تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال ششم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۹
Volume 6, No. 1, Spring 2010 (IR-WRR)
۱۴-۲۶

ارائه یک مدل جدید برای مدیریت مخازن آبی، با استفاده از تئوری بازی

مهران همایونفر[۱]، آرمان گنجی[۲*]، داور خلیلی[۳] و علی اکبر موسوی[۳]

چکیده

افزایش تقاضای استفاده از آب باعث افزایش رقابت بر سر منابع محدود آب گردیده است. مدلهای بهینه سازی موجود نیز قادر به ارائه راه حلی برای این مسائل نیستند. لذا در سالهای اخیر به منظور اعمال یک مدیریت کاراتر که رقابت در مصرف را در نظر بگیرد، تعداد محدودی مدلهای بازی پویای تصادفی گسسته ارائه گردیده‌اند. این مدلها عمدتاً مدیریت توزیع آب منطقی و کارایی را ارائه می‌دهند، اما عملیات محاسباتی پیچیده و حجیم دارند. از جمله خصوصیاتی که باعث بروز چنین مشکلات شده، ماهیت گسسته‌ی این مدلها می‌باشد. در این تحقیق مسئله مدیریت و تقسیم آب در قالب یک مدل بازی پویای قطعی پیوسته برای مدیریت مصرف آب در شرایط وجود اختلاف ارائه می‌شود. توابع سود آنی، بلند مدت و همچنین معادله انتقال حالت در مدل پیشنهادی به صورت پیوسته و با استفاده از توابع ریاضی بیان می‌شود که این باعث کاهش در حجم محاسبات می‌گردد. همچنین برای حل مدل بازی پویای پیوسته پیشنهادی، از معادلات ریکاتی استفاده می‌شود. مدل پیوسته مذکور، در حوزه پایین دست سد زاینده رود مورد استفاده قرار گرفت که نتایج مناسبی را در مقایسه با نتایج مدل بهینه سازی پویا (Dynamic Programming) ارائه داد.

کلمات کلیدی: تئوری بازی، بهینه‌سازی، مخزن، مدل‌های پویای پیوسته

تاریخ دریافت مقاله: ۱۲ اسفند ۱۳۸۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۷ خرداد ۱۳۸۹

A Model for Reservoir Operation Based on the Game Theory

M. Homayounfar [1], *A. Ganji* [2*], *D. Khalili* [3], *and A.A. Mousavi* [3]

Abstract

Increasing water demands have formed challenges and conflicts over the limited water resources. The existing optimization models have limitations in resolving such conflict problems. In recent years a few discrete stochastic dynamic models have attempted to solve cases of water use (conflicts) so that more efficient water distribution management can be achieved. These models have to some extent addressed the conflict issues of water resources. However, they still do not cover certain constraints, and also require complicated procedures and massive computational efforts. The discrete nature of these models seems to be the limiting factor. In order to resolve these shortcomings, in this research a continuous dynamic deterministic game model is proposed to manage water supply and consumption under challenging conditions. Continuous value functions (long term), utility functions (short terms), and equation of motion are defined in the proposed model. The mathematical equations are formed in a way to decrease the computational time. For this purpose the Ricatti equations are used to solve the proposed continuous stochastic game model. The proposed model is applied to the Zayandeh-rud river basin in central Iran. The results are quite favorable compared to the Dynamic Programming (DP) model outcomes.

Keywords: Game theory, Optimization, Reservoir, Continuous Dynamic Models.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
۲- استادیار، بخش مناطق بیابانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران
۳- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران
*- نویسنده مسئول

1- Graduate student, Water Engineering Dep., College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
2- Assistant Professor, Dep. of Desert Region Management, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: gaji@shirazu.ac.ir
3- Associate Professor, Water Engineering Dep., College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

امروزه آب به عنوان یکی از عوامل اساسی و لازم در بخش صنعت، کشاورزی و شهری مطرح است. کمبود و توزیع نامتناسب زمانی و مکانی منابع آب باعث بروز اختلافاتی بین مصرف کنندگان این ماده حیاتی شده است. افزایش تقاضای آب، تخلیه منابع آبی و آلودگی مفرط منابع آب، باعث تشدید این اختلافات در زمینه‌های مختلف، از جمله اجتماعی و سیاسی گردیده است. با توجه به این وضعیت رفع اختلاف بین مصرف کنندگان آب تبدیل به یکی از ضروریتهای برنامه‌ریزی منابع شده است. یکی از راه حل‌های موجود، توزیع یا تخصیص عادلانه و بهینه منابع آبی به مصارف گوناگون (مصرف کنندگان) است. محققان حول مسئله تخصیص بهینه منابع آب تحقیقات گسترده‌ای انجام داده‌اند و ابزارهای بسیاری تعریف و بکار رفته است. از جمله این ابزار مدلهای کلاسیک بهینه‌سازی می‌باشند. برنامه‌ریزی پویا (DP) به عنوان یکی از مدلهای کلاسیک، کاربردهای زیادی در حل مسائل بهینه سازی در منابع آب دارد (Yeh, 1985; Kelman et al., 1990; Karamouz and Vasiliadis, 1992; Johnson et al., 1993; Neelakantam and Pundarikanthan, 2000; Huang et al. 2002; Karamouz et al., 2003). البته این روشها به دلیل ماهیت تصادفی مسائل منابع آب سطحی به برنامه‌ریزی پویای تصادفی[1] (SDP) تبدیل شده و به طور گسسته‌ای نیز در منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است (Haung et al., 1991; Goulter and Tai, 1985). عموماً خروجی‌های مدل‌های کلاسیک بهینه سازی (DP, SDP) که از پارامترهای هیدرولوژیکی به عنوان ورودی استفاده می‌کنند، مقدار کل آب قابل تامین مصرف کنندگان بوده و عمدتاً به تقسیم آب در میان آنها توجه ندارند.

این ناتوانی روشهای بهینه سازی کلاسیک در مسائل مربوط به منابع آب و تخصیص آب در اوایل قرن ۲۱ باعث کاربرد روشهای چند هدفه از جمله روش ε-constraint، برنامه‌ریزی هدف[2] و برنامه‌ریزی مصالحه‌ای[3] شد (Longanda and Bhattacharya, 1990; Shiau and Lee, 2005; Mousavi and Ramamurthy, 2000) در سالهای بعد، مدلهای بازی به دلیل سازگاری بیشتر با مسائل رفع اختلاف مورد استفاده قرار گرفت (رضا کراچیان و نجمه محجوبی مجد، ۱۳۸۵، Harboe, 1992، Ko et al., 1992، Simonovic, 1991، Szidarovszky et al., 1984). تعدادی از روشهایی که برای تحلیل اختلافات در منابع آب و براساس تئوری بازیها (مخصوصاً حل چانه زنی ناش) توسعه داده شده‌اند عبارتند از (De Marchi, et al., 2000; Coppla, et al., 2001; Shahidehpour, et al., 2001; Palmer, et al., 2002; Karamouz, et al., 2003).

