بهینه‌سازی ایستا و پویای بهره‌برداری از جنگل

سلیمان محمدی لیمائی
استادیار گروه جنگلداری دانشکدهٔ 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 معادلهٔ 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 سالیانهٔ 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 بهره برداری جنگل را به حداکثر می‌رساند. برای تعیین مقدار برداشت بهینهٔ 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 به‌جای برنامه‌ریزی ایستا استفاده شود، ارزش خالص فعلی مورد انتظار، حدود ۲۶ درصد افزایش می‌یابد.

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

*نویسندهٔ مسئول: تلفن: ۰۱۸۲۳۲۲۳۰۲۴ Email: limaei@guilan.ac.ir

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 تهیهٔ طرح جنگلداری از یک سری، همهٔ عملیاتی که باید در دورهٔ آینده در آن اجرا شود در کتابچهٔ 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 انتقادها، 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[1] برای برنامه‌ریزی و محاسبهٔ 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[2] در نظر گرفت. در ریاضیات، به مجموعه‌ای از حالت‌های یک متغیر که در طول یک دورهٔ زمانی به‌وقوع می‌پیوندند، فرایند تصادفی یا اتفاقی گفته می‌شود. ولی فرایند ایستا، فرایندی است که یک پدیده در زمان‌های مختلف، حالتی ثابت دارد.

1- Deterministic
2- Stochastic

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[3] 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) 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[4] 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[5] 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 مرحلهٔ اول، جواب زیرمسئله پیدا می‌شود، سپس جواب آنها با هم جمع می‌شود و جواب کلی مسئله به‌دست می‌آید. برنامه‌ریزی پویا شامل مرحله[6]، وضعیت یا حالت[7] و سیاست بهینه است. هر مسئلهٔ برنامه‌ریزی به مسائل جزیی تبدیل می‌شود که به هر مسئلهٔ

3- Markov
4- Faustmann
5- Dynamic Programming
6- Stage
7- State

جزیی یک مرحله می‌گویند. هر مرحله نشان‌دهندهٔ یک موضع تصمیم‌گیری و شامل یک یا چند وضعیت یا حالت است. تصمیم‌گیری در هر مرحله با توجه به مشخص بودن وضعیت در آن مرحله انجام می‌گیرد. در این تحقیق دو وضعیت وجود دارد که یکی قیمت چوب سرپا و دیگری موجودی در هکتار است. سیاست بهینه در هر مرحله، نشان‌دهندهٔ بهترین تصمیم از آن مرحله تا مرحلهٔ نهایی است. در اینجا سیاست بهینه، مقدار برداشت بهینه است که ارزش فعلی به حداکثر می رسد. وقتی‌که وضعیت را به‌طور حتم قابل پیش‌بینی بدانیم، مدل ریاضی مورد استفاده را برنامه‌ریزی پویا می‌نامیم، اما در اینجا فرض می‌شود که یکی از وضعیت‌ها (قیمت چوب سرپا) به‌طور حتم قابل پیش‌بینی نیست. بنابراین به روش ریاضی مورد استفاده برای تعیین مقدار برداشت بهینه، برنامه‌ریزی اتفاقی پویا می‌گوییم.

این بررسی، اولین تحقیق در زمینهٔ بهره‌برداری بهینه به‌روش برنامه‌ریزی تصادفی پویا در ایران است. تحقیقات مشابهی در کشورهای دیگر انجام گرفته است. روش برنامه‌ریزی تصادفی پویا، ابتدا در سال ۱۹۷۵ ارائه شد (Bellman, 1975). جزئیات نظری کنترل بهینهٔ پویا و حتمی توسط Fleming & Rishel, (1975) تشریح شد. Chow, (1979) مقدمه‌ای در مورد نظریهٔ کنترل بهینه با استفاده از معادلات دیفرانسیل در حالت تصادفی ارائه کرد. معادلات بهینه‌سازی برداشت بهینه از جنگل با توجه به قیمت بازار و مقدار رویش ارائه شده است (Lohmander, 2000; Lohmander, 2007).

