Reservoir Operating Rules with Fuzzy Dynamic Programming

Naghibi Bidokhti, A. (Ph.D. Student). and Abrishamchi, A. (Assoc. Professor)
Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Fresh water is a key factor in development, particularly in arid and semi - arid countries shuch as Iran. As new sources of water have become more scarce and more expensive to develop, efficient use of existing water resources facilities is highly important. The development of optimal operating rules for reservoirs, as the main water resource systems has been an active area of research in the last two decades. The main challenges in developing optimal operating rules lie in dealing with the complexity of the systems and the various types of uncertainties. A promising approach to deal with some types of unceratinties is fuzzy logic programming. The objecive of this paper is to develop a fuzzy dynamic programming model for real time operation of reservoirs using in flow forecasts. Mininmum and maximum storage volumes, the end - of - year storage volumes, and loss function are introduced as fuzzy sets and a dynamic programming approach is addressed. At the end of each period (month), the forecasted flows are renewed and the operating policy for the remaining periods is improved. To show the applicability of the approach, the proposed model is applied to a single reservoir in Iran. Operation of the reservoir is simulated using both fuzzy dynamic programming and fixed rules obtained from the conventional deterministic dynamic programming and the results are compared and discussed.

رویکرد فازی در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد

علی نقیبی بیدختی [*] احمد ابریشم‌چی [**]

چکیده

از آنجایی که مهار و تأمین آب به وسیله اجرای طرح‌های جدید توسعهٔ منابع آب مستلزم صرف هزینه‌های بسیار کلان می‌باشد، مدیریت و بهره‌برداری بهنیه از منابع و امکانات موجود بیش از پیش مورد توجه واقع گردیده است. در این مقاله به منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد، روشی مبتنی بر اصول نظریه فازی و به صورت برنامه‌ریزی پویا با استفاده از نتایج یک مدل پیش‌بینی جریان، طراحی شده است. در این روش که برای تعیین سیاست بهره‌برداری بهنگام از مخزن توسعه داده شده است، بازه‌های زمانی به صورت ماهانه تعریف می‌گردد. محدودیت‌های حداقل و حداکثر تراز آب در مخزن در انتهای هر دوره، حداقل و حداکثر آب خروجی از مخزن در هر دوره و نیز هدف به حداقل رسانیدن میزان خسارت، به صورت محدودیت‌های فازی در هر دوره معرفی گردیده است. جهت برآورده ساختن تنظیم برونسالی مخزن، تابع هدف فازی به صورت حداقل حجم مخزن در انتهای سال که از نتایج شبیه‌سازی مخزن بر اساس منحنی فرمان به دست آمده است، تعریف می‌گردد. این عملیات در پایان هر ماه با مشاهده مقادیر واقعی جریان ورودی، بهنگام و سیاست بهره‌برداری برای ماه‌های باقیمانده اصلاح می‌گردد.

مقدمه

برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه از مخزن سدها به لحاظ ساختار و طبیعت آن، به سادگی قابل تبدیل به رشته‌ای از تصمیم‌های مرتبط با یکدیگر و یا یک مسأله سلسله مراتبی با تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای می‌باشد. این مشخصات شرایط مناسبی را برای استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویا در بهره‌برداری بهینه از مخزن فراهم می‌سازد. لذا محققان بسیاری از این رویکرد در بهره‌برداری مخازن استفاده کرده‌اند. لاکس و همکاران[1] (۱۹۸۱) مسائل مختلفی را در برنامه‌ریزی منابع آب با استفاده از روش‌های برنامه‌ریز خطی[2] (LP)، غیر خطی[3] (NLP) و پویا[4] (DP) ارائه داده‌اند. یاکوویتز[5] (۱۹۸۲) به بررسی مدل‌های DP در مسائل مختلف منابع آب پرداخت. کارآموز و هاک[6] (۱۹۸۲) ضوابطی برای عملکرد مخزن با استفاده از رگرسیون نتایج DP قطعی موسوم به DPR به دست آوردند. یه[7] (۱۹۸۵) مدل‌های مختلف ارائه شده تا آن زمان برای عملکرد مخزن از جمله LP، DP، NLP و مدل‌های شبیه‌سازی را در مقاله‌ای مورد بررسی قرار داد. با وجود پیشرفت‌های قابل ملاحظه در این تحقیقات، وی هنوز هم حرکت به سمت استفاده

---

* - دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه صنعتی شریف

** - دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

1- Loucks et al. (1981)
2- Linear Programming
3- Non - Linear Programming
4- Dynamic Programming
5- Yakowitz (1982)
6- Karamouz & Houck (1982)
7- Yeh (1985)

عملی و بهره‌برداری واقعی را بسیار کند دانست و دلایل این مشکل را به شرح زیر اعلام داشت :

۱) معمولاً بهره‌برداران در فرمول‌بندی و توسعه مدل‌های کامپیوتری بهینه‌سازی دخالت داده نمی‌شوند.