اگرچه منابع فوق از کاربرد موفقیت آمیز تئوری بازی در منابع آب خبر می‌دادند، اما در اکثر اوقات مسائل اختلاف در توزیع آب ماهیت پویا دارند که مدلسازی آن به دلیل پیچیدگی حل، چندان مورد توجه قرار نگرفته است. یکی از ابزارهای قدیمی مدلسازی مسائل پویای اختلاف، فرآیند تعادل کامل مارکوف[4] (MPE) است (Fundenberg and Tirole, 1994). فرآیند تعادل مارکوف عنوان می‌کند که متغیر حالت سیستم در دوره زمانی بعدی، تابعی از متغیر حالت و متغیر تصمیم سیستم در دوره زمانی حال و یک جزء تصادفی در بازه‌ی زمانی بعدی است و با توجه به این فرض از معادله بلمن برای بیان تغییرات پویای یک سیستم استفاده می‌نماید. مثالهای زیادی از کاربرد فرآیند MPE در مدلسازی بازی وجود ندارد. از این فرآیند برای تحلیل رقابت در مصرف منابع آب زیرزمینی (Negri,1989 and 1990) و در تحلیل آلودگی هوا و گرمایش زمین (Dockner and Van Long, 1993، Martin et al., 1993، Batabyal, 1996) استفاده شده است. اما متاسفانه بیشتر این مطالعات بیان کننده مباحث مفهومی در مورد MPE بوده یا خواص آن را توصیف می‌کنند و تعداد کمی از آنها MPE را در قالب کارهای عملی و تجربی مورد استفاده قرار داده‌اند (Ligon and Narin, 1997). فرآیند MPE، توانایی مدلسازی یک بازی پویای دو یا چند نفره را دارد. اما تا به حال از این مدل در تحلیل اختلاف منابع آب سطحی استفاده نشده است. مدلهای بازی موجود در زمینه آبهای سطحی محدود به مدلهای پویای گسسته‌ای هستند که توسط Ganji, et al. (2007a,b) و Kerachian and Karamouz, (2007) ارائه گردیده است. در ساختار ارائه شده در مقالات این محققین، شکل گسسته‌ی معادله بلمن (Bellman and Dreyfus, 1962) نقش اصلی را دارد. اگرچه این معادله کاربردهای زیادی در حل مسائل پویای بهینه سازی در منابع آب دارد (Huang, et al., 2002، Karamouz et al., 2003، Neelakantan and Pundarikanthan, 2000)، اما به دلیل شکل گسسته و روش حل ضمنی، زمان محاسبات در مدلهای بازی را افزایش می‌دهد.

در این تحقیق مسئله توزیع آب در پایین دست یک مخزن در قالب یک بازی پویای پیوسته توصیف می‌شود. برای بیان معادله MPE از معادله بلمن استفاده می‌شود. ولی تفاوت آن با معادله بلمن استفاده شده در مدل‌های گسسته (همانند DP) در آن است که فضای مربوط

به متغیرهای حالت و تصمیم یک فضای پیوسته بوده و از قطعه قطعه نمودن فضای حل خودداری می‌شود. برای حل مدل بازی پویای پیوسته از روش حل معادلات ریکاتی استفاده خواهد شد. این روش حل یک روش حل صریح بوده و بنابراین همانند روشهای حل ضمنی معادله بلمن، وقت گیر نمی‌باشد. زیرا نیاز به سعی و خطا ندارد. برای این منظور نیز از فرآیند MPE استفاده خواهد شد. جدول ۱ اختلاف میان معادله بلمن ارائه شده برای فرآیند MPE و DP را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مدل پیشنهادی اولاً از لحاظ تعداد بازیکن و ثانیاً در نظر گرفتن ماهیت تصادفی پدیده‌های هیدرولوژیکی در محاسبات، قابل توسعه می‌باشد که ارائه مدل‌های جامع‌تر مورد توجه نویسندگان مقاله است.

جدول ۱- مقایسه روشهای MPE و برنامه‌ریزی پویای قطعی (DP)

محدودیتها	روش حل	متغیر تصمیم	متغیر حالت	مدل
زمان بر	صریح	پیوسته	پیوسته	MPE
شکل درجه دوم تابع مطلوبیت کوتاه مدت	ضمنی	گسسته	گسسته	DP

۲- روش تحقیق و آزمایش

۲-۱- مدل تعادل مارکوفی (MPE)

در برنامه ریزی پویای کلاسیک مخزن سعی می‌شود تا مقدار بهینه متغیر حالت سیستم در هر گام زمانی بر اساس معادله بلمن تعیین شود. برای تعیین مقدار بهینه‌ی متغیر حالت سیستم در هر گام زمانی از یک تابع هدف طراحی شده بر اساس مقدار نیاز یا حجم مخزن استفاده می‌شود. به صورت مشابه در یک مدل پویای مدیریت مخزن که بر اساس تئوری بازی طراحی شده است، باید حالت بهینه متغیر حالت و متغیرهای تصمیم در هر گام زمانی تعیین شوند. البته این مقادیر بهینه باید شرایط تعادل ناش را نیز ارضاء نماید (Gibbons, 1992، Selten, 1975، Petit, 1990). به عبارت دیگر، با یک بازی پویا روبرو هستیم که خود از چندین زیـــربـــازی (در هـــر گـــام زمانی) تشکیـــل شده است. Fundenberg and Tirole, (1994) اثبات کردند که می‌توان چنین تعریفی را از فضای بازی پویا در قالب یک فرآیند مارکوفی بیان نمود و آنرا فرآیند تعادل مارکوف (MPE) نام گذاری کردند. آنها همچنین ثابت کردند که می‌توان از معادله بلمن برای بیان ریاضی فرآیند MPE استفاده نمود (Petit, 1990).

معادلات بلمن قبلاً نیز در مطالعات متعددی برای بیان بازی پویای تصادفی استفاده شده است (Ganji, et al. 2007a, b و Kerachian and Karamouz, 2007). در این مطالعات از حل گسسته معادله بلمن برای یافتن جواب بازی پویای تصادفی استفاده شده بود. در تحقیق حال حاضر، یک حل پیوسته برای معادله بلمن ارائه می‌شود. در این روش حل که روش حل معادلات ریکاتی (Ligon and Narin, 1997) نام گذاری شده است، لزومی برای تعریف یک فضای حل گسسته برای متغیرهای تصمیم و حالت وجود ندارد. بلکه فضای حل مسئله یک فضای پیوسته خواهد بود. بدلیل چنین تعریفی از فضای حل مسئله، ریکاتی یک روش حل صریح (Closed form) می‌باشد و همانند روش‌های حل ضمنی (روش‌های گسسته) نیازی به محاسبات طولانی مدت ندارد. در ادامه توضیحات جامعتری در مورد روش حل معادلات ریکاتی ارائه خواهد شد.

۲-۲- روش حل بازی پویای قطعی با استفاده از معادلات ریکاتی

همانگونه که اشاره شد، می‌توان از معادلات ریکاتی در حل مدلهای بازی پویا استفاده نمود. قبل از این روش ریکاتی برای حل معادله بلمن توسط Miranda and Fackler, (2002) و به منظور حل مسائل پویای اقتصادی ارائه و بررسی گردیده است. در ادامه روش مدلسازی و حل برای بازیهای یک نفره (مدیر مخزن) و چند نفره (دو نفره شامل بخش کشاورزی و مدیر مخزن) مطرح و نتایج ارائه خواهد شد.

۲-۲-۱- حل بازی تک نفره قطعی به روش معادلات ریکاتی

مسئله مصرف آب در حوضه یک رودخانه یا پایین دست یک سد را می‌توان در قالب یک مدل ریاضی بصورت زیر خلاصه نمود. اگر مقدار رهایی آب از مخزن با $x_t,\ t=1,...,n$ و مقدار مطلوبیت آنی کل سیستم، به ازاء مقدار مشخصی از رهایی از مخزن و حجم آب موجود در مخزن با $f(x_t,s_t)$ نشان داده شود. سناریو بهینه رهایی آب در طولانی مدت را می‌توان توسط حل معادله (۱) و (۲) بدست آورد که رابطه (۲) بیان گر معادله انتقال حالت سیستم می‌باشد.

$$\underset{x}{Max}\sum_{t=0}^{\infty} f(x_t,s_t) \qquad (۱)$$

$$\text{Subject to} \quad s_{t+1}=g(s_t,x_t,\varepsilon_{t+1})$$

در روش معادلات ریکاتی فرض می‌شود که f یک تابع درجه دوم از متغیر تصمیم و متغیر حالت بوده و نشان دهنده مقدار تابع هدف در زمان t می‌باشد. تابع g یک تابع چند جمله‌ای و نماینده معادله انتقال حالت (تابع سیاست) است. معادله پسروی بلمن مقدار میانگین ارزش طولانی مدت حاصل از تصمیمات x_t تا زمان حال را به صورت زیر ارائه می‌دهد.