مواد و روش‌ها

- معادلهٔ رویش

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

x مقدار بیوماس در زمان t $\quad x = x(t)$

$$\dot{x} = F(x) \qquad (۱)$$

معادلهٔ ۱ بیان می‌کند که مقدار رویش تابعی از ذخیرهٔ بیوماس است. که در آن فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

الف) $F(x) > 0$

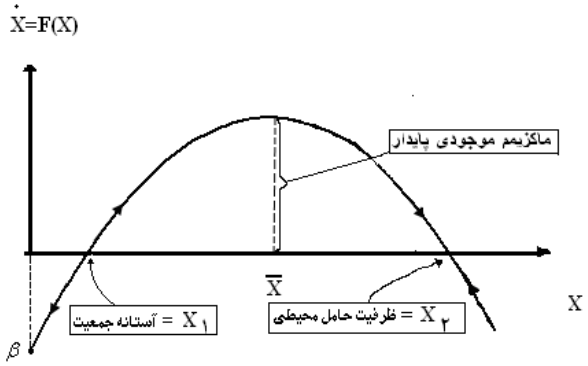
ب) $F(x_1) = F(x_2) = 0$ برای $x \in (x_1, x_2)$ (۲)

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

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

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

نقطهٔ x_2 نشان‌دهندهٔ تعادل پایدار است که می‌توان آن را ظرفیت حامل محیطی تعریف کرد.



شکل۱- معادلهٔ رویش بیوماس

با افزودن بهره‌برداری $h(t)$ به مدل به‌عنوان تابعی از زمان، معادلهٔ تولید را می‌توان به‌صورت زیر نوشت.

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

برای تعیین معادلهٔ 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. نحوهٔ آماربرداری و محاسبهٔ رویش جنگل خارج از بحث این مقاله است و برای اطلاعات بیشتر در مورد آن، می‌توان به منابع ذکرشده رجوع کرد.

جدول۱- داده‌های رویش جنگل خیرود در شمال ایران

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

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

$$G_i = \alpha_1 V_i + \beta_1 V_i^{2} + \varepsilon_i \qquad (۴)$$

که در آن G_i رویش سالیانه، V_i حجم سرپا، α_1 و β_1 پارامترهای برآوردشده هستند.

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

دراین مدل فرض بر این است که ε برابر با یک سری از خطاهای با توزیع نرمال با میانگین صفر و خودهمبستگی صفر است. برای برآورد معادلهٔ رویش از تجزیه و تحلیل رگرسیون استفاده شد. با توجه به آزمون آماری t- استیودنت، بین پارامترهای G، V و V^2 رابطهٔ معنی‌داری وجود دارد که برای V و V^2 به‌ترتیب ۵/۲۲۶ و ۲/۰۸۴ به‌دست آمد.

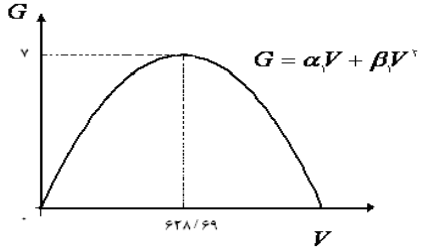
از رابطهٔ زیر برای تعیین مقدار موجودی جنگل زمانی که رویش سالیانه به حداکثر می‌رسد، استفاده می‌شود.

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

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

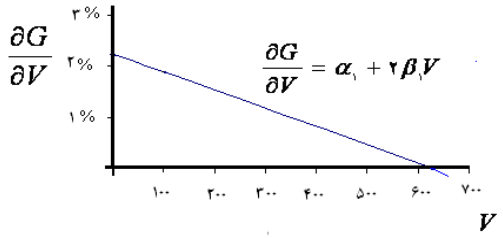
$$V = -\frac{\alpha_1}{2\beta_1} \qquad (۶)$$

شکل ۲ گویای این واقعیت است که اگر برآوردهای α_1 و β_1 جدول ۲ در رابطهٔ 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[1] جنگل است. اگر در معادلهٔ ۴ از پارامترهای α_1 و β_1 به‌دست‌آمده 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 به‌دست می‌آید. از این‌رو، 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 (شکل۳).



