

## بهینه‌سازی ایستا و پویای بهره‌برداری از جنگل

سلیمان محمدی لیمائی

استادیار گروه جنگلداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۲۷ / ۲ / ۸۸، تاریخ تصویب: ۳ / ۸ / ۸۸)

### چکیده

بهره‌برداری بهینه از جنگل، تابعی از موجودی سرپا، قیمت چوب سرپا، هزینه‌های بهره‌برداری و نرخ سود بازار است. برای تعیین مقدار برداشت بهینه، ابتدا معادله رویش برای جنگل خیرود نوشهر برآورد شد، سپس با استفاده از مدل خودکاهشی، قیمت چوب سرپا پیش‌بینی و مقدار برداشت بهینه با استفاده از معادلات رویش سالیانه جنگل و قیمت چوب سرپا محاسبه شد. مقدار برداشت بهینه بر اساس آخرین اطلاعات رویش جنگل و قیمت چوب سرپا است که ارزش فعلی سود حاصل از بهره‌برداری جنگل را به حداکثر می‌رساند. برای تعیین مقدار برداشت بهینه جنگل، ابتدا از روش برنامه‌ریزی تصادفی پویا استفاده شد، سپس نتایج این روش با روش برنامه‌ریزی ایستا مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگر از روش برنامه‌ریزی تصادفی پویا به جای برنامه‌ریزی ایستا استفاده شود، ارزش خالص فعلی مورد انتظار، حدود ۲۶ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی تصادفی پویا، بهینه‌سازی ایستا، معادله رویش، معادله قیمت چوب سرپا.

## مقدمه و هدف

جنگلداری سنتی بر برنامه‌ریزی بلندمدت استوار است و در آن فرض می‌شود که پیش‌بینی بلندمدت پدیده‌ها با دقت بالا امکان‌پذیر است. یعنی با تهیه طرح جنگلداری از یک سری، همه عملیاتی که باید در دوره آینده در آن اجرا شود در کتابچه طرح به‌طور دقیق پیش‌بینی می‌شود. امروزه انتقادهای زیادی بر جنگلداری سنتی وارد شده، به‌طوری که تنها حسن آن را راحتی اجرای عملیات جنگلداری دانسته‌اند (Johansson & Löfgren, 1985). یکی از این انتقادات، عدم انعطاف‌پذیری آن است. هر طرح پس از تصویب توسط شورای عالی جنگل و مرتع به‌صورت قانون در می‌آید. ممکن است پیش‌بینی‌ها درست و قابل اجرا نباشند یا عوامل خارجی پیش‌بینی‌ها را تحت تأثیر قرار دهند (سعید، ۱۳۷۸). همان‌طور که می‌دانیم، در محیط شرایطی وجود دارد که به‌طور کامل قابل پیش‌بینی نیست. علاوه بر این تصمیم‌های کنونی و آینده باید بر اساس بهترین و آخرین شرایط باشد. مقدار برداشت از جنگل در جنگلداری سنتی، از قبل تعیین می‌شود. در واقع با توجه به موجودی جنگل، امکان برداشت مشخص می‌شود که به‌طور معمول درصدی از موجودی سرپا است. برای این کار از روش ایستا یا حتمی<sup>۱</sup> برای برنامه‌ریزی و محاسبه مقدار برداشت استفاده شده و پیش‌بینی بلندمدت پدیده‌هایی مثل رویش در جنگل، قیمت چوب، آفات و بیماری‌ها، تغییرات آب و هوایی و ... ، امکان‌پذیر فرض می‌شود. می‌توان گفت فرض‌هایی که در جنگلداری سنتی در نظر گرفته می‌شود، منطقی نیست؛ زیرا قیمت چوب در طول زمان نوسان دارد و پیش‌بینی قیمت چوب با دقت زیاد مشکل است و عوامل متعددی بر بازار تأثیرگذارند. بنابراین می‌توان نوسان قیمت چوب را فرایندی تصادفی<sup>۲</sup> در نظر گرفت. در ریاضیات، به مجموعه‌ای از حالت‌های یک متغیر که در طول یک دوره زمانی به‌وقوع می‌پیوندند، فرایند تصادفی یا اتفاقی گفته می‌شود. ولی فرایند ایستا، فرایندی است که یک پدیده در زمان‌های مختلف، حالتی ثابت دارد.

نتایج بررسی قیمت چوب جنگل‌های شمال ایران نشان داد که قیمت چوب سرپا در سال‌های مختلف نوسان دارد و تصادفی است (Mohammadi & Lohmander, 2007). هدف از این تحقیق پاسخ این پرسش است که آیا مقدار برداشت فعلی جنگل‌ها باید تحت تأثیر مخاطرات و تصادفی بودن پدیده‌ها باشد؟ بحث مدیریت مخاطره در جنگلداری، نخستین بار در سال ۱۹۶۶ مطرح شد و مدل مارکوف<sup>۳</sup> برای تحلیل مدیریت جنگلکاری به‌کار رفت و برنامه‌ای ارائه شد که بر اساس آن، ارزش فعلی درآمد جنگل به حداکثر می‌رسید (Hool, 1966).

Kaya & Lembersky & Johnson, (1975) و Buongiorno, (1987) و Lohmander, (1987) مقدار برداشت بهینه از جنگل را بر اساس شرایط عدم اطمینان قیمت چوب و رویش جنگل برنامه‌ریزی کردند. Buongiorno, (2001) برای تعیین مقدار برداشت بهینه از جنگل در حالت‌های رویش و قیمت تصادفی، از فرمول فوستمن<sup>۴</sup> استفاده کرد. مدیریت جنگل‌های ناهمسال در فرانسه با رویش و قیمت تصادفی مورد بررسی قرار گرفت (Rollin et al, 2005). در تحقیقات مختلف، روش‌های ریاضی متفاوتی برای تعیین راه حل بهینه استفاده شده است. در این تحقیق، روش برنامه‌ریزی تصادفی پویا برای برداشت بهینه به‌کار رفت و نتایج حاصل، با روش برنامه‌ریزی حتمی مقایسه شد.