۲) اغلب تحقیقات با حالت بسیار ساده شده‌ای از مخزن سر و کار دارند که از حالت واقعی آن بسیار دور است.

۳) برخی محدودیت‌های حسی و عدم دقت در بهره‌برداری واقعی وجود دارد.

سیمونوویچ[1] (۱۹۹۲) در زمینه تحلیل سیستم مخزن به بررسی روش‌های مختلف پرداخت و به شکاف بزرگ بین تحقیقات و واقعیت در بهره‌برداری مخازن اشاره نمود. او برای پر کردن این شکاف و در نظرگرفتن شرایط واقعی و عدم دقت‌ها استفاده از نوعی هوشمندی را پیشنهاد کرده است. بدین منظور می‌توان از مفاهیم نظریه فازی[2] به عنوان یکی از شاخه‌های مهم سیستم‌های هوشمند[3] برای مدل‌سازی انعطاف‌پذیر در شرایط واقعی استفاده نمود.

۲- رویکرد فازی به مسأله بهره‌برداری از مخزن

برای ساخت مدل برنامه‌ریزی پویای فازی برای بهره‌برداری بهینه از مخزن از مفاهیم ارائه شده در پیوست (الف) استفاده می‌شود. ابتدا عناصر اصلی برنامه‌ریزی معرفی می‌شود :

۱) دوره‌های بهره‌برداری به صورت ماهانه در نظرگرفته می‌شود. بنابراین در ابتدای سال با پیش‌بینی جریان‌های ورودی تا انتهای سال، یک برنامه‌ریزی ۱۲ مرحله‌ای انجام می‌گردد (N=۱۲) و در ماه‌های بعدی با بهنگام شدن جریان‌های ورودی مشاهده شده ، برنامه‌ریزی با مراحل کمتر (۱۱، ۱۰، ... و ۱) انجام می‌گیرد.

۲) متغیر تصمیم (u_t)، میزان آب خروجی از سد بر حسب میلیون مترمکعب (mcm) در هر مرحله می‌باشد. برای گسسته‌سازی متغیر تصمیم از فاصله‌های یک واحدی به صورت زیر استفاده می‌شود :

$$u_t \in U = \{ ۰,۱,۲,...u_{max} \} \qquad (۱)$$

۳) متغیر حالت (x_t)، حجم آب مفید در مخزن بر حسب میلیون مترمکعب در ابتدای هر مرحله می‌باشد. برای گسسته‌سازی متغیر حالت از فاصله‌های یک واحدی استفاده می‌شود.

$$x_t \in X = \{ ۰,۱,۲,...x_{max} \} \qquad (۲)$$

۴) تابع انتقال (f_t) برای هر مرحله، معادله پیوستگی در مخزن بوده و به صورت زیر تعریف می‌گردد :

$$x_{t+۱} = x_t + q_t - u_t - e_t \qquad (۳)$$

q_t : میزان جریان ورودی پیش‌بینی شده در مرحله t (mcm)

e_t : میزان تلفات تبخیر در مرحله t (mcm)

همانگونه که در پیوست (الف) ملاحظه می‌گردد در این رویکرد، تابع هدف (G_N) تنها در انتهای آخرین مرحله و محدودیت C_t در سایر مراحل تعریف می‌گردد.

از آنجایی که فضای تصمیم D اشتراک محدودیت‌های C_t و تابع هدف G_N می‌باشد و با تعریف min برای اشتراک مجموعه‌ها که تفاوت معنی‌داری بین محدودیت‌ها و تابع هدف از نظر تأثیرگذاری بر جواب بهینه وجود ندارد، با استفاده از راهکار ارائه شده توسط لونگ[4] [۶] و زیمرمن[5] [۱۶] برای برنامه‌ریزی چند منظوره، تابع هدف با استفاده از حداقل حجم مخزن در انتهای سال و محدودیت‌ها با در نظرگرفتن حداقل و حداکثر حجم مفید مخزن در هر دوره و نیز بهینه‌سازی تابع خسارت، منظور گردیده است.

