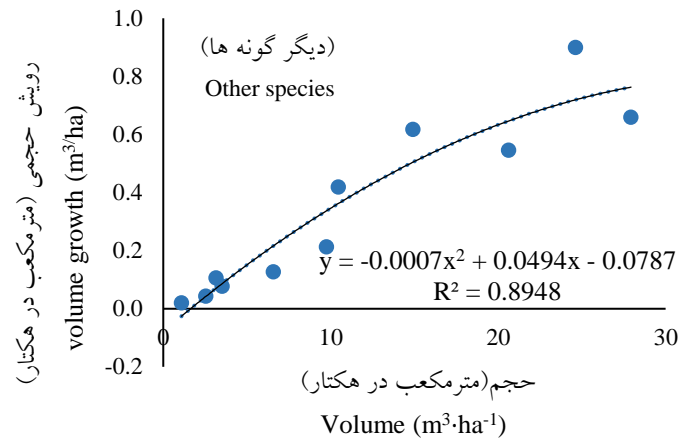
(۱۰۰۰۰ ریال ایران). a ضریب ترسیب کریب. b ضریب رویش. m ضریب کارگر و n ضریب NPV است. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار LINGO 12.0، مدل GP متشکل از تابع هدف و محدودیت‌ها حل شد.

نتایج



شکل ۲- آنالیز رگرسیون بین رویش حجمی سالانه و حجم برای هریک از گونه‌ها

Figure 2. Regression analysis between annual volume growth and stock for each species

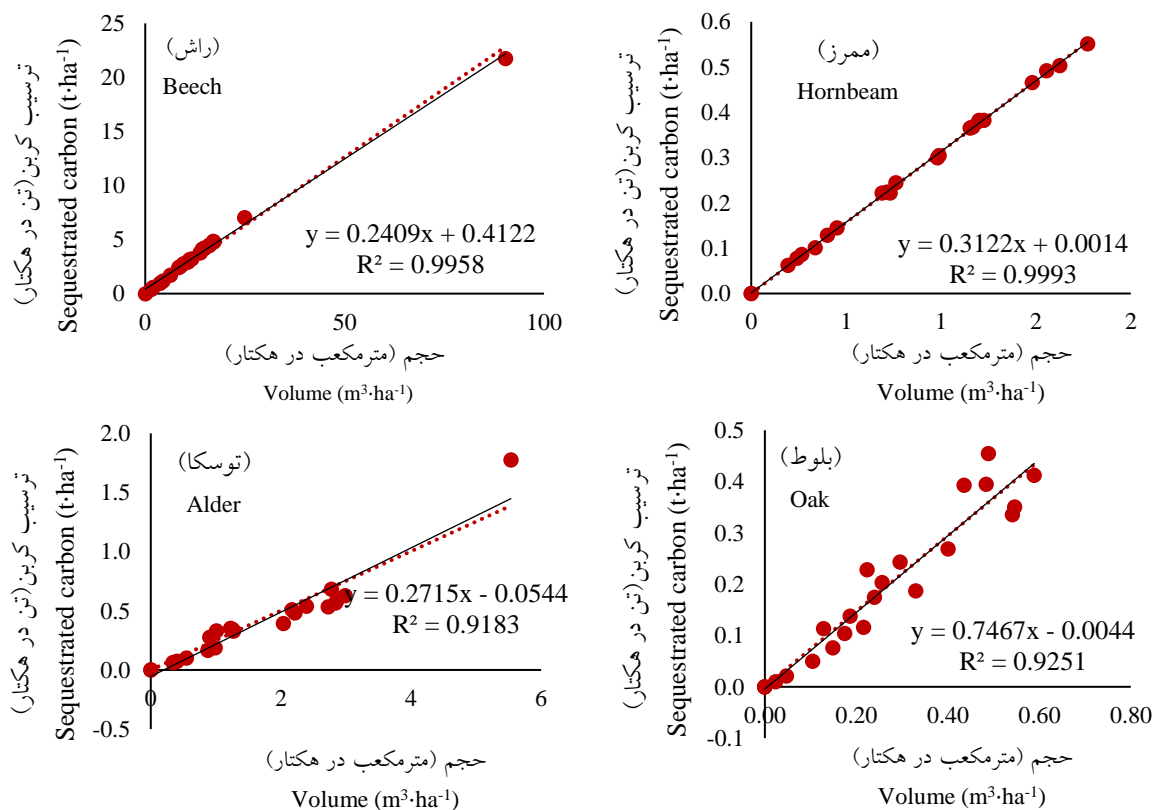


ادامه شکل ۲.