شکل۲- رویش (G) به‌عنوان تابعی از حجم (V)

1- Maximum Sustainable Yield



شکل۳- نرخ رشد ($\frac{\partial G}{\partial V}$) به‌عنوان تابعی از حجم

در کشورهای مختلف، تحقیقات زیادی در زمینهٔ جزییات رویش جنگل صورت گرفته است. هدف از این پژوهش، برداشت بهینهٔ اقتصادی جنگل‌های شمال کشور است. به این منظور، جمع‌آوری داده‌ها، برای برآورد یک معادلهٔ رویش دقیق بسیار مهم است که از نظر تئوری خصوصیات ریاضی مدل را توصیف می‌کند. مدل رویش لجستیک سابقهٔ طولانی در علوم دارد و برای برآورد رویش بسیاری از جانداران مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه داده‌های مربوط به رویش، در جنگل مورد بررسی کم بود، از مدل ریاضی استفاده شد که با توجه به تعداد کم مشاهدات، در محاسبهٔ پارامترهای معادلهٔ رویش از نظر آماری مشکلی به‌وجود نیامد. در مدل برآوردشدهٔ رویش در این تحقیق، فقط به رابطهٔ بین موجودی سرپا و مقدار رویش پرداخته شد و اثر متغیرهای دیگر، مثل حاصلخیزی رویشگاه، درجهٔ آمیختگی و ... در نظر گرفته نشد. با استفاده از داده‌های رویش بیشتر و در نظر گرفتن دیگر متغیرهای یادشده می‌توان به دقت معادلهٔ رویش افزود.

جدول۲- پارامترهای برآورد شده رویش بر اساس داده های جنگل خیرود کنار.

	α_1	β_1	R^2	R	δ (انحراف از معیار ε)
ارزش پارامتر	۰/۰۲۲۳۴۶۲	-۰/۰۰۰۱۷۷۷۲	۰/۷۳۴	۰/۸۵۷	۱/۱۲۶
انحراف معیار	۰/۰۰۴۲۷۶۳	۰/۰۰۰۰۰۸۵۳			
t آماری	۵/۲۲۶	-۲/۰۸۳			

- قیمت چوب سرپا

داده‌های قیمت چوب سرپا، از تفاوت قیمت چوب‌آلات الواری، گرده‌بینه، کاتین و چوب هیزمی در کنار جادهٔ جنگلی با هزینه‌های متغیر بهره‌برداری به‌دست آمد و از شاخص قیمتی مصرف‌کننده برای حذف تورم استفاده شد (شکل ۴) (Mohammadi, 2006).

مدل خودکاهشی[1] زیر برای تعیین پارامترهای قیمت چوب سرپا استفاده شد:

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

در اینجا فرض شده که ε یک سری از خطاهای دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و خودهمبستگی صفر است و مقدار β_2 بین صفر و یک است ($0 < \beta_2 < 1$).

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

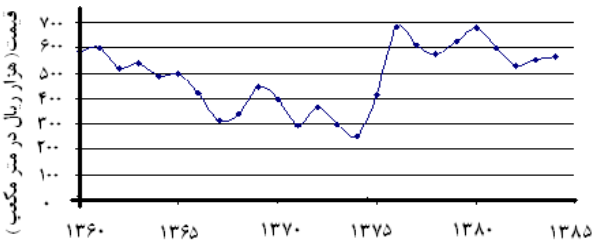
$$P_{eq} = \frac{\alpha_2}{1-\beta_2} \qquad (۸)$$

اگر برای برآورد α_2 و β_2 از جدول ۳ استفاده شود، میانگین قیمت، ۴۷۶ هزار ریال در متر مکعب خواهد شد.

1- Autoregressive Model

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

	α_2	β_2	R^2	R	δ (انحراف از معیار ε)
ارزش پارامتر	۳۶۷/۱۲	۷۴۰/۰	۵۵۵/۰	۷۴۵/۰	۸۱۷/۸
انحراف معیار	۱۸۸/۷	۱۴۵/۰			
T آماری	۷۲۰/۱	۱۰۳/۵			



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 به‌صورت زیر صورت می‌گیرد. ابتدا مقدار ارزش فعلی مورد انتظار برای دورهٔ نهایی (T) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۹)

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

در اینج، M، نشان‌دهندهٔ مجموعهٔ وضعیت‌ها است و دوره با t نشان داده می‌شود، یعنی $t \in \{0,1,2,...,T\}$.