حداقل حجم مخزن در انتهای سال برای تنظیم برونسالی مخزن با شبیه‌سازی مخزن در هر مرحله بر اساس مقادیر منحنی فرمان[6] (RC) سد ، به دست می‌آید.

تابع خسارت به عنوان معیاری جهت مقایسه جواب‌های مختلف استفاده می‌شود. در این مقاله از تابع خسارت تعریف شده توسط باقری [۱] استفاده شده است. در این تابع فرض شده که در محدوده‌ای که "٪۲۰ ± تقاضا" تأمین می‌شود، خسارت صفر است و در خارج این محدوده شاخه‌های نمایی به صورت زیر خواهد داشت :

1- Simonovic (1992)
2- Fuzzy Concept
3-Intelligent Systems
4- Leung (1988)
5- Zimmermann (1996)
6- Rule Curve

$$Loss_t = ۳/۸۸\times۱۰^{۳}\times[\,۱۰^{(y_t-۰/۵)}-۱\,]\ ,\ y_t > ۰/۵ \quad (۴)$$

$$Loss_t = ۱/۵۸\times۱۰^{۴}\times[\,۱۰^{(۰/۸-y_t)}-۱\,]\ ,\ y_t < ۰/۸ \quad (۵)$$

که در آنها:

$$y_t = \frac{u_t}{D_t}$$

u_t = میزان خروجی از سد در ماه t

D_t = میزان تقاضای آب در ماه t

در این تحقیق، محدودیت‌های حداقل و حداکثر حجم مخزن و تابع هدف به صورت کلاسیک و محدودیت تابع خسارت به صورت فازی معرفی می‌گردند. این روش که در ادامه FDP[1] نامیده می‌شود در واقع نوعی رویکرد فازی برای حل مسأله برنامه‌ریزی پویای کلاسیک به شمار می‌رود، زیرا تنها فازی‌سازی انجام شده در مورد تابع خسارت بوده که در حالت کلاسیک نیز تابع هدف مسأله می‌باشد. تابع عضویت در نظر گرفته شده برای این محدودیت در شکل (۱) آمده است.

۳- مطالعه موردی: سد امیرکبیر

سد امیرکبیر در کیلومتر ۲۳ جاده کرج - چالوس نزدیک روستای واریان و برای تأمین اهداف زیر بر روی رودخانه کرج بنا شده است:

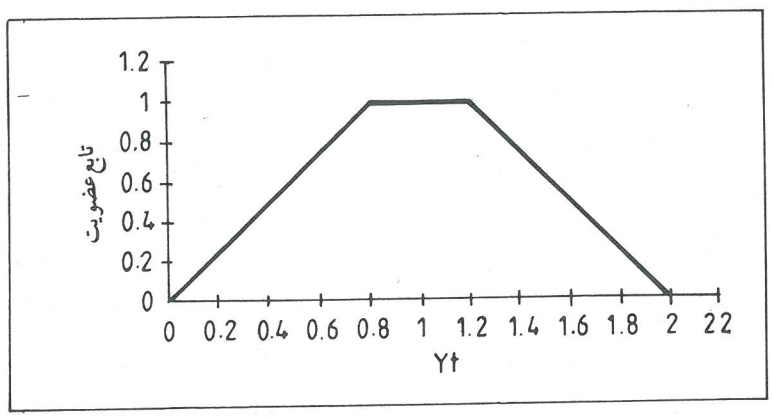
- تأمین آب شرب تهران
- آبیاری اراضی دشتهای کرج و شهریار
- ذخیره سیلاب‌های بهاره
- ایجاد تأسیسات برقابی.

در این مقاله برای مدل‌سازی پیش‌بینی جریان از نتایج مدلی مبتنی بر پیش‌بینی عصبی که در مرجع [۱] آمده است استفاده شده است. همچنین سایر مشخصات مخزن از مرجع [۱] برداشت شده است.