با برنامه‌ریزی پویا<sup>۵</sup> می‌توان مسائل بسیار پیچیده را به مسائلی ساده تبدیل کرد و با حل آنها، راه حل بهینه را به‌دست آورد. برنامه‌ریزی پویا برای حل مسائلی استفاده می‌شود که مرحله‌ای هستند. هر مسئله به چند زیرمسئله تبدیل می‌شود. در مرحله اول، جواب زیرمسئله پیدا می‌شود، سپس جواب آنها با هم جمع می‌شود و جواب کلی مسئله به‌دست می‌آید. برنامه‌ریزی پویا شامل مرحله<sup>۶</sup>، وضعیت یا حالت<sup>۷</sup> و سیاست بهینه است. هر مسئله برنامه‌ریزی به مسائل جزئی تبدیل می‌شود که به هر مسئله

3- Markov

4- Faustmann

5- Dynamic Programming

6- Stage

7- State

1- Deterministic

2- Stochastic

معادله ۱ بیان می کند که مقدار رویش تابعی از ذخیره بیوماس است. که در آن فرض های زیر در نظر گرفته شده است:

الف)  $F(x) > 0$

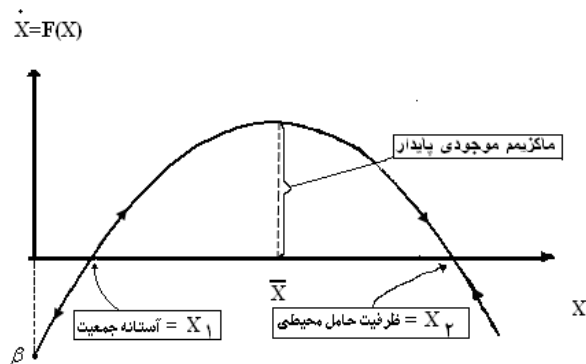
ب)  $F(x_1) = F(x_2) = 0$  برای  $x \in (x_1, x_2)$  (۲)

ج)  $\frac{dF(x)}{dx^2} = F''(x) < 0 \quad x \in (0, \infty)$

فرض الف نشان می دهد که جمعیت (حجم) در حال افزایش است تا وقتی که جمعیت در فاصله  $(x_1, x_2)$  باقی بماند. فرض ب نشان می دهد وقتی که شمار جمعیت به سطح  $x_1$  یا  $x_2$  می رسد، مقدار رویش متوقف می شود. فرض ج نشان می دهد که نرخ نهایی رویش یک معادله اکیدا کاهشی از تعداد جمعیت است. این مفروضات سبب ایجاد منحنی مقعر می شود (شکل ۱). نرخ رویش به طور یکنواخت  $(F'(0) = -\beta < 0)$  افزایش می یابد تا به سطح بحرانی جمعیت (حجم) یا حداکثر موجودی پایدار  $\bar{x}$  برسد، سپس به طور یکنواخت کاهش پیدا می کند. اگر این سیستم به حال خود رها شود، در نهایت به سطح  $x = x_2$  می رسد، مشروط بر اینکه جمعیت اولیه از  $x_1$  بیشتر باشد. از نظر ریاضی:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_2 \quad \text{و} \quad x(0) > x_1$$

نقطه  $x_2$  نشان دهنده تعادل پایدار است که می توان آن را ظرفیت حامل محیطی تعریف کرد.



شکل ۱- معادله رویش بیوماس

جزیی یک مرحله می گویند. هر مرحله نشان دهنده یک موضع تصمیم گیری و شامل یک یا چند وضعیت یا حالت است. تصمیم گیری در هر مرحله با توجه به مشخص بودن وضعیت در آن مرحله انجام می گیرد. در این تحقیق دو وضعیت وجود دارد که یکی قیمت چوب سرپا و دیگری موجودی در هکتار است. سیاست بهینه در هر مرحله، نشان دهنده بهترین تصمیم از آن مرحله تا مرحله نهایی است. در اینجا سیاست بهینه، مقدار برداشت بهینه است که ارزش فعلی به حداکثر می رسد. وقتی که وضعیت را به طور حتم قابل پیش بینی بدانیم، مدل ریاضی مورد استفاده را برنامه ریزی پویا می نامیم، اما در اینجا فرض می شود که یکی از وضعیت ها (قیمت چوب سرپا) به طور حتم قابل پیش بینی نیست. بنابراین به روش ریاضی مورد استفاده برای تعیین مقدار برداشت بهینه، برنامه ریزی اتفاقی پویا می گوئیم.

این بررسی، اولین تحقیق در زمینه بهره برداری بهینه به روش برنامه ریزی تصادفی پویا در ایران است. تحقیقات مشابهی در کشورهای دیگر انجام گرفته است. روش برنامه ریزی تصادفی پویا، ابتدا در سال ۱۹۷۵ ارائه شد (Bellman, 1975). جزئیات نظری کنترل بهینه پویا و حتمی توسط Fleming & Rishel, (1975) تشریح شد. Chow, (1979) مقدمه ای در مورد نظریه کنترل بهینه با استفاده از معادلات دیفرانسیل در حالت تصادفی ارائه کرد. معادلات بهینه سازی برداشت بهینه از جنگل با توجه به قیمت بازار و مقدار رویش ارائه شده است (Lohmander, 2000; Lohmander, 2007).

## مواد و روش ها

- معادله رویش

معادله رویش زیستی، نخستین بار در سال ۱۹۵۴ ارائه شد (Schaefer, 1954). مدل شفر، نوعی مدل لجستیک پویای جمعیت است که شکل کلی آن به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} x &= x(t) & \text{مقدار بیوماس در زمان } t \\ \dot{x} &= F(x) \end{aligned} \quad (1)$$

رگرسیون استفاده شد. با توجه به آزمون آماری  $t$ -استیودنت، بین پارامترهای  $G$ ،  $V$  و  $V^2$  رابطه معنی‌داری وجود دارد که برای  $V$  و  $V^2$  به ترتیب  $۵/۲۲۶$  و  $۲/۰۸۴$  به دست آمد.