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

تصمیم‌گیری بهینه و ارزش فعلی مورد انتظار در دوره‌های قبل از T، یعنی $t \in \{0.1.2,...,T-1\}$ به‌کمک الگوریتم برگشتی برنامه‌ریزی تصادفی پویا به‌صورت 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 دورهٔ 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 معادلهٔ 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 آیندهٔ یک پدیده با استفاده از داده‌های گذشتهٔ 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 دربارهٔ مقدار برداشت تصمیم خواهد گرفت. نرم‌افزار طراحی‌شدهٔ مدیریت بهینهٔ جنگل (OCCFM[1]) توسط پروفسور Peter Lohmander از دانشگاه علوم کشاورزی (SLU) سوئد، برای تعیین مقدار برداشت بهینه استفاده شد. این نرم‌افزار مسائل را در محیط PERL[2] حل می‌کند. به‌منظور بهینه‌سازی، پارامترهای معادلهٔ رویش، معادلهٔ قیمت، مقدار حداقل حجم ممکن، طول دوره، هزینهٔ استقرار ماشین‌آلات بهره‌برداری (در این تحقیق هزینهٔ انتقال گروه‌های قطع و

1- Optimal Continuous Cover Forest Management
2- Practical Extraction and Report Language

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

- محاسبهٔ ارزش فعلی در حالت حتمی

برای محاسبهٔ دورهٔ بهینهٔ بهره‌برداری با هزینه‌های مختلف استقرار ماشین‌آلات بهره‌برداری، مقدار ارزش فعلی محاسبه شد. موقعی‌که قیمت بی‌ثبات نیست و اولین بهره‌برداری در سال t_1 انجام می‌گیرد، ارزش فعلی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\pi = \frac{\overline{P}\, g t_1 - c}{(1+i)^{t_1} - 1)} \qquad (11)$$

که در آن، g رویش سالیانه و c هزینهٔ 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 معادلهٔ رویش ۴، در صورتی‌که موجودی در هکتار ۱۰۰ متر مکعب باشد، مقدار رویش سالیانه، ۲/۰۵ متر مکعب به‌دست می‌آید. در اینجا $\overline{P}$ میانگین قیمت چوب سرپا بوده و بر اساس محاسبات انجام گرفته در بخش‌های قبل برابر است با ۴۷۶ هزار ریال درمتر مکعب، i نرخ سود سرمایه در بازار و t_1 دورهٔ چرخش است.

نتایج

- نتایج برنامه‌ریزی تصادفی پویا

بعد از اجرای نرم‌افزار OCCFM نتایج زیر به‌دست می‌آید:

ماتریس احتمالی انتقالی (نمونهٔ سیستماتیک):

ماتریس احتمالی انتقالی نشان‌دهندهٔ توزیع قیمت در دورهٔ آینده به شرط معلوم بودن قیمت در دورهٔ گذشته است (جدول ۴). در اینجا فقط یک نمونهٔ سیستماتیک ارائه شد، زیرا کل ماتریس احتمالی انتقالی شامل اعداد زیادی خواهد شد. در الگوریتم عددی، تابع چگالی احتمال باقی‌ماندهٔ اتفاقی در یک مرحلهٔ انتقال تقریب گسسته‌ای از یک تابع مثلثی است. واریانس متغیر اتفاقی (δ^2) با تابع چگالی احتمالی مثلثی به‌صورت زیر است:

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

به‌طوری‌که $ab = 1$ و می‌توان مقادیر زیر را بدست آورد:

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

جدول۴- ماتریس احتمالی انتقالی (نمونهٔ سیستماتیک) فقط ۵ ردیف و ۴ ستون در اینجا آورده شده است.