$$v(s_t) = Max\{f(s_t, x_t) + \delta E_\varepsilon v(g(s_t, x_t, \varepsilon_{t+1}))\} \tag{۳}$$

که در این معادله $v(s_t)$ تابع ارزش[۵] و نماینده مقدار کل سود حاصل تا زمان t را نشان داده و δ ضریب کاهش ارزش[۶] و E_ε امید ریاضی روی ε می‌باشد که در حالت حل قطعی مسئله، برابر یک در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که تابع $v(s)$ در روش معادلات ریکاتی از درجه دوم فرض می‌شود. یکی از خصوصیات اصلی معادله (۳) وابستگی تابع سیاست[۷] آن به جزء تصادفی ε است. البته در معادله‌ی فوق می‌توان با جایگزاری ε با مقدار میانگین آن مدل تصادفی LQ[۸] را به یک شکل قطعی[۹] ارائه داد (Miranda and Fackler, 2002). تابع ارزش یک تابع درجه دوم نسبت به متغیر حالت بوده و در نتیجه می‌توان تابع ارزش را به صورت زیر بیان کرد.

$$v(s_t) = \psi_2 s_t^2 + \psi_1 s_t + \psi_0 \tag{۴}$$

که ψ_1، ψ_2 و ψ_3 ضرائب ثابت تابع ارزش هستند. روشن است که برای حداکثر سازی معادله (۳) روش‌هایی قبلاً در منابع آب ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش DP اشاره نمود. اما همانطور که در معادله (۴) دیده می‌شود متغیر حالت پیوسته بوده و بنابراین امکان استفاده از روش حل گسسته DP برای حداکثر کردن تابع ارزش وجود ندارد. بنابراین لازم است تا معادله پیوسته ارائه شده را با مشتق گیری نسبت به متغیر تصمیم سیستم، حداکثر نمود. با مشتق گیری از معادله (۳) نسبت به متغیر تصمیم x_t می‌توان مقدار تابع ارزش حداکثر را محاسبه نمود. قبل از مشتق گیری لازم است تا جزء دوم سمت راست معادله (۳)، با معادله درجه دوم تابع ارزش جایگزین شود. در نتیجه معادله بلمن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned}\psi_2 s_t^2 + \psi_1 s_t + \psi_0 &= Max\{f(s_t, x_t) + \\ &\delta(\psi_2(g(s_t, x_t))^2 + \psi_1 g(s_t, x_t) + \psi_0)\}\end{aligned} \tag{۵}$$

با مشتق گیری از سمت راست معادله (۵) نسبت به متغیر تصمیم x_t و برابر صفر قرار دادن آن (معادله ۶)، مقدار بهینه متغیر x_t (معادله ۶) به صورت تابعی از ضرائب $\psi_i,\ i=\{0,1,2\}$ ایجاد می‌شود:

$$\frac{\partial f}{\partial x_t} + \delta\left(2\psi_2 g(s_t, x_t)\frac{\partial g}{\partial x_t} + \psi_1 \frac{\partial g}{\partial x_t}\right) = 0 \tag{۶}$$

$$\begin{aligned}\hat{x}_t &= \arg\max\{f(s_t, x_t) + \\ &\delta(\psi_2 g(s_t, x_t)^2 + \psi_1 g(s_t, x_t) + \psi_0)\}\end{aligned} \tag{۷}$$

که در آن $\hat{x}_t$ مقدار متغیر تصمیمی است که طرف راست معادله (۵) را حداکثر می‌سازد. با قرار دادن معادلات مربوط به این مقدار در سمت راست معادله (۵) و مرتب کردن معادله حاصل بر حسب متغیر حالت سیستم، معادله (۸) حاصل می‌گردد:

$$\begin{aligned}\psi_2 s_t^2 + \psi_1 s_t + \psi &= a s_t^2 + b s_t + c + \delta\psi_0 + \\ &\frac{\psi_1}{1400}\left(I - \frac{700\psi_1 + I\psi_2}{\psi_2}\right) \\ &+ \frac{\psi_1}{(1400)^2}\left(I - \frac{700\psi_1 + I\psi_2}{\psi_2}\right)^2\end{aligned} \tag{۸}$$

که در این رابطه a، b و c ضرایب معادله مطلوبیت کوتاه مدت متعلق به مدیر مخزن (Ganji et al., 2007 a,b) و I میانگین سالانه جریان ورودی به مخزن سد می‌باشد. با برابر قرار دادن ضرائب متغیر حالت سیستم در معادله (۸)، سه جفت معادله بر حسب $\psi_i,\ i=\{0,1,2\}$، حاصل می‌گردد. با حل هم زمان آنها سه مجموعه $\psi_i,\ i=\{0,1,2\}$ بدست می‌آید. حال باید تحلیلگر مشخص کند که کدام یک از این مجموعه‌ها ضرایب درست را ارائه می‌دهد. برای این منظور هر مجموعه از ضرایب بدست آمده را در معادله (۶) جایگزین می‌کنیم. معادله خطی حاصل، رابطه میان حجم مخزن s_t و x_t را نشان می‌دهد. این معادله همان قانون کاربری مخزن است. هر مجموعه از ضرایب بدست آمده یک معادله کاربری بخصوص ایجاد می‌کند که باید از میان آنها معادله کاربری منطقی انتخاب شود. برای این منظور باید به عرض از مبداء و شیب معادلات بدست آمده توجه کرد. برای مثال منفی بودن عرض از مبدأ معادله کاربری مخزن نشانه غیر منطقی بودن جواب‌های بدست آمده است. همچنین شیب معادله کاربری نباید منفی باشد، به این علت که با افزایش میزان حجم ذخیره (متغیر حالت) در مخزن، باید مقدار رهایی از مخزن (متغیر تصمیم) افزایش یابد. در نهایت با تشخیص ضرائب منطقی (ψ_1، ψ_2 و ψ_3) و جایگذاری پاسخها در رابطه (۴)، تابع ارزش (تابع هدف بلند مدت) حاصل می‌شود.

۲-۲-۲- حل بازی چند نفره قطعی به روش معادلات ریکاتی (متقارن و نامتقارن)

روش معادلات ریکاتی را برای بازی‌های چند نفره متقارن و نا متقارن هم می‌توان به کار برد. در بازی‌های چند نفره متقارن می‌توان فرض کرد که توابع ارزش همه بازیکنها یکسان بوده و به شکل معادله (۹) می‌باشد

$$v_p(s) = \psi_2 s_t^2 + \psi_1 s_t + \psi_0 \quad for \ \ p = 1, 2, ..., m \tag{۹}$$

که در این رابطه p شمارنده بازیکن‌ها و m تعداد بازیکن‌ها می‌باشند. برای حل بازی‌های چند نفره متقارن می‌توان آنها را به یک بازی نامتقارن دو نفره تبدیل کرد، با این فرض که یکی از بازیکن‌ها را با اندیس p و بقیه بازیکن‌ها را به عنوان بازیکن دیگر با اندیس $-p$ معرفی کنیم. در این حالت می‌توان بازی را به روش یک بازی نامتقارن دو نفره (p و $-p$) حل کرد. در این حالت معادله انتقال حالت به صورت معادله (۱۰) بیان می‌شود.