Continued figure 2.

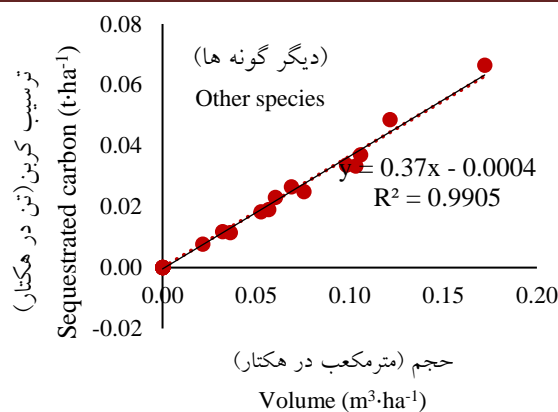
می‌دهد. نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد که در تمام توابع R^2 معنی‌دار است.

شکل ۳ رابطه بین ترسیب کربن (Y) (تن در هکتار) و موجودی (X) (مترمکعب در هکتار) با استفاده از روابط آلومتریک برای هرگونه را نشان



شکل ۳- آنالیز رگرسیون بین ترسیب کربن و حجم برای هریک از گونه‌ها

Figure 3. Regression analysis between sequestered carbon and stock for each species



ادامه شکل ۳.

Continued figure 3.

میانگین قیمت مورد انتظار و شاخص‌های تحلیل رگرسیون با استفاده از معادله ۴ محاسبه شده و در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول‌های ۳ و ۴ ماتریس‌های فازی معیارهای مختلف با وزن‌های محاسبه شده بر اساس دانش کارشناسان را نشان می‌دهد.

مقادیر شاخص‌های محدودیت‌ها نیز در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۲- میانگین قیمت مورد انتظار و شاخص‌های محاسبه شده برای هرگونه

Table 2. Expected mean price and estimated parameters of each species

تخمین شاخص‌ها Estimated parameters			نام گونه‌ها Name of species
β	α	میانگین مورد انتظار (۱۰۰۰) ریال / مترمکعب Expected mean price (10000 Rials/m ³)	
0.755	163.222	666.212	راش Beech
0.894	51.633	337.025	ممرز Hornbeam
0.623	166.926	442.775	بلوط Oak
0.719	161.074	573.217	توسکا Alder
0.719	131.654	468.520	دیگر گونه‌ها Other species

جدول ۳- ماتریس مقایسات فازی برای معیارهای مدیریت

Table 3. The fuzzy comparison matrix of management criteria

رویش Growth	NPV	ترسیب کربن Carbon sequestration	کارگر Labor	
(1,1,1)	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(1/3,1/2,1)	رویش Growth
(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(1,2,3)	NPV
(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	کربن Carbon
(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	کارگر Labor

جدول ۴- ماتریس مقایسات فازی برای معیار گونه‌ها

Table 4. The fuzzy comparison matrix of species criteria

دیگر گونه‌ها Other species	توسکا Alder	بلوط Oak	ممرز Hornbeam	راش Beech	نام گونه‌ها Species name
(1,2,3)	(2,3,4)	(3,4,5)	(3,4,5)	(1,1,1)	راش Beech
(1,2,3)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,1,1)	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3})$	ممرز Hornbeam
(2,3,4)	(1,2,3)	(1,1,1)	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3})$	بلوط Oak
(2,3,4)	(1,1,1)	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1)$	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$	توسکا Alder
(1,1,1)	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1)$	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1)$	دیگر گونه‌ها Other species