P۲ = قیمت در دورهٔ آینده / P۱ = قیمت در دورهٔ گذشته	P۲ =-۵۲/۳۹۸	P۲ =-۳۹۸/۱۲	P۲ =۶۰۲/۷
P۱ = -۵۲/۳۹۸	۰	۰/۱۶۳۳	۰
P۱ = -۳۲/۳۹۸	۰	۰/۴۴۰۸	۰/۰۵۰۴
P۱ = -۱۲/۳۹۸	۰	۰/۱۲۹۵	۰/۳۷۰۴
P۱ = ۷/۶۰۲	۰	۰	۰/۲۳۵۴
P۱ = ۲۷/۶۰۲	۰	۰	۰

- بهره‌برداری بهینه در وضعیت‌های مختلف

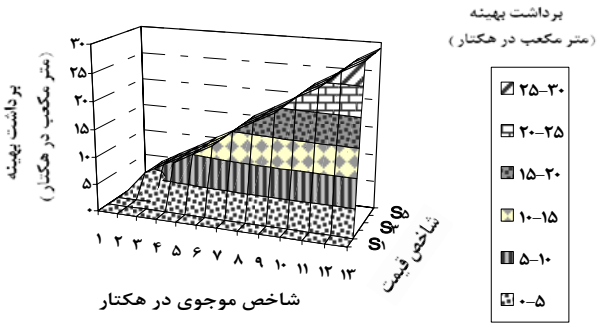
در این بخش، بهره‌برداری بهینه به ازای قیمت‌های مختلف و وضعیت‌های مختلف موجودی در هکتار محاسبه شد. بدین صورت که اگر موجودی بیش از ۱۰۰ متر مکعب در هکتار و قیمت فعلی ۱۲۷۰ هزار ریال در متر مکعب یا بیشتر باشد، موجودی باید بی‌درنگ برداشت شود تا به پایین‌ترین سطح ممکن برسد (۱۰۰ متر مکعب در هکتار). در مواقع دیگر وقتی‌که 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

موجودی به ۱۰۴ متر مکعب در هکتار برسد و سپس ۴ متر مکعب در هکتار برداشت شود. زمانی‌که 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 در هکتار برداشت شود. وقتی‌که 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).

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

		i = شاخص موجودی در هکتار	i=۰	i=۱	i=۲	i=۳	i=۵	i=۶
شاخص j = قیمت	P = قیمت (هزار ریال/ متر مکعب)	V = موجودی در هکتار (مترمکعب/ هکتار)	V=۱۰۰	V=۱۰۲	V=۱۰۴	V=۱۰۶	V=۱۱۰	V=۱۱۲
j = ۱۴	P= ۸۷۰			۰	۴	۶	۱۰	۱۲
j = ۱۳	P= ۷۷۰			۰	۴	۶	۱۰	۱۲
j = ۱۲	P= ۶۷۰			۰	۰	۰	۱۰	۱۲
j = ۱۱	P= ۵۷۰			۰	۰	۰	۰	۰
j = ۱۰	P= ۴۷۰			۰	۰	۰	۰	۰

ارتباط بین بهره‌برداری بهینه و وضعیت‌های قیمت خالص در شکل۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، مقدار برداشت بهینه، تابع افزاینده‌ای 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 به‌کار برده‌شده در شکل ۵ به‌طور نمونه در جدول ۶ آورده شده است.

جدول۶- شاخص‌های موجودی و قیمت خالص

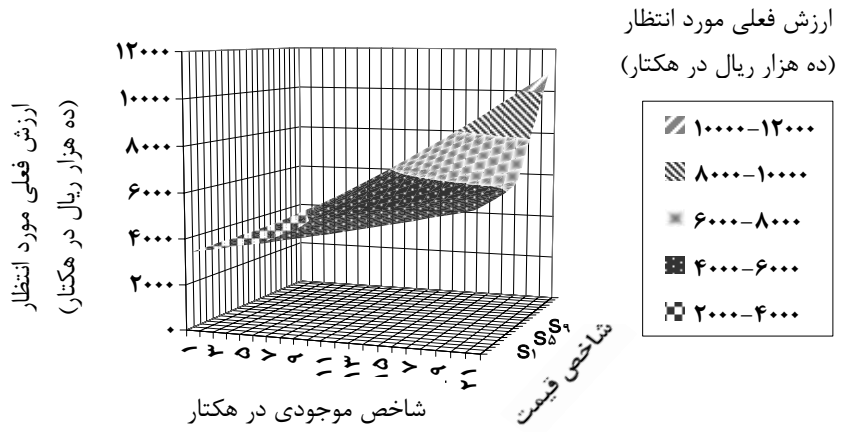
شاخص قیمت خالص	هزار ریال / متر مکعب	شاخص موجودی در هکتار	مترمکعب / هکتار
S۱	۷۰	۱	۱۰۲
S۳	۲۷۰	۵	۱۱۰
S۵	۴۷۰	۱۰	۱۲۲