$$s_{t+1} = g(s_t, x_{-p,t}, x_{p,t}, \varepsilon_{t+1}) \tag{۱۰}$$

که در آن $x_{-p,t}, x_{p,t}$ به ترتیب متغیرهای تصمیم مربوط به بازیکن‌های p و $-p$ هستند. معادلات بلمن که مقدار میانگین ارزش طولانی مدت حاصل از تصمیمات $x_{-p,t}, x_{p,t}$ را تا زمان حال ارائه می‌دهند، برای دو بازیکن به شکل معادلات (۱۱) و (۱۲) ارائه می‌شوند:

$$\begin{aligned} &\psi_2 s_t^2 + \psi_1 s_t + \psi_0 \\ &= \underset{x_{p,t}}{Max}\{ f(s_t, x_{p,t}) + \delta(\psi_2 (g(s_t, x_{-p,t}, x_{p,t}))^2 \\ &+ \psi_1 (g(s_t, x_{-p,t}, x_{p,t})) + \psi_0)\} \end{aligned} \tag{۱۱}$$

$$\begin{aligned} &(m-1) * \psi_2 s_t^2 + \psi_1 s_t + \psi_0 \\ &= \underset{x_{-p,t}}{Max}\{ f(s, x_{-p,t}) + \delta(\psi_2 (g(s_t, x_{-p,t}, x_{p,t}))^2 \\ &+ \psi_1 (g(s_t, x_{-p,t}, x_{p,t})) + \psi_0)\} \end{aligned} \tag{۱۲}$$

با مشتق گیری از سمت راست معادلات (۱۱) و (۱۲) بر حسب $x_{-p,t}, x_{p,t}$، معادلات (۱۳) و (۱۴) حاصل خواهد شد.

$$\frac{\partial f}{\partial x_{p,t}} + \delta\Big(2\psi_2 (g(s_t, x_{p,t}))\frac{\partial g}{\partial x_{p,t}} + \psi_1 \frac{\partial g}{\partial x_{p,t}}\Big) = 0 \tag{۱۳}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_{-p,t}} + \delta\Big(2\psi_2 (g(s_t, x_{-p,t}))\frac{\partial g}{\partial x_{-p,t}} + \psi_1 \frac{\partial g}{\partial x_{-p,t}}\Big) = 0 \tag{۱۴}$$

که $x_{p,t}$ مقدار بهینه تحویل آب به بازیکن p را در دراز مدت (کل طول دوره) نشان می‌دهد. با حل همزمان این دو معادله در چهارچوب یک دستگاه معادلات، مقدار $x_{p,t}$ بهینه بر حسب ضرایب مجهول ψ_0, ψ_1, ψ_2 حاصل خواهد شد. لازم به ذکر است که مقادیر $x_{p,t}$ حاصل شده به صورت یک معادله درجه یک بر حسب متغیر حالت s_t بوده و به عنوان معادله قانون کاربری مخزن معرفی می‌شود. حال با جایگزینی این معادله در سمت راست معادلات (۱۱) و (۱۲) سه معادله ریکاتی تولید خواهد شد. نتیجه حل همزمان این سه معادله، تعیین سه سری عدد برای ضرایب ψ_0, ψ_1, ψ_2 است. از میان این سه سری تنها یک سری جواب منطقی ارائه می‌دهد که برای یافتن آن مجدداً باید تمامی ضرایب محاسبه شده را در قانون کاربری مخزن جایگزین نمود. هر مجموعه‌ای از ضرایب که قانون کاربری منطقی‌ای را ارائه دهد، به عنوان مجموعه جوابهای منطقی انتخاب می‌شود. با تشخیص ضرائب منطقی و جایگذاری پاسخها در روابط (۱۵) و (۱۶) توابع ارزش (تابع هدف بلند مدت) حاصل خواهد شد.

$$v_1(s_t) = \psi_2 s_t^2 + \psi_1 s_t + \psi_0 \tag{۱۵}$$

$$v_2(s_t) = \zeta_2 s_t^2 + \zeta_1 s_t + \zeta_0 \tag{۱۶}$$

روش فوق الذکر برای اولین بار به گونه ای تغییر داده شد تا بتواند در مدیریت آبهای سطحی مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور سد مخزنی زاینده رود انتخاب شد. در ابتدا چهارچوب مدل در حالت یک بازیکن (one player game) ارائه گردید و نتایج آن با نتایج یک مدل پویای تصادفی مخزن مقایسه شد. سپس مدل برای حل یک بازی نامتقارن با دو بازیکن (مصرف کنندگان شرب و کشاورزی) مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه توابع هدف کوتاه مدت (f) استفاده شده در معادلات فوق با توابع مطلوبیت درجه ۲ جایگزین گردید. توابع مطلوبیت بر اساس مطالعات انجام شده توسط (Ganji et al., 2007 a, b) طراحی و ارائه گردید.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- حل مدل بازی تک نفره

شکل ریاضی مدل ارائه شده برای بازی پویای تک نفره مشابه با مدل بلمن مورد استفاده از برنامه ریزی پویای مخزن (DP) می‌باشد. بنابراین مقایسه نتایج کاربری مدل بازی پویای تک نفره و مدل برنامه ریزی پویای گسسته می‌تواند اطلاعات را درباره ی کارایی روش ارائه شده در اختیار قرار دهد. البته باید ذکر کرد که روش حل معادله بازی تک نفره، معادلات ریکاتی می‌باشد که با روش حل ضمنی مدل برنامه ریزی پویای گسسته کاملاً متفاوت است. برای حل مدل بازی پویا متغیر حالت حجم مخزن در نظر گرفته شد. تابع

هدف کوتاه مدت (f) در مدل بازی تک نفره یک تابع مطلوبیت درجه دوم بر اساس مقدار حجم آب داخل مخزن می‌باشد که در رابطه (۱۷) ارائه شده است. توابع مطلوبیت نشان دهنده ی میزان و درجه رضایتمندی بازیکنها از سطح تحویل آب و یا اجرای خواست آنها می‌باشد. مقدار مطلوبیت بسته به سطح رضایت مندی در فاصله صفر و یک متغیر می‌باشد. عدد صفر نشان دهنده ی عدم رضایت بوده و ۱ رضایت کامل را نشان می‌دهد. برای تولید مطلوبیت‌ها از روش ارائه شده در مقاله (Ganji et al. (2007 a استفاده شده است.

$$f(s_t) = -3.2475\, s_t^{\,2} + 3.4046\, s_t + .005512 \qquad (۱۷)$$

در این رابطه s_t متغیر حالت مسئله می‌باشد که بیان کننده حجم ذخیره مخزن در زمان t است. f تابع مطلوبیت یا همان تابع هدف کوتاه مدت می‌باشد که مقادیری بین صفر و یک را اتخاذ می‌کند. همانگونه که قبلاً ذکر شد مقادیر صفر بیان کننده میزان حداقل مطلوبیت و مقادیر یک ارائه دهنده حداکثر مطلوبیت می‌باشد.

مطابق با روش حل ریکاتی مدل بازی تک نفره در بخش (۲-۲-۱) بعد از مشتق گیری از طرف راست معادله (۵) معادله کاربری مخزن بر اساس ضرائب تابع ارزش (تابع هدف بلند مدت)، ψ_0,ψ_1,ψ_2 به صورت رابطه (۱۸) حاصل شد.

(۱۸)

$$x_t(s_t) = \left(\frac{-6062\, s_t + 3177.6 + 700\psi_1 + 1400\psi_2\, s_t + 1632\psi_2}{\psi_2}\right)$$

در این رابطه x_t متغیر تصمیم و بیان کننده میزان رهایی از مخزن در زمان t می‌باشد. در این مرحله با جایگزینی معادله (۱۸) در سمت راست معادله ی بلمن (معادله ۴ مربوط به بخش ۲)، معادلات ریکاتی تشکیل شد. از حل این معادلات در یک دستگاه به صورت همزمان، مقادیر ضرایب مجهول تابع ارزش (تابع هدف بلند مدت)، ψ_0,ψ_1,ψ_2 حاصل گردید. لازم به ذکر است که از سه سری عدد نتیجه شده از حل دستگاه معادلات، فقط یک سری از ضرایب منطقی می‌باشند. روش انتخاب ضرایب منطقی در قسمت ۲-۲-۱ توضیح داده شد. با تشخیص ضرائب منطقی (ψ_0,ψ_1,ψ_2) و جایگذاری پاسخها در معادله (۱۸)، معادله کاربری مخزن به صورت رابطه (۱۹) حاصل شد.

$$x_t(s_t) = 1.76\, s_t + 341.65 \qquad (۱۹)$$

این معادله در نمودار شکل (۱) نشان داده شده است. به عبارت دیگر، این شکل نمودار کاربری مخزن را در حالت وجود یک بازیکن (با تابع مطلوبیت کوتاه مدت بر اساس حجم مخزن) نشان می‌دهد. معادله مزبور نشان می‌دهد که با افزایش حجم آب در مخزن مقدار رهایی آب از مخزن افزایش می‌یابد که کاملاً منطقی است. البته برای یافتن کارایی این مدل نیاز به انجام بهینه سازی مخزن است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. همچنین تابع ارزش بلند مدت حاصل از حل مدل بازی که نتیجه جایگزینی ضرائب حاصل از حل معادلات ریکاتی، در سمت چپ معادله بلمن است، به صورت معادله (۲۰) بیان شد.