جدول ۵- مقادیر ضرایب در مدل GP

Table 5. The values of coefficients in GP mode

n	m	b	a	نام گونه‌ها Species name	i
7931.098	61	8.371	269.533	راش Beech	1
4012.206	61	13.721	313.889	ممرز Hornbeam	2
5271.125	61	8.517	729.607	بلوط Oak	3
6824.013	61	22.786	238.329	توسکا Alder	4
5577.614	61	31.262	360.011	دیگر گونه‌ها Other species	5

مقادیر اهداف و وزن‌های مدل برنامه‌ریزی آرمانی
شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.
با استفاده از روش AHP فازی در جدول ۶ و همچنین

جدول ۶- مقادیر بهینه معیارها بر اساس روش AHP فازی

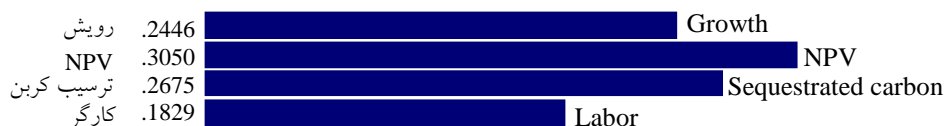
Table 6. The values of optimum criteria based on fuzzy-AHP method

g	j	g	j
20.4	حجم دیگر گونه‌ها Other species volume	408	حجم کل Total volume
128783.16	ترسیب کربن Sequestrated carbon	256.2	حجم راش Beech volume
4509.834	رویش Growth	61.2	حجم ممرز Hornbeam volume
25000	کارگر Labor	40.8	حجم بلوط Oak volume
2816929.37	NPV	20.4	حجم توسکا Alder volume



شکل ۴- وزن نسبی هریک از گونه‌ها با روش AHP فازی

Figure 4. The weight of each species with fuzzy-AHP method



شکل ۵- وزن نسبی معیارها با روش AHP فازی

Figure 5. Relative weights of the criteria with fuzzy-AHP method

نتایج شکل ۴ حاکی از این است که گونه راش نسبت به دیگر گونه‌ها بیشترین وزن نسبی را به دست آورده است. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۵ از بین معیارهای تولیدی، اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی، معیار NPV (اقتصادی) بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است و بیشترین ارزش را برای مدیریت و رتبه‌بندی معیارهای گونه دارا است. نتایج حل مدل نهایی با استفاده از نرم‌افزار LINGO در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- نتایج مدل GP حاصل از نرم‌افزار LINGO

Table 7. Result of GP mode		
متغیر	ارزش	کاهش هزینه
Variable	Value	Reduced Cost
D_{VT}	10.99464	0.000000
D_B	0.000000	11.85468
D_H	0.000000	114.2278
D_O	1.994640	0.000000
D_A	0.000000	505.2847
D_{OS}	0.000000	464.4562
D_C	0.000000	0.5317411
D_G	923.7415	0.000000
D_L	782.6730	0.000000
D_{NPV}	81893.96	0.000000
X_1	256.2000	0.000000
X_2	61.20000	0.000000
X_3	38.80536	0.000000
X_4	20.40000	0.000000
X_5	20.40000	0.000000

یابند. انحرافات منفی هر یک از آنها به‌ترتیب $81893/96$ ، $782/67$ ، $923/74$ در هر هکتار، $1/99$ و $10/99$ مترمکعب در هکتار است.

بحث

روش برنامه‌ریزی آرمانی یکی از رویکردهای چند هدفه است که به‌طور گسترده در زمینه مسائل مدیریتی جنگل کاربرد دارد. در این بررسی با در نظر گرفتن اهداف چندگانه تولیدی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، مقدار حجم بهینه برای هریک از گونه‌ها محاسبه شد تا بتوان با راهکارها و برنامه‌ریزی‌های

D_{VT} انحراف منفی حجم کل D_A ، D_O ، D_H ، D_B و D_{OS} انحرافات منفی حجم راش، ممرز، بلوط، توسکا و دیگر گونه‌ها. D_C ، D_G ، D_L و D_{NPV} انحرافات منفی ترسیب کربن، رویش، کارگر و NPV .