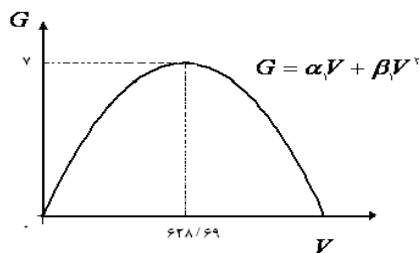
از رابطه زیر برای تعیین مقدار موجودی جنگل زمانی که رویش سالیانه به حداکثر می‌رسد، استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial G}{\partial V} = \alpha_1 + 2\beta_1 V \quad (۵)$$

رابطه بالا از مشتق‌گیری رابطه ۴ به دست می‌آید. اگر رابطه ۵ مساوی صفر قرار داده شود ( $\alpha_1 + 2\beta_1 V = 0$ )، می‌توان رابطه ۶ را به دست آورد که به ازای این مقدار حجم ( $V$ )، رویش سالیانه به حداکثر می‌رسد.

$$V = -\frac{\alpha_1}{2\beta_1} \quad (۶)$$

شکل ۲ گویای این واقعیت است که اگر برآوردهای  $\alpha_1$  و  $\beta_1$  جدول ۲ در رابطه ۶ قرار داده شود، مشاهده می‌شود که رویش سالیانه در جایی به حداکثر خود می‌رسد که حجم در هکتار توده،  $۶۲۸/۶۹$  متر مکعب باشد. این حجم در واقع حداکثر بازدهی قابل تحمل<sup>۱</sup> جنگل است. اگر در معادله ۴ از پارامترهای  $\alpha_1$  و  $\beta_1$  به دست آمده برای جنگل خیرود و حجم در هکتار  $۶۲۸/۶۹$  متر مکعب و فرض  $\varepsilon = 0$  استفاده شود، مقدار رویش ( $G$ )،  $۷$  متر مکعب در سال برای هر هکتار جنگل به دست می‌آید. از این رو، حداکثر رویش در هکتار زمانی اتفاق می‌افتد که حجم توده،  $۶۲۸/۶۹$  متر مکعب در هکتار باشد. در این صورت حداکثر رویش قابل تحمل به  $۷$  متر مکعب در هکتار و در سال می‌رسد (شکل ۳).



شکل ۲- رویش ( $G$ ) به عنوان تابعی از حجم ( $V$ )

با افزودن بهره‌برداری  $h(t)$  به مدل به عنوان تابعی از زمان، معادله تولید را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\dot{x} = F(x) - h(t) \quad \text{و} \quad h(t) \geq 0 \quad (۳)$$

برای تعیین معادله رویش از داده‌های رویش سری نم‌خانه (زاهدی امیری، ۱۳۷۰) و سری پاتم (مجنونیان و اتر، ۱۳۷۱) جنگل خیرود استفاده شد. این جنگل‌ها ناهمسال و مخلوطاند و گونه‌های راش، ممرز، افرا، توسکا، بلوط و ... در آنها وجود دارد. داده‌های مورد استفاده به رویش جنگل ارتباط دارند و نه محصول آن. نحوه آماربرداری و محاسبه رویش جنگل خارج از بحث این مقاله است و برای اطلاعات بیشتر در مورد آن، می‌توان به منابع ذکر شده رجوع کرد.

جدول ۱- داده‌های رویش جنگل خیرود در شمال ایران

حجم (متر مکعب/هکتار)	رویش (مترمکعب/هکتار/سال)
۱۷۰	۲/۲
۲/۲۴۲	۸۲/۴
۳۴۰	۳۱/۴
۳۸۸	۸۳/۵
۸/۴۵۷	۳۲/۸
۵۴۴	۱۴/۷
۶۰۷	۰۸/۶

برای دستیابی به معادله‌ای که بیانگر رویش منطقه باشد از رابطه زیر استفاده شد:

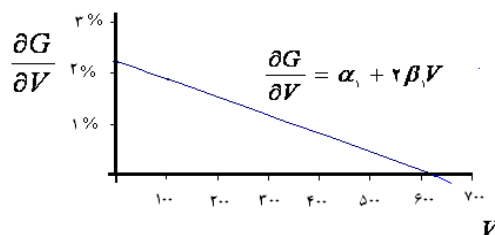
$$G_i = \alpha_1 V_i + \beta_1 V_i^2 + \varepsilon_i \quad (۴)$$

که در آن  $G_i$  رویش سالیانه،  $V_i$  حجم سرپا،  $\alpha_1$  و  $\beta_1$  پارامترهای برآورده شده هستند.

این معادله رویش نوعی مدل رویش لجستیکی است و با وجود مشاهدات کم به خوبی نشان‌دهنده رابطه بین موجودی سرپا و مقدار رویش است و از نظر تئوری خصوصیات ریاضی مدل را به خوبی توصیف می‌کند.

در این مدل فرض بر این است که  $\varepsilon$  برابر با یک سری از خطاهای با توزیع نرمال با میانگین صفر و خودهمبستگی صفر است. برای برآورد معادله رویش از تجزیه و تحلیل

ریاضی مدل را توصیف می کند. مدل رویش لجستیک سابقه طولانی در علوم دارد و برای برآورد رویش بسیاری از جانداران مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به اینکه داده های مربوط به رویش، در جنگل مورد بررسی کم بود، از مدل ریاضی استفاده شد که با توجه به تعداد کم مشاهدات، در محاسبه پارامترهای معادله رویش از نظر آماری مشکلی به وجود نیامد. در مدل برآورد شده رویش در این تحقیق، فقط به رابطه بین موجودی سرپا و مقدار رویش پرداخته شد و اثر متغیرهای دیگر، مثل حاصلخیزی رویشگاه، درجه آمیختگی و ... در نظر گرفته نشد. با استفاده از داده های رویش بیشتر و در نظر گرفتن دیگر متغیرهای یاد شده می توان به دقت معادله رویش افزود.



شکل ۳- نرخ رشد ( $\frac{\partial G}{\partial V}$ ) به عنوان تابعی از حجم

در کشورهای مختلف، تحقیقات زیادی در زمینه جزییات رویش جنگل صورت گرفته است. هدف از این پژوهش، برداشت بهینه اقتصادی جنگل های شمال کشور است. به این منظور، جمع آوری داده ها، برای برآورد یک معادله رویش دقیق بسیار مهم است که از نظر تئوری خصوصیات

جدول ۲- پارامترهای برآورد شده رویش بر اساس داده های جنگل خیرود کنار.