- ارزش‌های فعلی مورد انتظار کل

وقتی‌که 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). زمانی‌که 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. شکل۶ ارتباط بین ارزش فعلی مورد انتظار، موجودی در هکتار و قیمت خالص را نشان می‌دهد. ارزش فعلی مورد انتظار، تابع افزاینده‌ای از قیمت خالص و مقدار موجودی است.

جدول۷- ارزش فعلی مورد انتظار کل (هزار ریال/ هکتار). در اینجا فقط ۶ ردیف و ۵ ستون نمایش داده شده است.

		i = شاخص موجودی در هکتار	۰	۱	۲	۳	۴
شاخص j = قیمت	P = قیمت (هزار ریال/ متر مکعب)		V=۱۰۰	V=۱۰۲	V=۱۰۴	V=۱۰۶	V=۱۰۸
j = ۱۴	P = ۸۷۰		۳۵۶۳۰	۳۷۰۵۰	۳۸۷۶۰	۴۰۶۳۰	۴۲۵۳۰
j = ۱۳	P = ۷۷۰		۳۵۴۷۰	۳۶۷۶۰	۳۸۱۸۰	۳۹۸۴۰	۴۱۵۲۰
j = ۱۲	P = ۶۷۰		۳۵۳۲۰	۳۶۵۲۰	۳۷۷۸۰	۳۹۱۰۰	۴۰۵۲۰
j = ۱۱	P = ۵۷۰		۳۵۲۰۰	۳۶۳۳۰	۳۷۵۱۰	۳۸۷۲۰	۳۹۹۶۰
j = ۱۰	P = ۴۷۰		۳۵۱۱۰	۳۶۲۲۰	۳۷۳۵۰	۳۸۵۱۰	۳۹۶۹۰
j = ۹	P = ۳۷۰		۳۵۰۴۰	۳۶۱۲۰	۳۷۲۳۰	۳۸۳۶۰	۳۹۵۰۰



شکل۶- ارتباط بین ارزش فعلی مورد انتظار، موجودی در هکتار و قیمت خالص (شاخص‌های قیمت خالص و موجودی در هکتار مطابق جدول۶ است).

- نتایج محاسبهٔ ارزش فعلی در حالت حتمی

برای تعیین دورهٔ بهینه به ازای هزینه‌های مختلف استقرار ماشین‌آلات، ارزش فعلی مورد انتظار محاسبه شد. وقتی‌که هزینهٔ استقرار ماشین‌آلات ۵۰۰ هزار ریال در هکتار در نظر گرفته شد، دورهٔ بهینه، ۶ سال و ارزش فعلی مورد انتظار، ۲۷۵۷۵ هزار ریال در هکتار به‌دست آمد. زمانی‌که هزینهٔ استقرار ماشین‌آلات از ۵۰۰ هزار ریال به یک میلیون ریال در هکتار به ازای هر بار عملیات بهره‌برداری در جنگل افزایش یافت، دورهٔ بهینه، ۹ سال و ارزش فعلی مورد انتظار، ۲۵۵۱۶ هزار ریال در هکتار به‌دست آمد. ارزش فعلی مورد انتظار در حالت قطعی ($\delta = ۰$) و در حالت تصادفی در صورتی‌که قیمت تصادفی است ($\delta = ۸/۸۲$) و بهره‌برداری تصادفی پویا صورت می‌گیرد، با هم مقایسه و بر اساس نتایج، ارزش فعلی مورد انتظار در حالت اتفاقی۲۶/۵۴ درصد افزایش پیدا کرد (جدول۸).