نتایج نشان می‌دهد که انحرافات منفی گونه‌های راش، ممرز، توسکا و دیگر گونه‌ها صفر است و به این معنی است که آنها کاملاً به هدف دست یافته‌اند. همچنین ترسیب کربن فاقد انحراف منفی است. بر اساس جدول مذکور، محدودیت‌هایی مانند NPV ، کارگر، رویش، حجم بلوط و حجم کل با اضافه کردن مقدار انحرافات می‌توانند به مقدار بهینه و هدف دست

(2014) با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی با در نظر گرفتن اهداف ترسیب کربن، رویش و قیمت، مقدار حجم بهینه کل در جنگل‌های شمال را ۴۵۵/۲۵ مترمکعب بر هکتار برآورد کردند. نتایج این بررسی با تحقیق ذکرشده هم‌راستا است ولی با توجه به اینکه منطقه مورد بررسی متفاوت بوده است، نتایج دو تحقیق کاملاً یکسان نیست. هرچند که روش تعیین محدودیت‌ها و ضرایب معادلات مدل برنامه‌ریزی آرمانی در این دو تحقیق متفاوت بود و فقط از پرسشنامه برای وزن‌دهی اهداف استفاده شد. در صورتی‌که در این بررسی از فن AHP فازی استفاده شد که حساسیت‌پذیری بالاتری در تعیین داده‌ها دارد. در این تحقیق سعی بر آن شد که با مدنظر قرار دادن اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی و در نظر گرفتن تضادهای بین اهداف کمی و کیفی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی و روش AHP فازی، ترکیب بهینه‌ای برای مدیریت با اهداف چندگانه را به دست آورد. بعلاوه با توجه به مسائل اقتصادی اجتماعی جنگل‌های شمال کشور و اهمیت این جنگل‌ها در عرضه چوب از یک‌طرف و اهمیت گونه‌های درختی جنگل‌های هیرکانی و خطر انقراض گونه‌ای آن لازم است که مدیریت تلفیقی با مشارکت ذینفعان در نظر گرفته شود. امروزه خطرات طبیعی زیادی با توجه به تغییرات آب و هوایی از قبیل آتش‌سوزی، آفات و بیماری‌ها و ... جنگل‌های هیرکانی شمال ایران را تهدید می‌کند. از این‌رو پیشنهاد می‌شود که استراتژی‌های بلندمدت و برنامه‌های مدیریتی تهیه شده برای این جنگل‌ها از انعطاف لازم برای رویارویی با این مخاطرات برخوردار باشند. در این راستا مدیریت انطباقی جنگل‌ها برای مقابله با تغییرات اقلیمی می‌تواند گزینه مناسبی باشد.

مناسب، در راستای مدیریت پایدار جنگل گام برداشت (Moslehi et al., 2018). نتایج حاصل از مدل برنامه‌ریزی آرمانی و تحلیل سلسله مراتبی فازی برای دستیابی به جواب مطلوب و تعیین حجم بهینه برای گونه‌های مختلف با توجه به تحقق هم‌زمان اهداف مختلف شامل رویش، ترسیب کربن، NPV و تعداد نیروی کار نشان داد که گونه راش با ۲۵۶/۲ مترمکعب در هکتار بیشترین حجم را به خود اختصاص داده و پس از آن گونه‌های ممرز، بلوط، توسکا و دیگر گونه‌ها به ترتیب با ۶۱/۲، ۳۸/۸۰، ۲۰/۴ و ۲۰/۴ مترمکعب در هکتار قرار گرفتند. بر این اساس مقدار موجودی بهینه کل برای منطقه مورد بررسی ۳۹۷/۰۰۵ مترمکعب در هکتار برآورد شد که ۱/۹۹۴۶ مترمکعب در هکتار کمتر از مقدار پیش‌بینی‌شده بود؛ بنابراین اهداف مربوط به موجودی بهینه گونه‌های راش، ممرز، توسکا و دیگر گونه‌ها محقق شد. با این حال مدل GP در خصوص گونه بلوط نیز توانست مقدار انحراف از هدف را مشخص کند.