$\delta$ (انحراف از معیار $\mathcal{E}$ )	R	R <sup>2</sup>	$\beta_1$	$\alpha_1$	
۱/۱۲۶	۰/۸۵۷	۰/۷۳۴	-۰/۰۰۰۱۷۷۷۲	۰/۰۲۳۳۴۶۲	ارزش پارامتر
			۰/۰۰۰۰۰۸۵۳	۰/۰۰۴۲۷۶۳	انحراف معیار
			-۲/۰۸۳	۵/۲۲۶	t آماری

میانگین قیمت ( $P_{eq}$ ) با استفاده از رابطه زیر بر اساس مدل خودکاهشی محاسبه شد:

$$P_{eq} = \frac{\alpha_2}{1 - \beta_2} \quad (۸)$$

اگر برای برآورد  $\alpha_1$  و  $\beta_1$  از جدول ۳ استفاده شود، میانگین قیمت، ۴۷۶ هزار ریال در متر مکعب خواهد شد.

- قیمت چوب سرپا

داده های قیمت چوب سرپا، از تفاوت قیمت چوب آلات الواری، گردهبینه، کاتین و چوب هیزمی در کنار جاده جنگلی با هزینه های متغیر بهره برداری به دست آمد و از شاخص قیمتی مصرف کننده برای حذف تورم استفاده شد (شکل ۴) (Mohammadi, 2006).

مدل خودکاهشی<sup>۱</sup> زیر برای تعیین پارامترهای قیمت چوب سرپا استفاده شد:

$$P_{t+1} = \alpha_2 + \beta_2 P_t + \varepsilon \quad (۷)$$

در اینجا فرض شده که  $\varepsilon$  یک سری از خطاهای دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و خودهمبستگی صفر است و مقدار  $\beta_2$  بین صفر و یک است ( $0 < \beta_2 < 1$ ).

جدول ۳- برآورد پارامترهای قیمت بر اساس داده‌های قیمت چوب سرپا برای مدل خودکاهشی از سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۴.

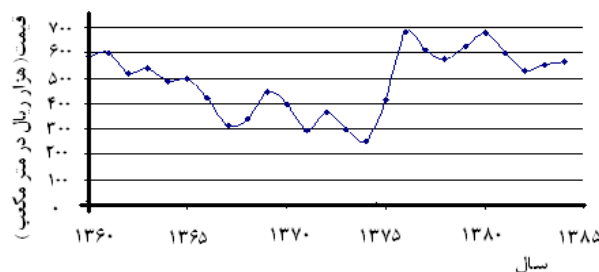
$\delta$ (انحراف از معیار $\mathcal{E}$ )	R	R <sup>2</sup>	$\beta_2$	$\alpha_2$	
۸۱۷/۸	۷۴۵/۰	۵۵۵/۰	۷۴۰/۰	۳۶۷/۱۲	ارزش پارامتر
			۱۴۵/۰	۱۸۸/۷	انحراف معیار
			۱۰۳/۵	۷۲۰/۱	T آماری

برگشتی برنامه‌ریزی تصادفی پویا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۱۰)

$$f_t(m) = \max_{u \in U(m)} \left\{ R_t(m, u) + d \sum_n p(n|m, u) f_{t+1}(n) \right\} \quad \forall m \in M$$

$p(n|m, u)$  احتمال رسیدن به وضعیت  $n$  در دوره بعدی است، اگر وضعیت ورودی در این دوره  $m$  و کنترل  $u$  باشد.  $d$  نرخ تنزیل در یک دوره است. در اینجا، وضعیت دو بعدی است. یک بعد وضعیت مقدار حجم در هکتار و بعد دیگر آن قیمت است. در اینجا حجم بر اساس معادله حتمی افزایش می‌یابد. اگر برداشت صورت گیرد، حجم کاهش می‌یابد. فرض بر این است که قیمت از فرایند تصادفی مارکوف پیروی می‌کند. شایان ذکر است که مدل مارکوف، یک الگوی ریاضی برای پیش‌بینی آینده یک پدیده با استفاده از داده‌های گذشته آن است. در این مدل احتمال وقوع پدیده در آینده از حالتی تصادفی پیروی می‌کند. تصمیم‌های بهینه بر اساس آخرین اطلاعات وضعیت و در اینجا بر اساس مقدار موجودی سرپا و قیمت چوب سرپا، صورت می‌گیرد. آخرین اطلاعات در ابتدای هر دوره در دسترس مدیر جنگل است که بر اساس آن درباره مقدار برداشت تصمیم خواهد گرفت. نرم‌افزار طراحی‌شده مدیریت بهینه جنگل (OCCFM)<sup>۱</sup> توسط پروفیسور Peter Lohmander از دانشگاه علوم کشاورزی (SLU) سوئد، برای تعیین مقدار برداشت بهینه استفاده شد. این نرم‌افزار مسائل را در محیط PERL<sup>۲</sup> حل می‌کند. به منظور بهینه‌سازی، پارامترهای معادله رویش، معادله قیمت، مقدار حداقل حجم ممکن، طول دوره، هزینه استقرار ماشین‌آلات بهره‌برداری (در این تحقیق هزینه انتقال گروه‌های قطع و



شکل ۴- قیمت واقعی چوب سرپا، تعدیل‌شده به سطح قیمت سال ۱۳۸۴ در ایران در طول سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۴ (هزار ریال در متر مکعب).

- روش برنامه‌ریزی تصادفی پویا

از نظر ریاضی تصمیم‌گیری‌های بهینه از طریق برنامه‌ریزی اتفاقی پویا به صورت زیر صورت می‌گیرد. ابتدا مقدار ارزش فعلی مورد انتظار برای دوره نهایی ( $T$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۹)

$$f_T(m) = \max_{u \in U(m)} \{ R_T(m, u) \} \quad \forall m \in M$$

در اینجا،  $M$ ، نشان‌دهنده مجموعه وضعیت‌ها است و دوره با  $t$  نشان داده می‌شود، یعنی  $t \in \{0, 1, 2, \dots, T\}$ .