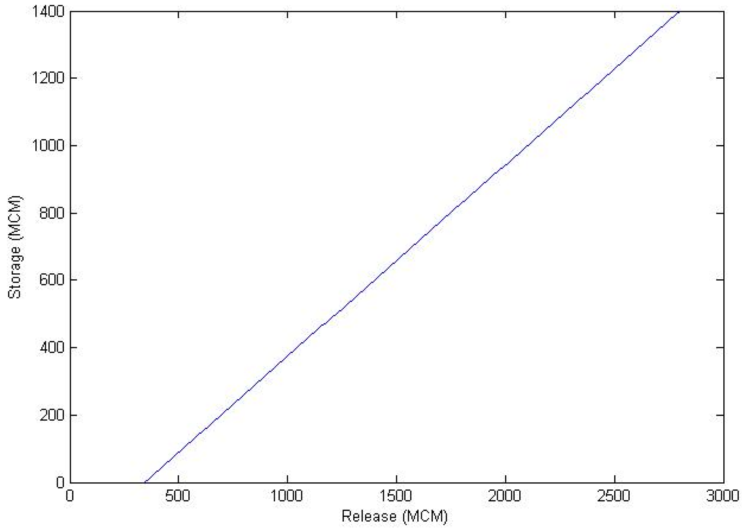
$$U(s_t) = -5.7101\, s_t^{\,2} + 5.9863\, s_t + 2.0224 \qquad (۲۰)$$

همانگونه که قبلاً در بخش سوم ذکر شد، معادله (۲۰) نشان دهنده مطلوبیت بلند مدت مربوط به مدیر مخزن می‌باشد که به تابع ارزش یا تابع هدف بلند مدت معروف است.

به منظور بررسی کارایی معادله کاربری حاصل از حل بازی تک نفره پویا، تغییرات حجم و رهایی از مخزن، با استفاده از داده‌های مصنوعی ۳۰۰ ساله جریان ورودی به مخزن سد زاینده رود، در نرم افزار مطلب شبیه سازی شد. (نمودارهای شکل ۲ و ۳). سپس شاخص‌های قابلیت اعتمادپذیری، بر اساس مقادیر شبیه سازی شده حجم مخزن و رهایی آب از مخزن محاسبه گردید. شاخص‌های اعتمادپذیری مخزن که در این مطالعه بررسی شدند عبارتند از شاخص اعتمادپذیری شمارشی مخزن، شاخص اعتمادپذیری شمارشی تامین آب، شاخص اعتمادپذیری حجمی مخزن و شاخص اعتمادپذیری حجمی تامین آب. (Ganji et al., (2007c نحوه ی محاسبه ی این شاخص‌های اعتمادپذیری را ارائه نموده اند. جدول (۲) مقایسه شاخص اعتمادپذیری حاصل برای بازی تک نفره پویا و ریکاتی تک نفره و دو نفره را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد ساختار معادله بازی تک نفره پویا مشابه با معادله بلمن در برنامه ریزی پویای قطعی گسسته می‌باشد که به صورت ضمنی حل می‌شود. بنابراین مقایسه اعتمادپذیری ضمنی این دو روش می‌تواند معیار خوبی برای نمایش عملکرد روش حل ریکاتی برای بازی پویای قطعی باشد. بنابراین از مدل پویای قطعی به منظور تعیین بهترین روش کاربری مخزن استفاده شد که نتایج مشابهی با مدل ارائه شده را نشان داد (نمودار شکل ۳ و جدول ۲). البته مدل بهینه سازی پویا در بهترین شرایط از نظر تقسیم بندی متغیر حالت عدد اعتماد پذیری شمارشی مخزن را برابر با ۷۶٪ گزارش می‌دهد.

۳-۲- حل مدل بازی نامتقارن دو نفره

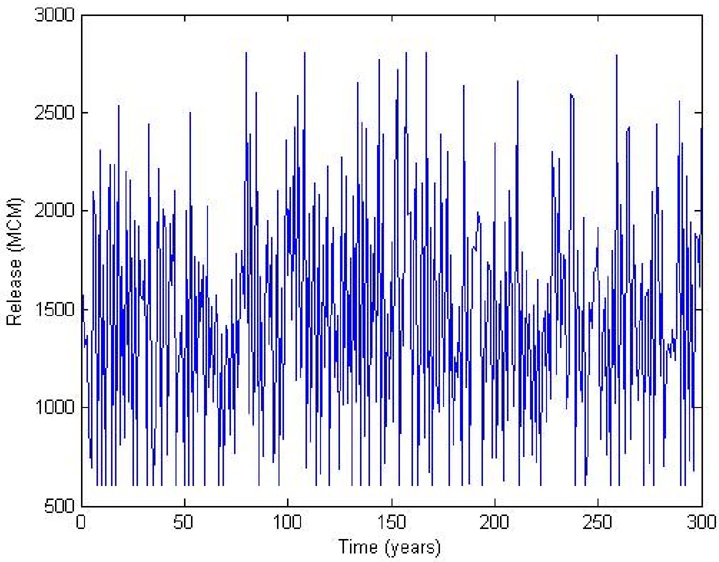
با توجه به چهارچوب حاصل از مدل بازی تک نفره، مدل بازی نامتقارن دو نفره برای سد مخزنی زاینده رود ارائه گردید.



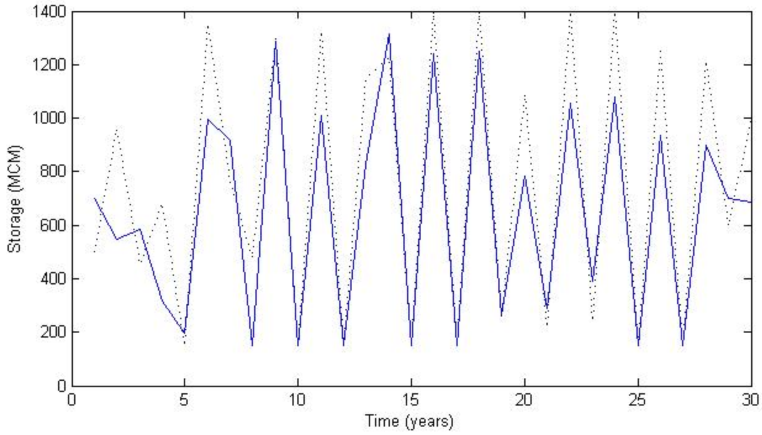
شکل ۱- نمودار کاربری مخزن زاینده رود حاصل از حل بازی تک نفره

جدول ۲- شاخص‌های اعتمادپذیری معادله کاربری مخزن حاصل از کاربرد مدلهای ریکاتی و DP (٪)

مدل	شاخص اعتمادپذیری شمارشی تأمین آب	شاخص اعتمادپذیری حجمی تأمین آب	شاخص اعتمادپذیری شمارشی مخزن	شاخص اعتمادپذیری حجمی مخزن
ریکاتی (یک نفره)	۵۹/۳۳	۸۴/۵۴	۸۴/۳۳	۰/۰۴۶
ریکاتی (دو نفره)	۶۹/۷	۹۴/۶	۷۵/۳	۰/۰۶۴
DP	۵۶/۶۷	۹۹/۷۴	۷۶/۳۳	۰/۰۰۱



شکل ۲- مقدار رهایی آب در مخزن حاصل از شبیه سازی معادله کاربری مخزن زاینده رود برای بازی تک نفره



شکل ۳- تغییرات حجم آب در مخزن در دوره کوتاهی از شبیه سازی ۳۰۰ ساله توسط معادله کاربری حاصل از بازی تک نفره (خط ممتد) و برنامه ریزی پویا (.....)