برای انجام عملیات برنامه‌ریزی پویای فازی، یک برنامه کامپیوتری به زبان پاسکال نوشته شده است. این برنامه در ابتدای هر سال، جریان ورودی پیش‌بینی شده در ۱۲ ماه از سال را از فایل مربوط به داده‌های پیش‌بینی دریافت می‌نماید. با استفاده از این داده‌ها و شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن بر اساس منحنی فرمان، محدودیت حجم مخزن در انتهای سال به دست می‌آید. سپس با در نظر گرفتن محدودیت‌ها، تابع هدف و اعمال رابطه برگشتی پیوست (الف)، سیاست بهره‌برداری بهینه تا آخر سال به دست می‌آید. لکن تنها سیاست بهره‌برداری در ماه اول اجرا می‌شود و در پایان این ماه با توجه به جریان مشاهده‌ای ورودی به مخزن، حداقل حجم لازم مخزن در انتهای سال بهنگام می‌گردد. در این مرحله، پیش‌بینی مجدد برای جریان ورودی به مخزن در ماه‌های باقیمانده انجام می‌شود و حداقل حجم مخزن در انتهای سال نیز با شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن با استفاده از منحنی فرمان اصلاح می‌گردد. عملیات برگشتی مربوطه مجدداً انجام شده و سیاست بهره‌برداری برای ماه‌های باقیمانده مشخص می‌گردد. این سیاست برای ماه دوم اجرا شده و عملیات فوق تا آخرین ماه هر سال ادامه می‌یابد. پس از اجرای سیاست بهره‌برداری در هر ماه میزان خسارت محاسبه می‌گردد.

نتایج اجرای مدل کامپیوتری برای سال‌های آبی ۶۹-۱۳۶۸ تا ۷۲-۱۳۷۱ در جدول (۱) آمده است.

1- Fuzzy Dynamic Programming



شکل ۱- تابع عضویت برای محدودیت فازی خسارت

جدول ۱ - نتایج مدل کامپیوتری بهره‌برداری از مخزن سد امیرکبیر برای یک دوره ۴۸ ماهه

دوره	درصد تأمین	خروجی	خسارت	دوره	درصد تأمین	خروجی	خسارت
۱	۹۹	۳۷/۰۲۶	۰	۲۵	۲۷	۱۰/۰۹۸	۳۷۷۳۷/۳۸
۲	۹۹	۳۴/۹۴۷	۰	۲۶	۲۸	۹/۸۸۴	۳۶۵۱۸/۷۲
۳	۹۶	۳۰/۰۴۸	۰	۲۷	۲۶	۸/۱۳۸	۳۸۹۸۴/۴۲
۴	۹۹	۳۲/۸۶۸	۰	۲۸	۳۳	۱۰/۹۵۶	۳۰۸۲۹/۱۱
۵	۹۳	۳۱/۱۵۵	۰	۲۹	۴۵	۱۵/۰۷۵	۱۹۵۷۱/۷۹
۶	۸۶	۲۵/۰۲۶	۰	۳۰	۶۲	۱۸/۰۴۲	۸۱۱۴/۲۶۸
۷	۱۰۰	۲۵/۹	۰	۳۱	۱۰۰	۲۵/۹	۰
۸	۹۹	۴۱/۸۷۷	۰	۳۲	۹۹	۴۱/۸۷۷	۰
۹	۹۹	۴۶/۹۲۶	۰	۳۳	۳۸۶	۱۸۲/۹۶۴	۱۷۶۹۶۲۲
۱۰	۹۹	۳۹/۹۹۶	۰	۳۴	۲۸۲	۱۱۳/۹۲۸	۱۵۷۸۶۵/۳
۱۱	۹۹	۴۷/۹۱۶	۰	۳۵	۱۱۰	۵۳/۲۴	۰
۱۲	۹۹	۴۰/۸۸۷	۰	۳۶	۹۷	۴۰/۰۶۱	۰
۱۳	۲۹	۱۰/۸۴۶	۳۵۳۲۷/۸	۳۷	۹۹	۳۷/۰۲۶	۰
۱۴	۳۴	۱۲/۰۰۲	۲۹۷۶۷/۷	۳۸	۱۳۰	۴۵/۸۹	۱۰۰۴/۶۳۱
۱۵	۴۵	۱۴/۰۸۵	۱۹۵۷۱/۷۹	۳۹	۹۹	۳۰/۹۸۷	۰
۱۶	۳۳	۱۰/۹۵۶	۳۰۸۲۹/۱۱	۴۰	۹۹	۳۲/۸۶۸	۰
۱۷	۳۹	۱۳/۰۶۵	۲۴۸۱۲/۲۵	۴۱	۹۹	۳۳/۱۶۵	۰
۱۸	۵۲	۱۵/۱۳۲	۱۴۳۰۶/۲۸	۴۲	۱۰۰	۲۹/۱	۰
۱۹	۱۰۰	۲۵/۹	۰	۴۳	۱۰۰	۲۵/۹	۰
۲۰	۹۹	۴۱/۸۷۷	۰	۴۴	۱۴۲	۶۰/۰۶۶	۲۵۵۹/۱۹۷
۲۱	۹۹	۴۶/۹۲۶	۰	۴۵	۱۳۱	۶۲/۰۹۴	۱۱۱۸/۴۰۸
۲۲	۷۷	۳۱/۱۰۸	۱۱۳۰/۰۰۵	۴۶	۱۵۱	۶۱/۰۰۴	۴۰۴۱/۹۴۳
۲۳	۷۹	۳۸/۲۳۶	۳۶۸/۰۲۹۳	۴۷	۹۹	۴۷/۹۱۶	۰
۲۴	۹۴	۳۸/۸۲۲	۰	۴۸	۹۷	۴۰/۰۶۱	۰