$f_t(m)$  ارزش فعلی بهینه مورد انتظار سود در ابتدای دوره  $t$  است، وقتی که  $m$  نشان‌دهنده وضعیت (در اینجا حجم) ورودی سیستم در دوره  $t$  است.  $R_t(m, u)$  سود در دوره  $t$  معادله‌ای از وضعیت ورودی در همان دوره و کنترل (تصمیم‌گیری یا برداشت)  $u$  است.  $U(m)$  نشان‌دهنده کنترل ممکن، معادله‌ای از وضعیت ورودی است.  $U(0)$  را می‌توان به عنوان معادله‌ای از زمان تعریف کرد که در اینجا ضرورت ندارد.

تصمیم‌گیری بهینه و ارزش فعلی مورد انتظار در دوره‌های قبل از  $T$ ، یعنی  $t \in \{0, 1, 2, \dots, T-1\}$  به کمک الگوریتم

1- Optimal Continuous Cover Forest Management

2- Practical Extraction and Report Language

درمتر مکعب،  $i$  نرخ سود سرمایه در بازار و  $t_1$  دوره چرخش است.

### نتایج

- نتایج برنامه‌ریزی تصادفی پویا

بعد از اجرای نرم‌افزار OCCFM نتایج زیر به دست می‌آید:

ماتریس احتمالی انتقالی (نمونه سیستماتیک):

ماتریس احتمالی انتقالی نشان‌دهنده توزیع قیمت در دوره آینده به شرط معلوم بودن قیمت در دوره گذشته است (جدول ۴). در اینجا فقط یک نمونه سیستماتیک ارائه شد، زیرا کل ماتریس احتمالی انتقالی شامل اعداد زیادی خواهد شد. در الگوریتم عددی، تابع چگالی احتمال باقی‌مانده اتفاقی در یک مرحله انتقال تقریب گسسته‌ای از یک تابع مثلثی است. واریانس متغیر اتفاقی ( $\delta^2$ ) با تابع چگالی احتمالی مثلثی به صورت زیر است:

$$2 \int_0^b \left(a - \frac{a}{b} \varepsilon\right) \varepsilon^2 d\varepsilon. \quad (12)$$

به طوری که  $ab = 1$  و می‌توان مقادیر زیر را بدست آورد:

$$a = \frac{1}{\delta\sqrt{6}}, b = \delta\sqrt{6}$$

وسایل بهره‌برداری به داخل جنگل است)، نرخ بهره بازار، شاخص حداکثر حجم (حداکثر بازدهی قابل تحمل)، حداکثر حجم قابل برداشت و مجموعه وضعیت‌های قیمت و اختلاف بین آنها با در نظر گرفتن شرایط ایران به نرم‌افزار داده شد.

- محاسبه ارزش فعلی در حالت حتمی

برای محاسبه دوره بهینه بهره‌برداری با هزینه‌های مختلف استقرار ماشین‌آلات بهره‌برداری، مقدار ارزش فعلی محاسبه شد. موقعی که قیمت بی‌ثبات نیست و اولین بهره‌برداری در سال  $t_1$  انجام می‌گیرد، ارزش فعلی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\pi = \frac{\bar{P}gt_1 - c}{(1+i)^{t_1} - 1} \quad (11)$$

که در آن،  $g$  رویش سالیانه و  $c$  هزینه استقرار ماشین‌آلات در هر هکتار و در هر بار برداشت است که در اینجا با فرض‌های ۵۰۰ هزار ریال و یک میلیون ریال در هکتار در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادله رویش ۴، در صورتی که موجودی در هکتار ۱۰۰ متر مکعب باشد، مقدار رویش سالیانه، ۲/۰۵ متر مکعب به دست می‌آید. در اینجا  $\bar{P}$  میانگین قیمت چوب سرپا بوده و بر اساس محاسبات انجام گرفته در بخش‌های قبل برابر است با ۴۷۶ هزار ریال

جدول ۴- ماتریس احتمالی انتقالی (نمونه سیستماتیک) فقط ۵ ردیف و ۴ ستون در اینجا آورده شده است.

		$P_2 =$ قیمت در دوره آینده	
		$P_1 =$ قیمت در دوره گذشته	
$P_2 = ۶۰۲/۷$	$P_2 = -۳۹۸/۱۲$	$P_2 = -۵۲/۳۹۸$	$P_1 = -۵۲/۳۹۸$
.	۰/۱۶۳۳	.	$P_1 = -۳۲/۳۹۸$
۰/۰۵۰۴	۰/۴۴۰۸	.	$P_1 = -۱۲/۳۹۸$
۰/۳۷۰۴	۰/۱۲۹۵	.	$P_1 = ۷/۶۰۲$
۰/۲۳۵۴	.	.	$P_1 = ۲۷/۶۰۲$
.	.	.	

بیشتر باشد، موجودی باید بی‌درنگ برداشت شود تا به پایین‌ترین سطح ممکن برسد (۱۰۰ متر مکعب در هکتار). در مواقع دیگر وقتی که قیمت فعلی کمتر از ۱۲۷۰ هزار ریال در متر مکعب باشد، باید بیشتر صبر کرد. وقتی قیمت فعلی ۷۷۰ هزار ریال در متر مکعب است، باید منتظر ماند تا

- بهره‌برداری بهینه در وضعیت‌های مختلف در این بخش، بهره‌برداری بهینه به ازای قیمت‌های مختلف و وضعیت‌های مختلف موجودی در هکتار محاسبه شد. بدین صورت که اگر موجودی بیش از ۱۰۰ متر مکعب در هکتار و قیمت فعلی ۱۲۷۰ هزار ریال در متر مکعب یا

در هکتار برداشت شود. وقتی که قیمت فعلی ۴۷۰ هزار ریال در متر مکعب باشد، باید منتظر ماند تا موجودی به ۱۴۸ متر مکعب در هکتار برسد و سپس ۱۶ متر مکعب برداشت شود (جدول ۵).