در مدل بازی ارائه شده، دو طرف بازی مصرف کننده ی بخش کشاورزی و سایر مصرف کننده‌ها می‌باشند. تابع مطلوبیت کوتاه مدت (f) که معادل با تابع ارزش در روش MPE می‌باشد، برای مصرف کننده ی بخش کشاورزی بر اساس مقدار آب رها شده از مخزن و برای سایر مصرف کنندگان در تابع مطلوبیت بر اساس حجم مخزن طراحی می‌شود (Ganji et al., 2007 a, b). این توابع توسط معادلات (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده‌اند.

$$f(s_t) = -3.2475 * s_t^{\,2} + 3.4046 * s_t + .005512 \quad (۲۱)$$

$$f_{agr}(x_t) = -7.1*10^{-7} * x_t + 0.002766 * x_t + 1.70728 \quad (۲۲)$$

که در معادله (۲۲)، x_t مقدار سهم آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی و f_{agr}: سود کوتاه مدت بخش کشاورزی می‌باشد. تابع انتقال حالت در این مسئله نیز معادله بیلان آب مخزن انتخاب شد. با جایگذاری معادلات (۲۱) و (۲۲) در معادلات (۱۱) و (۱۲) معادلات زیر برای دو بازیکن ایجاد می‌گردد.

$$\begin{aligned}&\psi_2 s_t^{\,2} + \psi_1 s_t + \psi_0 \\ &= (-3.24.75\, s_t + 3.4046)\, s_t + 0.0055 + \\ &0.75\psi_0 + 0.75\psi_1 (s_t + 2.2\, x_t - 1.166) \\ &+ 0.75\psi_2 (s_t + 2.25\, x_t - 1.166)^2\end{aligned} \quad (۲۳)$$

$$\begin{aligned}&\zeta_2 s_t^{\,2} + \zeta_1 s_t + \zeta_0 \\ &= (-7.1E10^{-7}\, x_t + 0.002766)\, x_t + \\ &1.70728 + 0.55\psi_0 + 0.55\zeta_1 (s_t + 2.2x_t - 1.166) \\ &+ 0.55\zeta_2 (s_t + 2.25\, x_t - 1.166)^2\end{aligned} \quad (۲۴)$$

که در این رابطه، $\psi_i, i = 0,1,2$ ضرایب معادله ارزش بخش کشاورزی و $\zeta_i, i = 0,1,2$ ضرایب معادله ارزش سایر بخش‌ها می‌باشد. با مشتق گیری از معادلات (۲۳) و (۲۴) نسبت به متغیر تصمیم (در اینجا مقدار آب رها شده از مخزن است) معادلات (۲۵) و (۲۶) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned}&\frac{\partial(\psi_2 s_t^{\,2} + \psi_1 s_t + \psi_0)}{\partial x_t} = \\ &1.6878\psi_1 + 27.8\psi_2 (s_t + 2.25\, x_t - 1 - 166)\end{aligned} \quad (۲۵)$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial(\zeta_2 s_t^{\,2} + \zeta_1 s_t + \zeta_0)}{\partial x_t} = \\ &-7.1E10^{-7}\, x_t + 0.002766 + 1.2375\,\zeta_1 + \\ &2.475\,\zeta_2 (s_t + 2.25 + x_t - 1.166)\end{aligned} \quad (۲۶)$$

پس از حل همزمان معادلات (۲۵) و (۲۶) (در کنار معادله انتقال حالت) نسبت به متغیر تصمیم (رهایی آب از مخزن)، معادله کاربری مخزن به شکل معادله رابطه (۲۷) حاصل گردید.

(۲۷)

$$\begin{aligned}&x(s_{t-1}) = 0.0074\left(\frac{(16500\,\psi_2\,\zeta_2 - 20760\,\psi_2)\,s_{t-1}}{(-95150\,\zeta_2)\,\psi_2}\right) + \\ &0.0074\left(\frac{-10380\,\psi_1 + 29041\,\psi_2 + 4125\,\psi_2\,\zeta_1 + 4125\,\psi_1\,\zeta_2}{(-95150\,\zeta_2)\,\psi_2}\right)\end{aligned}$$

با جایگذاری این معادله در سمت راست معادلات (۲۳) و (۲۴)، معادلات ریکاتی شکل می‌گیرد. از حل همزمان معادلات ریکاتی ۶ مجموعه عدد برای ضرایب $\zeta_i, \psi_i (i = 0,1,2)$ حاصل می‌شود که ضرایب صحیح با توجه به مواردی که در قسمت حل ریکاتی یک نفره ذکر شد، از میان آنها تعیین گردید. در نهایت معادله کاربری مخزن به شکل رابطه (۲۸) حاصل گردید و همچنین در شکل ۴ رسم شد.

$$x_t(s_{t-1}) = 1.25(s_{t-1}) - 3.04 \quad (۲۸)$$

همچنین توابع ارزش بلند مدت مربوط به هر دو کاربر (کشاورزی و سایر کاربران) به صورت معادلات روابط (۲۹) و (۳۰) بدست آمد.

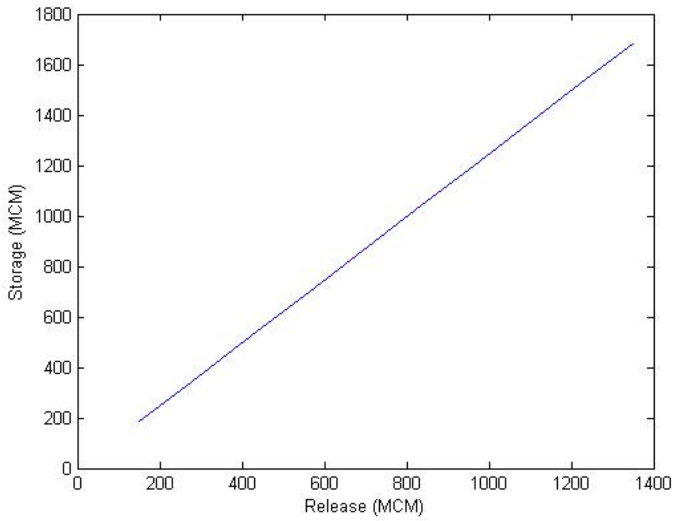
$$U(s_t) = -6.26\, s_t^2 + 5.76\, s_t + 0.76 \quad (۲۹)$$