۴- مقایسه و نتیجه گیری

به منظور تحلیل و ارزیابی کارایی مدل ارائه شده در تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن، باید نتایج این مدل با نتایج کارهای مشابه انجام شده در این زمینه مقایسه و توانایی‌های آن در برابر تحقیقات گذشته بررسی گردد. همچنین جهت بررسی امکان بهبود معیارهای بهره‌برداری در صورت استفاده عملی از این مدل، نتایج بهره‌برداری واقعی در شرایط موجود عملکرد مخزن در ارزیابی فوق دخالت داده شود.

جهت نیل به منظور بالا، در ادامه، نتایج بدست آمده با روش کلاسیک برنامه‌ریزی پویا که در مرجع [۱] مورد استفاده قرار گرفته است و نیز با عملکرد واقعی مخزن در شرایط موجود که مقادیر آن نیز از مرجع [۱] استخراج گردیده است، مورد مقایسه و بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- معیارهای ارزیابی

نتایج حاصل از روش FDP و همچنین نتایج روش کلاسیک DP و عملکرد واقعی مخزن برای دوره بهره‌برداری ۴۸ ماهه در جدول (۲) خلاصه شده است. جهت مقایسه روش‌های مختلف از معیارهای زیر استفاده می‌شود:

۱) میزان خسارت در هر دوره و برای هر روش :

با در نظرگرفتن مقادیر مجموع خسارت در طول دوره بهره‌برداری به عنوان اولین معیار مقایسه، ملاحظه می‌شود که روش FDP نسبت به نتایج DP و عملکرد واقعی به ترتیب ۷/۴٪ و ۱/۷٪ بهبود نشان می‌دهد.

۲) تعداد دوره‌هایی که بهره‌برداری با شکست مواجه شده

جدول شماره ۲ - خلاصه نتایج برای روش‌های مختلف بهره‌برداری از مخزن سد امیرکبیر

	عملکرد واقعی	DP	FDP
حداکثر تجاوز (٪)	۳۹۰	۳۹۰	۳۸۶
حداقل تأمین (٪)	۲۳	۸/۳	۲۶
تعداد ماههای کمبود	۲۲	۱۴	۱۴
تعداد ماههای تجاوز	۶	۵	۶
کل کمبود (میلیون مترمکعب)	۲۷۴/۵	۲۵۴/۴	۲۷۰/۸
کل اضافه (میلیون مترمکعب)	۳۴۰/۴	۲۵۸/۱	۲۷۲/۷
خسارت	۲۳۰۳۸۷۶	۲۴۴۵۰۷۰	۲۲۶۴۰۸۰
متوسط کمبود (٪)	۱۶/۳	۱۶/۴	۱۶/۲
متوسط تجاوز (٪)	۱۶/۴	۱۲/۶	۱۳/۴

است:

در این مقاله، ماه‌هایی مواجه با شکست می‌باشند که میزان تأمین تقاضا در آنها کمتر از ۸۰٪ و یا بیشتر از ۱۲۰٪ باشد. شکل (۳) عدم تأمین ۸۰٪ تقاضا و یا تجاوز از ۱۲۰٪ تقاضا را برای روش‌های مختلف در طول دوره بهره‌برداری به نمایش می‌گذارد. خلاصه نتایج مربوط به ماه‌های شکست به تفکیک عدم تأمین و تجاوز برای روش‌های مختلف در جدول (۲) آمده است.