موجودی به ۱۰۴ متر مکعب در هکتار برسد و سپس ۴ متر مکعب در هکتار برداشت شود. زمانی که قیمت فعلی ۶۷۰ هزار ریال در متر مکعب است، باید منتظر ماند تا موجودی به ۱۰۶ متر مکعب در هکتار برسد و سپس ۶ متر مکعب

جدول ۵- مقدار برداشت بهینه در وضعیت‌های مختلف، در اینجا فقط ۵ ردیف و ۶ ستون نمایش داده شده است.

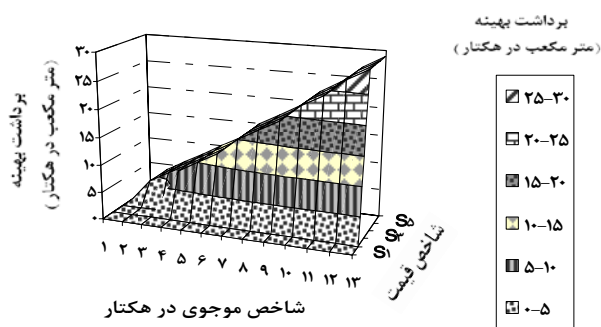
$i=6$	$i=5$	$i=3$	$i=2$	$i=1$	$i=0$	$i =$ شاخص موجودی در هکتار	$P =$ قیمت (هزار ریال / متر مکعب)	شاخص $z =$ قیمت
$V=112$	$V=110$	$V=106$	$V=104$	$V=102$	$V=100$	$V =$ موجودی در هکتار (مترمکعب/هکتار)		
۱۲	۱۰	۶	۴	۰			$P=870$	$z=14$
۱۲	۱۰	۶	۴	۰			$P=770$	$z=13$
۱۲	۱۰	۰	۰	۰			$P=670$	$z=12$
۰	۰	۰	۰	۰			$P=570$	$z=11$
۰	۰	۰	۰	۰			$P=470$	$z=10$

جدول ۶- شاخص‌های موجودی و قیمت خالص

شاخص قیمت خالص	هزار ریال / متر مکعب	شاخص موجودی در هکتار	مترمکعب / هکتار
S1	۷۰	۱	۱۰۲
S3	۲۷۰	۵	۱۱۰
S5	۴۷۰	۱۰	۱۲۲

- ارزش‌های فعلی مورد انتظار کل - وقتی که تغییرپذیری قیمت و برداشت انطباقی در نظر گرفته شد، ارزش فعلی مورد انتظار کل برای موجودی‌های مختلف در هکتار و حالت‌های مختلف قیمت محاسبه شد (جدول ۷). زمانی که قیمت، ۴۷۰ هزار ریال در متر مکعب و موجودی ۱۰۰ متر مکعب در هکتار باشد، ارزش فعلی مورد انتظار کل ۳۵۱۱۰ هزار ریال در هکتار است. شکل ۶ ارتباط بین ارزش فعلی مورد انتظار، موجودی در هکتار و قیمت خالص را نشان می‌دهد. ارزش فعلی مورد انتظار، تابع افزایشی از قیمت خالص و مقدار موجودی است.

ارتباط بین بهره‌برداری بهینه و وضعیت‌های قیمت خالص در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، مقدار برداشت بهینه، تابع افزایشی از قیمت خالص و مقدار موجودی است.



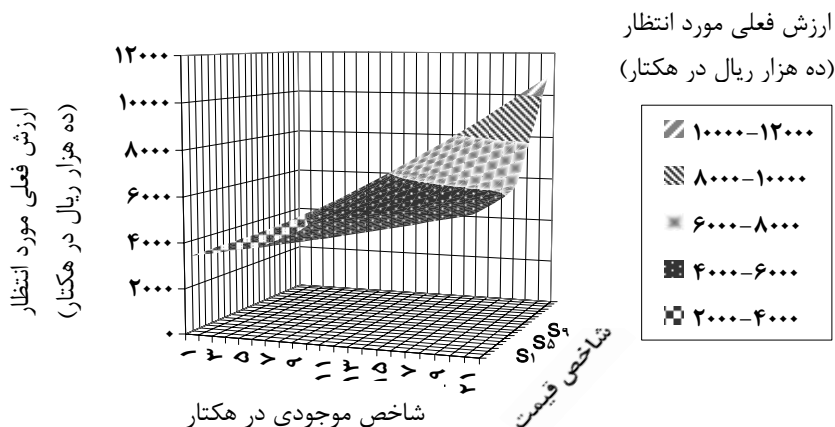
شکل ۵- ارتباط بین موجودی در هکتار، مقدار برداشت بهینه و قیمت خالص

شاخص‌های موجودی در هکتار و قیمت خالص به کار برده شده در شکل ۵ به‌طور نمونه در جدول ۶ آورده شده است.



جدول ۷- ارزش فعلی مورد انتظار کل (هزار ریال / هکتار). در اینجا فقط ۶ ردیف و ۵ ستون نمایش داده شده است.

شاخص = i موجودی در هکتار						
۴	۳	۲	۱	۰	P = قیمت (هزار ریال / متر مکعب)	شاخص z = قیمت
V=۱۰.۸	V=۱۰.۶	V=۱۰.۴	V=۱۰.۲	V=۱۰.۰	P = ۸۷۰	j = ۱۴
۴۲۵۳۰	۴۰۶۳۰	۳۸۷۶۰	۳۷۰۵۰	۳۵۶۳۰	P = ۷۷۰	j = ۱۳
۴۱۵۲۰	۳۹۸۴۰	۳۸۱۸۰	۳۶۷۶۰	۳۵۴۷۰	P = ۶۷۰	j = ۱۲
۴۰۵۲۰	۳۹۱۰۰	۳۷۷۸۰	۳۶۵۲۰	۳۵۳۲۰	P = ۵۷۰	j = ۱۱
۳۹۹۶۰	۳۸۷۲۰	۳۷۵۱۰	۳۶۳۳۰	۳۵۲۰۰	P = ۴۷۰	j = ۱۰
۳۹۶۹۰	۳۸۵۱۰	۳۷۳۵۰	۳۶۲۲۰	۳۵۱۱۰	P = ۳۷۰	j = ۹
۳۹۵۰۰	۳۸۳۶۰	۳۷۲۳۰	۳۶۱۲۰	۳۵۰۴۰		



شکل ۶- ارتباط بین ارزش فعلی مورد انتظار، موجودی در هکتار و قیمت خالص (شاخص‌های قیمت خالص و موجودی در هکتار مطابق جدول ۶ است).