$$U_{agr}(x_t) = -5.71\, x_t^2 + 5.99\, x_t + 2.02 \quad (۳۰)$$

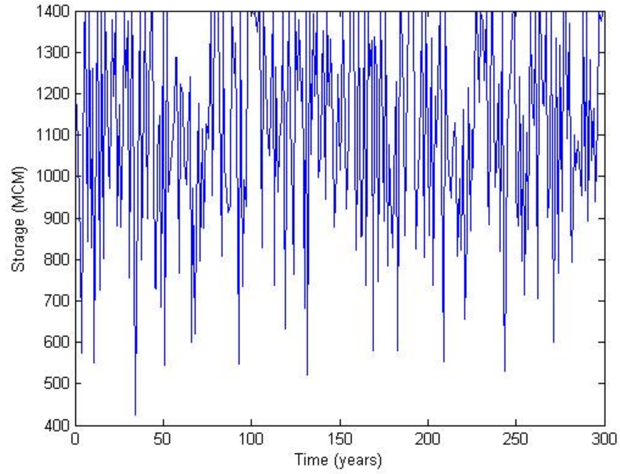
به منظور ارزیابی کارایی معادله ی کاربری (معادله ی ۲۸) در مدیریت مخزن زاینده رود، تغییرات حجم مخزن و مقدار آب رها شده از مخزن با استفاده از این معادله شبیه سازی شد. نتایج تغییرات شبیه سازی شده حجم مخزن و رهایی مخزن حاصل از این شبیه سازی در نمودارهای شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. شکل ۱ نشان می‌دهد که تغییرات حجم مخزن در اثر وارد شدن یک مصرف کننده در معادلات کمتر شده است و حجم مخزن در اکثر موارد بالاتر از ۴۰۰ میلیون متر مکعب بوده است. این مورد با توجه به نقش بیشتری که بخش مصرف کننده در تعیین معادلات کاربری مخزن داشته است کاملاً قابل توجیه است. زیرا با وارد شدن بخش کشاورزی به عنوان یک بازیکن مستقل در بازی، احتیاج به تامین حجم آب بیشتری می‌باشد که این با افزایش حجم نگهداری آب در مخزن امکان پذیر است. البته باید توجه داشت که این تغییرات، عمدتاً ناشی از تغییرات حجم آب ورودی به مخزن است و نیاز آبی در سالهای مختلف ثابت فرض شده است. همچنین به منظور ارزیابی مقادیر شبیه سازی شده، شاخص‌های کارایی مخزن برای رشته‌های شبیه سازی شده محاسبه گردید که در جدول ۲ آورده شده است.

مقایسه ی این اعداد با مدل یک نفره نشان دهنده بهبود شاخص اعتمادپذیری حجمی و شمارشی تأُمین آب می‌باشد. همچنین شکل ۷ تغییرات مقدار مطلوبیت کوتاه مدت هر دو بازیکن در طول شبیه سازی را نشان می‌دهد. تغییرات مطلوبیت‌ها نشان دهنده ی آن است که مطلوبیت بخش کشاورزی و سایر کاربران در حداکثر مقدار خود به ترتیب به عدد ۱/۰ و ۰/۹ خواهد رسید. نمودارهای جعبه ای[۱۰] نیز یکی از روش‌های ارائه چگونگی توزیع احتمالاتی مقادیر مطلوبیت، ذخیره آب و میزان رهایی آب از مخزن می‌باشد. این نمودارها سطوح احتمالاتی ۹۹، ۷۵، ۵۰، ۲۵ و ۱ درصد ارائه می‌دهد. همانگونه که در شکل ۸ قابل مشاهده است، به احتمال ۵۰ ٪ مقدار مطلوبیت بخش کشاورزی ۰/۸۴ و کمتر و مطلوبیت مدیر مخزن ۰/۶۳ و کمتر می‌باشد.

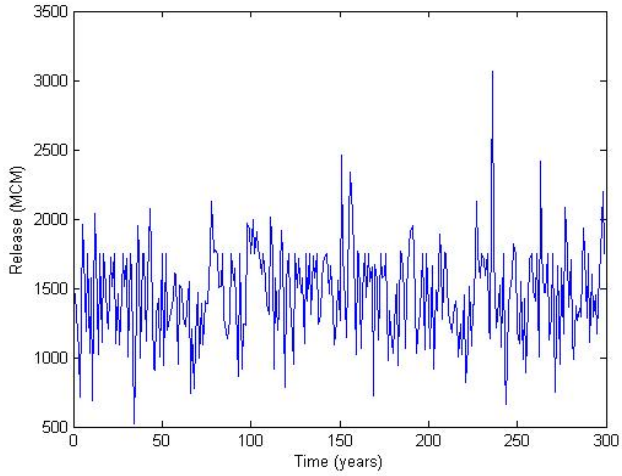
مدل ارائه شده در این قسمت به عنوان اولین مدل بازی پویای پیوسته است که علاوه بر پارامترهای هیدرولوژیکی و فیزیکی، مطلوبیت را در چهاچوب تئوری بازی در تحلیل‌ها وارد نموده است. همچنین این مدل به دلیل ماهیت پیوسته ی فضای حل مسئله (متغیرهای تصمیم و حالت) دارای حل صریح می‌باشد و بنابراین نیاز به حجم بالای محاسبات کامپیوتری ندارد، از طرف دیگر شاخص‌های اعتمادپذیری مدل پیشنهادی نسبت به مدل کلاسیک DP بیشتر است. مجموعه این دلایل می‌تواند نشان دهنده ی قابلیت روش پیشنهادی باشد. البته مدل فوق امکان گسترش برای کاربرددر مسائل پیچیده تر را نیز دارا می‌باشد که از اهداف آتی نویسندگان این مقاله است.



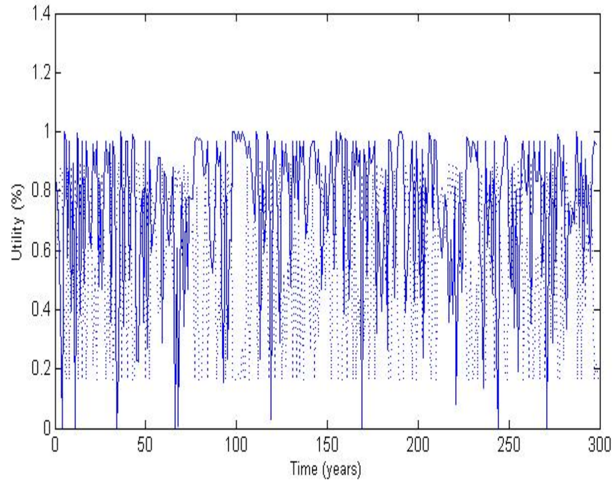
شکل ۴- نمودار کاربری مخزن زاینده رود حاصل از حل بازی دو نفره



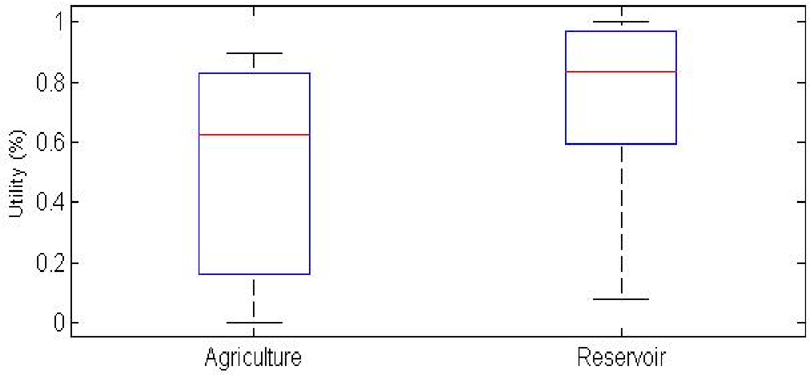
شکل ۵- تغییرات حجم آب در مخزن حاصل از شبیه سازی معادله کاربری مخزن زاینده رود برای بازی دو نفره



شکل ۶- مقدار رهایی آب در مخزن حاصل از شبیه سازی معادله کاربری مخزن زاینده رود برای بازی دو نفر



شکل ۷- تغییرات مطلوبیت بازیکنها (مصرف کنندگان) حاصل از شبیه سازی معادله کاربری مخزن زاینده رود (-) و مدیر مخزن (...) برای بازی دو نفره