جدول ۸- ارزش فعلی مورد انتظار در حالت قطعی ($\delta = ۰$) و در حالت قیمت تصادفی ($\delta = ۸/۸۲$) و بهره‌برداری تصادفی پویا صورت می‌گیرد.

انحراف معیار(δ، ده هزار ریال در متر مکعب)	π(هزار ریال در هکتار)
۰	۲۶۹۰۰
۸/۸۲	۳۴۰۴۰
۱۷/۶۳	۴۱۵۱۰

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 معادلهٔ رویش برای جنگل‌های شمال ایران (جنگل خیرود) برآورد و سپس ارزش فعلی مورد انتظار در حالت اتفاقی و حتمی محاسبه شد. از مدل برنامه‌ریزی پویا برای امکان برداشت بهینه در قیمت و حجم‌های مختلف استفاده شد. ارزش مورد انتظار در حالت اتفاقی، ۲۶/۵۴ درصد افزایش پیدا کرد. در تحقیق دیگر، زمانی‌که انحراف معیار قیمت تمام‌شدهٔ 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 به‌نظر می‌رسد، به‌طوری‌که در سال‌هایی بهره‌برداری می‌شود که قیمت حداقل به اندازهٔ یک انحراف معیار بالاتر از قیمت مورد انتظار باشد. در این تحقیق انحراف معیار باقی‌ماندهٔ تصادفی[1] در معادلهٔ قیمت تمام‌شدهٔ خالص، دربرگیرندهٔ ۱۸/۵۳ درصد از قیمت خالص مورد انتظار است که از تقسیم ۸/۸۲ بر ۴۷/۶۰۲ به‌دست می‌آید. در بررسی Lohmander (1987)، انحراف معیار باقی‌ماندهٔ اتفاقی در معادلهٔ قیمت خالص دربرگیرندهٔ 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، $\frac{۲۶/۵۴}{۱۸/۵۳} \approx ۱/۴۳$ و در این تحقیق $\frac{۴۳/۳}{۳۰} \approx ۱/۴۴$ به‌دست 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 حالی‌که در بررسی Lohmander، انتخاب بهره‌برداری هر پنج سال یک‌بار بود. بنابراین نتایج بهتری در این تحقیق مورد انتظار است. به‌عبارت دیگر، در این تحقیق محدودیت حجم وجود دارد، یعنی حجم توده نباید کمتر از ۱۰۰ متر مکعب در هکتار شود؛ در صورتی‌که 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 دربرگیرندهٔ هزینه‌ها هستند و هزینهٔ محدودیت‌های مختلف (محدودیت برداشت در یک دورهٔ ۵ ساله یا محدودیت حفظ حداقل موجودی ۱۰۰ متر مکعب در هکتار)، به ظاهر اهمیت مشابهی دارند. به‌هر حال، واضح است که با بهره‌برداری انطباقی می‌توان سود اقتصادی زیادی به‌دست آورد. در حال حاضر در جنگل‌های ناهمسال شمال ایران از دورهٔ چرخش (پریود) ده ساله به‌طور سنتی استفاده می‌شود. امید است نتایج این پژوهش به سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشورکمک 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. جزوهٔ درسی ارزشیابی طرح‌های جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران.

زاهدی امیری، قوام‌الدین، ۱۳۷۰. تعیین رویش جنگل به تفکیک گونه‌ها در بخش نم‌خانهٔ خیرود با استفاده از روش مستقیم، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران.

مجنونیان، باریس و هرمان اتر، ۱۳۷۱. روش تهیهٔ طرح تجدید نظر جنگلداری در جنگل آموزشی و پژوهشی دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، مجلهٔ منابع طبیعی ایران، ویژه‌نامه، ص ۱۰۲.

1- Stochastic Residual

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: (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 sequental 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 Limaei, 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, Limaei, 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 Limaei
[1]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 Kheyrud 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.

*Corresponding author Tel: +98 1823223024 Email: limaei@guilan.ac.ir