بهره‌برداری تصادفی پویا صورت می‌گیرد، با هم مقایسه و بر اساس نتایج، ارزش فعلی مورد انتظار در حالت اتفاقی ۲۶/۵۴ درصد افزایش پیدا کرد (جدول ۸).

جدول ۸- ارزش فعلی مورد انتظار در حالت قطعی ( $\delta = 0$ ) و در حالت قیمت تصادفی ( $\delta = 1/12$ ) و بهره‌برداری تصادفی پویا صورت می‌گیرد.

انحراف معیار ( $\delta$ )، ده هزار ریال در متر مکعب	$\pi$ (هزار ریال در هکتار)
۰	۲۶۹۰۰
۱/۱۲	۳۴۰۴۰
۱۷/۶۳	۴۱۵۱۰

نتایج محاسبه ارزش فعلی در حالت حتمی - برای تعیین دوره بهینه به ازای هزینه‌های مختلف استقرار ماشین‌آلات، ارزش فعلی مورد انتظار محاسبه شد. وقتی که هزینه استقرار ماشین‌آلات ۵۰۰ هزار ریال در هکتار در نظر گرفته شد، دوره بهینه، ۶ سال و ارزش فعلی مورد انتظار، ۲۷۵۷۵ هزار ریال در هکتار به دست آمد. زمانی که هزینه استقرار ماشین‌آلات از ۵۰۰ هزار ریال به یک میلیون ریال در هکتار به ازای هر بار عملیات بهره‌برداری در جنگل افزایش یافت، دوره بهینه، ۹ سال و ارزش فعلی مورد انتظار، ۲۵۵۱۶ هزار ریال در هکتار به دست آمد. ارزش فعلی مورد انتظار در حالت قطعی ( $\delta = 0$ ) و در حالت تصادفی در صورتی که قیمت تصادفی است ( $\delta = 1/12$ ) و

بررسی Lohmander، انتخاب بهره‌برداری هر پنج سال یکبار بود. بنابراین نتایج بهتری در این تحقیق مورد انتظار است. به عبارت دیگر، در این تحقیق محدودیت حجم وجود دارد، یعنی حجم توده نباید کمتر از ۱۰۰ متر مکعب در هکتار شود؛ در صورتی که در تحقیق Lohmander، چنین محدودیتی وجود نداشت. در پایان به این نتیجه می‌رسیم که محدودیت‌ها اثرهای یکسان بر نتایج مورد انتظار اقتصادی دارند. محدودیت‌ها اغلب دربرگیرنده هزینه‌ها هستند و هزینه محدودیت‌های مختلف (محدودیت برداشت در یک دوره ۵ ساله یا محدودیت حفظ حداقل موجودی ۱۰۰ متر مکعب در هکتار)، به ظاهر اهمیت مشابهی دارند. به هر حال، واضح است که با بهره‌برداری انطباقی می‌توان سود اقتصادی زیادی به دست آورد. در حال حاضر در جنگل‌های ناهمسال شمال ایران از دوره چرخش (پریود) ده ساله به‌طور سنتی استفاده می‌شود. امید است نتایج این پژوهش به سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور کمک کند تا بهره‌برداری بهینه از جنگل‌های ایران را بر اساس آخرین اطلاعات رویش جنگل و قیمت بازار به انجام رساند.

### سپاسگزاری

از پروفسور Peter Lohmander از دانشگاه علوم کشاورزی (SLU) سوئد برای کمک در تجزیه و تحلیل این مقاله قدردانی و تشکر می‌شود.

### منابع

سعید، ارسطو، ۱۳۸۷. جزوه درسی ارزشیابی طرح‌های جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.  
 زاهدی امیری، قوام‌الدین، ۱۳۷۰. تعیین رویش جنگل به تفکیک گونه‌ها در بخش نم‌خانه خیرود با استفاده از روش مستقیم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.  
 مجنونیان، باریس و هرمان اتر، ۱۳۷۱. روش تهیه طرح تجدید نظر جنگلداری در جنگل آموزشی و پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، مجله منابع طبیعی ایران، ویژه‌نامه، ص ۱۰۲.

جدول بالا بیان می‌کند که اگر با توجه به داده‌های تجربی، انحراف معیار ۱۰۰ درصد، یعنی از ۸/۸۲ به ۱۷/۶۳ افزایش یابد، مقدار ارزش فعلی نیز افزایش پیدا می‌کند.

### بحث

در این تحقیق، ابتدا معادله رویش برای جنگل‌های شمال ایران (جنگل خیرود) برآورد و سپس ارزش فعلی مورد انتظار در حالت اتفافی و حتمی محاسبه شد. از مدل برنامه‌ریزی پویا برای امکان برداشت بهینه در قیمت و حجم‌های مختلف استفاده شد. ارزش مورد انتظار در حالت اتفافی، ۲۶/۵۴ درصد افزایش پیدا کرد. در تحقیق دیگر، زمانی که انحراف معیار قیمت تمام‌شده خالص از ۰ درصد به ۳۰ درصد افزایش پیدا کرد، ارزش فعلی مورد انتظار ۴۳/۳ درصد افزایش یافت (Lohmander, 1987). این نتیجه قابل قبول به نظر می‌رسد، به طوری که در سال‌هایی بهره‌برداری می‌شود که قیمت حداقل به اندازه یک انحراف معیار بالاتر از قیمت مورد انتظار باشد. در این تحقیق انحراف معیار باقی‌مانده تصادفی<sup>۱</sup> در معادله قیمت تمام‌شده خالص، دربرگیرنده ۱۸/۵۳ درصد از قیمت خالص مورد انتظار است که از تقسیم ۸/۸۲ بر ۴۷/۶۰۲ به دست می‌آید. در بررسی (Lohmander (1987)، انحراف معیار باقی‌مانده اتفافی در معادله قیمت خالص دربرگیرنده ۳۰ درصد از قیمت خالص مورد انتظار بود که نشان می‌دهد در این تحقیق پیش‌بینی قیمت با اطمینان بیشتری امکان‌پذیر بوده است. آیا می‌توان نتایج این دو تحقیق را با هم مقایسه کرد؟ ارزش فعلی مورد انتظار در این بررسی، ۲۶/۵۴ درصد و در تحقیق Lohmander، ۴۳/۳ درصد افزایش پیدا کرد. اگر دستاوردهای نسبی را به انحراف معیار نسبی قیمت تقسیم کنیم، در تحقیق Lohmander،  $\frac{1}{43} \approx \frac{26/54}{18/53}$  و در این تحقیق  $\frac{1}{44} \approx \frac{43/3}{3}$  به دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که این دو تحقیق خیلی به هم نزدیک‌اند. به هر حال مسئله کمی پیچیده است. در این بررسی فقط یک حق انتخاب بهره‌برداری در سال وجود دارد، در حالی که در