شکل ۸- نمودارهای جعبه‌ای مربوط به بخش کشاورزی و مدیر مخزن برای بازی دو نفره

۴- نتیجه گیری

مسائل مطرح شده در قالب بازی دارای پیچیدگیهایی می‌باشد که استفاده از روشهای قدیمی بهینه سازی را برای مدلسازی بازی با اشکال مواجه می‌کنند. به عنوان مثال ابزارهای تحلیلی پیشنهادی برای تخصیص و مدیریت منابع آب باید توانایی ارائه راه حل برای اختلافات را دارا بوده و یا این توانایی را بهبود بخشند. در تکنیکهای برنامه ریزی پویای کلاسیک برای در نظر گرفتن این موضوعات باید تغییرات عمده‌ای در ساختار مدلهای پویای موجود ایجاد شود و یا مدلهای جدیدی ارائه شوند. مدلهای جدید همچنین باید همانند مدلهای پویای موجود توانایی تحلیل عملکرد پویای مخزن را برای یک افق برنامه ریزی بلند مدت داشته باشد. در این تحقیق روش بازی پویای جدیدی که دارای حل صریح می‌باشد، ارائه گردید. مدل جدید علاوه بر آنکه یک مدل پویا به حساب می‌آید دارای حجم محاسباتی پایین و شاخص‌های کارایی بالاتر است. از جمله معایب این روش، شکل تابع ارزش است که باید به صورت چند جمله‌ای درجه دوم بیان شود. ارائه مدلهای جامع تر بر اساس روش ارائه شده در این مقاله از اهداف آتی محققین آن می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

1- Stochastic dynamic programming
2- Goal programming
3- Compromise programming
4- Markov Perfect Equilibrium
5- Value function
6- Discount factor
7- Policy function
8- Linear quadratic
9- Deterministic
10- Box Plot

۵- مراجع

کراچیان، رضا و نجمه مهجوری (۱۳۸۵)، کاربرد یک مدل رفع اختلاف مرحله‌ای در مدیریت کیفی آبخوان تهران، مجموعه مقالات دومین سمینار ساخت و ساز در پایتخت، تهران، ایران.

Batabyal, A. (1996). "Consistency and optimality in dynamic game of pollution control I: competition." *Environmental and Resource Economics*, Vol. 8, pp. 205-220.

Bellman, R. and Dreyfus, S.E. (1962). *Applied Dynamic Programming*. Princeton: Princeton Univ. Press.

Coppla, E.F., Szidarrovszky, M., Poulton, S. and Roman, E. (2001). "Balancing risk with water supply for a public well field.". *Journal Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 126, No.2, pp. 1-36.

De Marchi, B., Funtowicz, S.O., Cascio, S.L. and Munda, G. (2000). "Combining participative and institutional approach evaluation, an empirical study for water issues in Troina Sicily." *Ecological Economy*, Vol. 34, No. 1, pp. 66-77.

Dockner, J.E. and Van Long, N. (1993). "International pollution control: cooperative versus non-cooperative strategies." *Journal of Environmental Economic and Management*, Vol. 24, pp. 13-29.

Fundenberg, D. and Tirole, J. (1994). *Game Theory*. MIT Press.

Ganji A., Karamouz, M. and Khalili, D. (2007b). Development of stochastic conflict resolution models for reservoir operation, II. The value of players' information availability and cooperative behavior." *Advances in Water Resources*. Vol. 30, pp. 157–168.

Ko, S., D.G. Fontane and J.W. Labadie. (1992). “Multi-objective optimization of reservoir system operation. Multiple objective decision making in water resources.” Monograph Series No. 18, *American Water Resources Association*, Bethesda, Maryland, pp. 111-128.

Ligon, E. and Narain, U. (1997). “Computing the equilibria of dynamic common property games.” *Natural Resources Modeling*. Vol. 10, No. 4. pp. 345-369.

Longanda, G.V. and Bhattacharya, D. (1990). “Goal programming techniques for optimal reservoir operation.” *Journal of Water Resources Planning and Management,* ASCE, Vol. 11, No. 6, pp. 820-838.

Martin, E.W., Patrick, R.H. and Tolwinski, B. (1993). “A dynamic game of a transboundary pollutant with asymmetric players.”*Journal of Enviroммental Economics Management*, Vol. 24, pp. 1-12.

Miranda, M.J. and Fackler, P.L. (2002). *Applied Computational Economics and Finance*. MIT press.

Mousavi, S.J., and Ramamurthy, A.S. (2000). “Optimal design of multi-reservoir systems for water supply.” *Advances in Water Resources*, Vol. 23, No. 6, pp. 613-624.

Neelakantam, T.R. and Pundarikanthan, N.V. (2000). “Neural network based simulation operation model for reservoir operation.” *Journal Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 126, No. 2, pp. 57-64.

Negri, D.H. (1989). “The common property aquifer as a differential game.” *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 9-15.

Negri, D.H. (1990). “Strategy of the commons.” *Natural Resources Modeling*, Vol. 4, No. 4, pp. 521-537.

Palmer, R.N., Ryu, J., Jeong, S. and Kim, Y.O. (2002). “An application on water conflict resolution in the Kum river basin, Korea.” Proceedings of ASCE Environmental an Water Resources, Institutions, Virginia, pp. 19-21.

Petit, M. L. (1990). Control theory and dynamic games in economic policy analysis. Cambridge University Press, Combridge.

Selten, R. (1975). "Reexamination of perfectness concept for equilibrium points in extensive game." *International Journal of Game Theory*, Vol. 4, pp. 25-55.

Ganji A., Khalili, D. and Homayoun-Far, M. (2007c). "Impact of Uncertainty on Risk Indices in Reservoir Operation.", *Iran-Water Resources Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 13-26.

Ganji A., Khalili, D. and Karamouz, M. (2007a). “Development of stochastic conflict resolution models for reservoir operation. I. The perfect symmetric stochastic model. ” *Advances in Water Resources.* Vol. 30, pp. 528-542.

Gibbons, R. (1992). *Game theory for applied economists*. Princeton university press. Princeton, NJ.

Goulter, I.C. and Tai, F.K. (1985). "Practical implications in the use of stochastic dynamic programming for reservoir operations.", *Water Resources Bulletin*, Vol. 18, pp. 321-344.

Harboe, R. (1992). “Multi-objective design making techniques for reservoir operation.” Monograph series No. 18, *American Water Resources Association,* Bethesda, Maryland, pp. 103-110.

Haung, W.C., Harboe, R. and Bogardi, J.J. (1991). "Testing stochastic dynamic programming models conditioned on observed or forecasted inflows." *Journal Water Resources Planning and Management*, Vol. 117, No. 1, pp. 28-36.

Huang, W.C., Yuan, L.C. and Lee, C.M. (2002). “Linking genetic algorithms with stochastic dynamic programming to long term operation of a multi-reservoir.” *Water Resources Research,* Vol. 38, No. 12, pp. 401-409.

Johnson, S.A., Stedingar, J.R., Shoemakher, C.A., Li, Y. and Tegada-Guibert, J.A. (1993). “Numerical solution of continuous-state dynamic programs using linear and spline interpolation.” *Journal of Operational Research*, Vol. 41, No. 3, pp. 484-500.

Karamouz, M. and Vasiliadis, H.V. (1992). “Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecast.” *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 1337-1344.

Karamouz, M., Szidarovszky, F. and Zahraie, B. (2003). “Water Resources System Analysis.” Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

Kelman, J., Stedinger, J.R., Cooper, L.A., Hsu, E. and Yung, S.Q. (1990). “Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation.” *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 447-454.

Kerachian, R., Karamouz M. (2007). “A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir–river systems.” *Advances in Water Resources,* Vol. 30, pp. 866–882.

Hydrologic Science, Walingford, U.K., pp. 181-189.

Szidarovszky, F., L. Duckstein and I. Bogardi. (1984). “Multi-objective management of mining under water hazard by game theory.” *European Journal of Operational Research,* Vol. 15, pp.251-258.

Yeh, W.W.G. (1985). “Reservoir management and operations models: a state of the art review.” *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.

Shahidehpour, M., Yamin, H. and Li, Z. (2001). Marcet operations in electric power systems. John Wiley and Sons, NY, pp. 191-232.

Shiau, J.T. and Lee, H.C. (2005). "Derivation of optimal hedging rules for a water-supply reservoir through compromise programming." *Water Resources Management,* Vol. 19, No. 2, pp. 111-132.

Simonovic, S.V. (1991). “Coping with changing objectives managing an existing multipurpose reservoir.” Hydrology of Natural and Manmade Lakes, pub. No. 206, International Association of