Diaz-Balteiro و همکاران (2013) از مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای مدیریت بهینه جنگل با در نظر گرفتن ترسیب کربن استفاده کردند. اهداف به کار رفته در مدل آن‌ها شامل حداکثر کردن NPV، حجم برداشت و کنترل منطقه در سنین مختلف بود. آن‌ها از هشت سناریو برای حل مدل استفاده کردند. از این‌رو شباهت‌هایی بین نتایج این تحقیق و مدل آن‌ها وجود دارد. Samghabadi و همکاران (2004) با بررسی مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای مدیریت بهینه جنگل، اهدافی همچون حداکثر کردن ترسیب کربن، NPV، موجودی سرپا، اشتغال و به حداقل رساندن فرسایش خاک را مدنظر قرار دادند که نتایج پژوهش آن‌ها با این تحقیق، همسو است. Mohammadi Limaiei و همکاران

References

- Aldea, J., F. Martinez-Pena, C. Romero & L. Diaz-Balteiro, 2014. Participatory Goal Programming in Forest Management: An Application Integrating Several Ecosystem Services, *Forests*, 5(12): 3352-3371.
- Alizadeh, S. H., A. Salehi & M. R. Mirzaei, 2019. The efficiency of geostatistical methods in zoning the probability of presence of Persian Oak regeneration, *Journal of Forest Research and Development*, 5(1): 137-151. (In Persian)
- Amiri, T., A. Banj Shafiei, M. Erfanian, O. Hosseinzadeh, H. Beygi Heidarlou, 2017. Determining of effective criteria in locating firefighting station in forest. *Forest Research and Development*, 2(4): 379-393. (In Persian)
- Asgharpour, M., 2008. Multi Criteria Decision Making, sixth edition. University of Tehran Press, 232 p. (In Persian)
- Bilbao-Terol, A., M. Jimenez & M. Arenas-Parra, 2016. A group decision making model based on goal programming with fuzzy hierarchy: an application to regional forest planning, *Annals of Operations Research*, 245(1): 137-162.
- Buongiorno, J. & J. K. Gilles, 2003. Decision Methods for Forest Resource Management, Academic Press, San Diego, USA, 439 p.
- Chang S. J. & J. A. Buongiorno, 1981. Programming Model for Multiple Use Forestry, *Journal of Environmental Management*, 13(1): 45-58.
- Charnes, A. & W. W. Cooper, 1971. Studies in mathematical and managerial economics. North Holland press, 234 p.
- Diaz-Balteiro, L., J. Gonzalez-Pachon & C. Romero, 2013. Goal programming in forest management: customizing models for the decision-maker's preferences, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 28(2): 166-173.
- Gharagozlou, A. & M. Barzegar, 2008. Utopian planning using AHP approach for the optimization of the composition, *bimonthly of trade*, 29(5): 64-75. (In Persian)
- Kabiri Koupaei, K., 2009. Comparison of Carbon Sequestration and its Spatial Pattern in the Above Ground Woody Compartment of a Pure and Mixed Beech Forest (A case study of Gorazbon Forest North of Iran). PhD Thesis. Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, 102 p. (In Persian)
- Mohammadi Limaei, S., 2006. Economically Optimal Values and Decisions in Iranian Forest Management. PhD thesis. Department of Forest Economics, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Umea, Sweden, 110 p.
- Mohammadi Limaei, S., 2011. Economics Optimization of Forest Management. LAP LAMBERT Academic Publication, Germany, 140 p.
- Mohammadi Limaei, S., M. Seddigh Kouhi & T. Rostami Shahraji, 2014. Goal programming approach for sustainable forest management, *Journal of Forestry Research*, 25(2): 429-435.
- Mohammadi, Z., S. Mohammadi Limaei, P. Lohmander & L. Olsson, 2018. Estimation of a basal area growth model for individual trees in uneven-aged Caspian mixed species forests, *Journal of Forestry Research*, 29(5): 1205-1214.
- Moslehi, M., H. Habashi, M. R. Rahmani & K. H. Saghebtalebi, 2018. Relationship between soil organic carbon pool and some site variables in the mixed beechhornbeam stand, *Journal of Forestry Research and Development*, 3(4): 329-345. (In Persian)
- Niknejad, M., A. Fallah & S. Mohammadi Limaei, 2018. Sustainable Development of Forest Plantation using Goal Programing and Fuzzy-AHP, *Iranian journal of Forests and Poplar Research*, 26(2): 252-263. (In Persian)
- Ostadhashemi, R., T. Rostami Shahraji, S. Mohammadi Limaei & H. Roehle, 2013. Goal programming and analytical hierarchy process approaches for sustainable plantation, *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 12(2): 233-244. (In Persian)
- Pohekar, S. D. & M. Ramachandran, 2004. Application of Multi-criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning- A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4): 365-381.
- Saaty, T. L., 1980. The analytic hierarchy process, McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Samghabadi, A. S., A. Memariani & A. Amani, 2004. Forest planning with use mathematical model, *Pajouhesh & Sazandegi*, 63: 23-34. (In Persian)
- Snowdon, P., J. Raison, H. Keith, P. Ritson, P. F. Grierson, M. Adams, K. Montagu, H. Bi. W. Burrows & D. Eamus, 2002. Protocol for