- Bellman, R., 1957. Dynamic programming. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 137pp.
- Buongiorno, J., 2001. Quantifying the implications of transformation from even to uneven-aged forest stands. *Forest Ecology and Management* 151: 121-132.
- Chang, J.S., 1981. Determination of the optimal growing stock and cutting cycle for an uneven-aged stand, *Forest Sciences*, 27: 739-744.
- Chow, G.C. 1979. Optimal control of stochastic differential equation systems. *Journal of Economics and Dynamics and Control* 1:134-175.
- Clark, C.W. 1976. Mathematical bioeconomics, the optimal management of renewable resources, New York, 386pp.
- Duerr, W.A. & W.E. Bond, 1952. Optimal stocking of a selection forest, *Journal of Forestry*, 50: 12-16.
- Duerr, W.A., J. Fedkiw & S. Guttenberg, 1956. Financial maturity: a guide to profitable timber growing, USDA Tech Bull. Report 1146, USA.
- Fleming, W.H. & R.W. Rishel, 1975. Deterministic and stochastic optimal control. Spring Verlag. 185pp.
- Forestry Commission. 1998. The UK forestry standard. Forestry commission . Edinburgh, [http://www.forestry.gov.uk/pdf/fcin29.pdf/\\$FILE/fcin29.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/fcin29.pdf/$FILE/fcin29.pdf): (acceded 21-Mar-2005).
- Hall, D.O., 1983. Financial maturity of uneven-aged and all-aged stands. *Forest Sciences*, 29: 833-836.
- Hool, J.N., 1966. A dynamic programming-Markov chain approach to forest production control. *Forest Sciences, Monograph* 12. 26p.
- Johansson, P.O. & K.G. Löfgren, 1985. The economics of forestry and natural resources. Basil Blackwell press, New York, USA. 292pp.
- Kaya, I. & J. Buongiorno, 1987. Economic harvesting of uneven-aged northern hardwood stands under risk: A Markovian decision model. *Forest Science*. 33: 889-907.
- Lembersky, M.R. & K.N. Johnson, 1975. Optimal policies for managed stands: an infinite time Markov decision process approach. *Forest Sciences* 2: 109-122.
- Lembersky, M.R. 1976. Maximum average annual volume for managed stands. *Forest Sciences*, 2: 69-81.
- Lohmander, P., 1987. The economics of forest management under risk. Ph.D thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Economics Umeå, Sweden. Report No 79, 316pp.
- Lohmander, P., 2000. Optimal sequential forestry decisions under risk. *Annals of Operation Research* 95: 217-228.
- Lohmander, P., 2007. Adaptive Optimization of Forest Management in a Stochastic World, in Weintraub A. et al (Editors), Handbook of Operations Research in Natural Resources, Spinger, Springer Science, International Series in Operations Research and Management Science, New York, USA, 525-544.
- Michie, B.R. 1985. Uneven-aged management and the value of forest land. *Forest Sciences*, 31: 116-121.
- Mohammadi Limaiei, S. 2006. Economically optimal values and decisions in Iranian forest management. Doctoral diss. Dept. of Forest Economics, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), *Acta Universitatis agriculturae Sueciae*. Vol. 2006:9, 111pp.
- Mohammadi, Limaiei, S. & P. Lohmander, 2007. Stumpage prices in the Iranian Caspian forests, *Asian Journal of Plant Sciences*. 6(7): 1027-1036.
- Rardin, R.L. 1998. Optimization in operation research. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 919pp.
- Rollin, F., J. Buongiorno, M. Zhou & J.L. Peyron, 2005. Management of mixed-species, uneven-aged forests in the French Jura: from stochastic growth and price models to decision tables. *Forest Sciences* 5: 64-75.
- Rudin, W., 1987. Real and complex analysis. McGraw-Hill. ISBN 0-07-054234-1.
- Schaefer, M.B., 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. Bulletin of the Inter-American Tropical Tuna Commission, 1: 27-56.

## Deterministic and dynamic optimization in forest harvesting

**S. Mohammadi Limaie**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Faculty of Natural Resources, University of Guilan, I. R. Iran

(Received: 17 May 2009, Accepted: 25 October 2009)

### Abstract

The optimal harvesting can be a function of the stocking volume, stumpage price, harvesting cost, and rate of interest in the capital market. This research was done to determine the optimal harvest decision. First, a growth function was estimated for Kheyroud Forest, North of Iran, then the stumpage price was estimated via an autoregressive model. The optimal harvest was computed based on annual growth and stumpage price functions. The optimal adaptive harvesting which maximizes the expected present value of all profits over time are made conditional on the latest available price and stock level information. In order to determine the optimal harvest level, the optimal harvest decisions were made via stochastic dynamic programming, as well as with deterministic optimization method. The results show that if the stochastic dynamic programming technique is used instead of deterministic optimization method, the expected present value will increase by more than 26% via optimal adaptive decisions.

**Key words:** Stochastic dynamic programming, Growth function, Stumpage price, Deterministic programming.