با ملاحظه نتایج مندرج در جدول (۲) مشاهده می‌شود که در حالت عملکرد واقعی، تعداد ماه‌های شکست در تأمین ۸۰٪ تقاضا نسبت به روش‌های دیگر افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد و سایر روش‌ها از نظر این معیار به یکدیگر نزدیک هستند.

۳) شرایط حدی در تأمین تقاضا:

اگر چه قابلیت استفاده و مقایسه این معیار به اندازه سایر معیارها نمی‌باشد، لکن در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد. با بررسی شرایط حدی در جدول (۲) ملاحظه می‌شود که روش‌های DP، عملکرد واقعی و FDP از نظر حداکثر تجاوز از ۱۲۰٪ تقاضا در شرایط تقریباً مساوی هستند. از نظر حداقل تأمین تقاضا نیز روش‌های عملکرد واقعی و FDP در شرایط تقریباً مساوی می‌باشند و روش DP از این نظر نسبت به سایر روش‌ها حدود ۶۵٪ ضعف نشان می‌دهد.

۴) درصد متوسط کمبود و اعتمادپذیری:

نتایج این محاسبات برای روش‌های مختلف در جدول (۲) آمده است. با مقایسه نتایج، ملاحظه می‌شود که درصد کمبود روش‌های مختلف از نظر این معیار تفاوت چندانی ندارند.

۵) آخرین معیار مورد استفاده در این قسمت، درصد تجاوز است که نتایج آن در جدول (۲) آمده است.

با توجه به این معیار، عملکرد واقعی مخزن نسبت به روش‌های دیگر ضعیف‌تر عمل می‌کند و سایر روش‌ها نتایج نزدیکی به یکدیگر نشان می‌دهند.

با توجه به جدول (۲) ملاحظه می‌شود که روش FDP نسبت به DP و عملکرد واقعی در معیارهای ۱، ۳ و ۴ بهبود نسبی دارد. در معیار ۵، این روش نسبت به DP، به میزان ۶/۷٪ ضعیف‌تر ظاهر شده که تفاوت قابل ملاحظه‌ای نمی‌باشد. تنها در معیار ۲ و در ماه‌های تجاوز از ۱۲۰٪ تقاضا، به میزان ۲۰٪ ضعف نشان می‌دهد که با توجه به تعداد کم دفعات وقوع این پدیده (۵ بار) نمی‌تواند به طور مستدل قابل مقایسه باشد. بنابراین روش FDP در معیارهای مختلف با DP و عملکرد مخزن در یک سطح بوده و به طور کلی بهبود نسبی دارد.

اعلام نظر قطعی در مورد نتیجه گیری فوق منوط به در نظر گرفتن موارد زیر خواهد بود:

۱) در مدل برنامه‌ریزی پویای فازی، جهت سهولت و تسریع در عملیات کامپیوتری، تابع عضویت خطی تعریف شده

است. لکن شکل بهینه توابع عضویت و وزن هر یک در حالت‌های ترکیبی با استفاده از دانش خبره در زمینه مورد بحث و ورود به نظریه امکان میسر است و مقادیر درجه عضویت می‌توانند خود، به صورت مجموعه‌های فازی باشند. بنابراین بحث حصول تابع عضویت نزدیک به واقعیت، مستلزم انجام تحقیق گسترده‌تر و خارج از حیطه این مقاله در ورود به نظریه فازی می‌باشد.

۲) دوره بهره‌برداری مورد استفاده در این مقاله که به متقضای مدل پیش‌بینی، ۴۸ ماهه بوده است، برای اعلام نظر قطعی و مقایسه صحیح معیارهای معرفی شده کافی نیست. همچنین فرضیات به کار رفته در مورد سیاست کاهش حداقل حجم مخزن و نوع تابع خسارت، باید با در نظر گرفتن دانش خبره و بهره‌بردار تدقیق گردند.

۳) در مدل مورد استفاده تنها فازی سازی انجام شده در مورد تابع خسارت بوده که در حالت کلاسیک نیز تابع هدف مسأله می‌باشد و محدودیت‌های حداقل و حداکثر حجم مخزن و تابع هدف به صورت کلاسیک تعریف شده است. این مسأله نیز مدل را از حالت واقعی دور می‌کند.