- Sampling Tree and Stand Biomass. National Carbon accounting System Technical, *Australian Greenhouse Office*. Report Number: 31, 66 p.
- Sporic, M., M. Landekic, M. Lovric, S. Bogdan & K. Segotic, 2010. Multiple criteria decision making in forestry - Methods and experiences, *Sumarski List*, 134(5-6): 275-286.
 - Vahidnia, M. H., A. A. Alesheika & A. Alimohammadi, 2009. Hospital site selection using AHP and its derivatives, *Journal of Environmental Management*, 90(10): 3048-3056.
 - Yuste, J. C., B. Konopka, I. A. Janssens, K. Coenen, C. W. Xiao & R. Ceulemans, 2005. Contrasting net primary productivity and carbon distribution between neighboring stands of *Quercus robur* and *pinussylvestris*, *Tree Physiology*, 25(6): 701-712.

Optimal forest management decision making using goal programming and fuzzy analytic hierarchy process approaches in Hyrcanian mixed forests

S. S. Etemad^{*1}, S. Mohammadi Limaie² and R. Yousefpour³

1- Ph.D. student of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, I. R. Iran. (s.etemad7@gmail.com)

2- Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, I. R. Iran. (limaei@guilan.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Forestry Economics and Forest Planning, University of Freiburg, Freiburg, Germany. (rasoul.yousefpour@ife.uni-freiburg.de)

Received: 09.03.2019

Accepted: 14.09.2019

Abstract

The aim of this research is to determine the optimal stock level in Hyrcanian forest of Iran. In this study, a goal programming techniques was used in order to estimate the optimal stock level of different tree species considering economics, environmental and social issues. Multiple objectives in the process of decision making were considered to maximize the net present value, carbon sequestration and labor. Regression analysis was used to develop a forest growth model. In addition, an allometric function was used to determine the amount of carbon sequestration. Expected mean price is estimated using wood price and variable harvesting costs to determine the net present value of forest harvesting. The fuzzy analytic hierarchy process is applied to determine the weights of goals using questionnaires filled by experts in order to determine the optimal stock level. Results showed that the optimal volumes were $256.2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, $61.2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, $38.8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, $20.4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ for, and $20.4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ for beech, hornbeam, oak, alder and the other species, respectively. Furthermore, the results indicated that the total optimal volume is $397.005 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Keywords: Optimization, Carbon sequestration, Shafaroud forests, Multipurpose forest management.

* Corresponding author

Tel: +989188709269