پیوست (الف)

پلمن و زاده[1] [به نقل از ۱] برای نخستین بار رویکرد فازی در برنامه‌ریزی پویا را مطرح نمودند. مدل ارائه شده توسط آنها یک برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای با تابع هدف و محدودیت‌های فازی می‌باشد که تابع انتقالی فرم غیر فازی دارد [۶]. اگر به فرض در هر مرحله t، متغیر تصمیم u_t به دلیل عدم دقت‌ها متأثر از محدودیت فازی به صورت C_t با تابع عضویت به صورت زیر باشد:

$$\mu_{C_t} : U \longrightarrow [0, 1]$$

$$u_t \longrightarrow \mu_{C_t}(u_t) \quad , t = 0, 1, 2, ..., N-1 \qquad (۶)$$

بنابراین متغیرهای تصمیم در کل مسأله تحت تأثیر رشته‌ای از محدودیت‌های فازی به صورت $(\mu_{C_0}, \mu_{C_1}, ... \mu_{C_{N-1}})$ هستند. تابع هدف فازی G_N نیز به صورت مجموعه‌ای با تابع عضویت زیر در مرحله پایانی مسأله معرفی می‌گردد.

$$\mu_{G_N} : X \longrightarrow [0, 1] \qquad (۷)$$

$$x_N \longrightarrow \mu_{G_N}(x_N) \qquad (۸)$$

با داشتن مقدار اولیه متغیر حالت x_0، مسأله به یافتن رشته بهینه‌ای از متغیرهای تصمیم $(u^*_0, u^*_1, ..., u^*_{N-1})$ برای حداکثر کردن تابع هدف فازی و محدودیت‌های فازی تبدیل گردد. فضای تصمیم D به صورت $D = C_0 \cap C_1 \cap ... \cap C_{N-1} \cap G_N$ با تابع عضویت زیر خواهد بود.

$$\mu_D(u_0, u_1, ..., u_{N-1}) = \min \{\mu_{C_0}(u_0), \mu_{C_1}(u_1), ..., \mu_{C_{N-1}}(u_{N-1}), \mu_{G_N}(x_N)\} \qquad (۹)$$

بنابراین هدف یافتن رشته بهینه $(u^*_0, u^*_1, ..., u^*_{N-1})$ است که به گونه‌ای که:

$$\mu_D(u^*_0, u^*_1, ..., u^*_{N-1}) = \max_{u_0, u_1, ..., u_{N-1}} \min \{\mu_{C_0}(u_0), ..., \mu_{C_{N-1}}, \mu_{G_N}(x_N)\} \qquad (۱۰)$$

از آنجاکه می‌توان نوشت، $x_N = f(x_{N-1}, u_{N-1})$ و نیز عملگرهای max و min از دو طرف شرکت‌پذیر هستند، می‌توان رابطه (۱۰) را به صورت زیر نوشت:

$$\mu_0(u^*_0, u^*_1, ..., u^*_{N-1}) \qquad (۱۱)$$

$$= \max_{u_0, u_1, ..., u_{N-2}} \min \{\mu_{C_0}(u_0), \mu_{C_1}(u_1), ..., \mu_{C_{N-2}}(u_{N-2}),$$

$$\max_{u_{N-1}} \min \{\mu_{C_{N-1}}(u_{N-1}), \mu_{G_N}(f(x_{N-1}, u_{N-1}))\}\} \qquad (۱۲)$$

بنابر استدلال مشابه می‌توان رابطه (۱۲) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\mu_0(u^*_0, u^*_1, ..., u^*_{N-1})$$

$$= \max_{u_0, u_1, ..., u_{N-3}} \min \{\mu_{C_0}(u_0), \mu_{C_1}(\mu_1), ..., \mu_{C_{N-3}}(u_{N-3}),$$

$$\max_{u_{N-2}} \min \{\mu_{C_{N-2}}(u_{N-2}),$$

$$\max_{u_{N-1}} \min_1 \{\mu_{C_{N-}}(u_{N-1}), \mu_{G_N}(f(x_{N-1}, u_{N-1}))\}\} \qquad (۱۳)$$

در صورتی که تعریف زیر در نظر گرفته شود:

$$\mu_{G_{N-1}}(x_{N-1}) = \qquad (۱۴)$$

$$\max_{u_{N-1}} \min \{\mu_{C_{N-1}}(u_{N-1}), \mu_{G_N}(f(x_{N-1}, u_{N-1}))\}$$

آنگاه رابطه (۱۳) به صورت زیر قابل بازنویسی خواهد

1- Pellman & Zadeh

$$\mu_D(u^*_0, u^*_1, \ldots, u^*_{N-1}) = \max_{u_0, u_1, \ldots, u_{N-3}} \min \{\mu_{C_0}(u_0), \mu_{C_1}(u_1), \ldots, \mu_{C_{N-3}}(u_{N-3}), \max_{u_{N-2}} \min \{\mu_{C_{N-2}}(u_{N-2}), \mu_{G_{N-1}}(x_{N-1})\}\} \quad (15)$$

رابطه برگشتی (۱۴) را می‌توان تعمیم داد. یعنی:

$$\mu_{G_{N-w}}(x_{N-w}) = \max_{u_{N-w}} \min \{\mu_{C_{N-w}}(u_{N-w}), \mu_{G_{N-w+1}}(x_{N-w+1})\} \quad (16)$$

و

$$x_{N-w+1} = f(x_{N-w}, u_{N-w}), \quad w = 1, 2, \ldots, N \quad (17)$$

بنابراین رشته بهینه متغیرهای تصمیم $(u^*_0, u^*_1, \ldots, u^*_{N-1})$ با حداکثر کردن مقادیر u_{N-w} در رابطه (۱۷) به دست خواهد آمد.

اگر $\sigma_{N-w}: X \rightarrow U$ تابع سیاست تصمیم‌گیری باشد به گونه‌ای که:

$$u^*_{N-w} = \sigma_{N-w}(x_{N-w}), \quad w = 1, 2, \ldots, N \quad (18)$$

آنگاه u^*_{N-w} به میزان متغیر حالت در هر مرحله یعنی x_{N-w} بستگی خواهد داشت. بنابراین با انجام عملیات برگشتی می‌توان به رشته جواب بهینه دست یافت [۶].

منابع و مراجع

۱- باقری، ع. ۱۳۷۷. "بهره‌برداری بهنگام از سدها مبتنی بر پیش‌بینی عصبی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

۲- کاسکو، ب. ۱۳۷۷. "تفکر فازی" (ترجمه غفاری، ع. و همکاران) چاپ اول، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

۳- وانگ، لی. ۱۳۷۸. "سیستم‌های فازی و کنترل فازی". (ترجمه: غفاری، ع.)، نشر کتاب دانشگاهی.

4- Karamouz, M. and Houck, H. (1982), " *Annual and Monthly Reservoir Operating Rules* ", Water Resour. Res., 918 (5) : 1337-1344.

5- Lai, Y. and Hwang, C. (1992), " *Fuzzy Mathematical Programming* ", Springer Inc.

6- Leung, Y. (1988), " *Spatial Analysis and Planning Under Uncertainty* ", Elsevier Science Pub.

7- Loucks, D. P., Stedinger, J.R. and Haith, D.A. (1981), " *Water Resources Systems Planning and Analysis* ", Prentice Hall Inc.

8- Philbick, C.R. and Kitanidis, P. K. (1999), " *Limitations of Deterministic Optimization Applied to Reservoir Operation* ", J. Water Resour. Plg. and Mgmt., ASCE, 125(3).

9- Russell, S. O. (1996). " *Reservoir Operation Rules with Fuzzy Programming* ", J. Water Resour. Plg. and Mgmt., ASCE, 122 (3) : 165- 170.

10- Shrestha, B.P. (1996), " *Fuzzy Rule - Based Modeling of Reservoir Operation* ", J. Water Resour. Plg. and Mgmt., ASCE, 122 (4) : 262-269.

11- Simonovic, S.P. (1992), " *Reservoir Systems Analysis : Closing Gap Between Theory and Practice* ", J. Water Resour. Plg. and Mgmt., ASCE, 118(3) : 262-280.

12- Wurbs, R.A. (1993), " *Reservoir - System Simulation and Optimization Models* ", J. Water Resour. Plg. and Mgmt., ASCE, 119 (4) : 455-472.

13- Yakowitz, S. (1982), " *Dynamic Programming Applications in Water Resources* ", Water Resour. Res., 18(4): 673-696.

14- Yeh, W. (1985), " *Reservoir Management and Optimization Models : a State - of the - Art Review* ", Water Resour. Res., 21(12) : 1797-1818.

15- Yin, Y.Y. (1999), " *Fuzzy Relation Analysis for Multicriteria Water Resources Management* ", J. Water Resour. Plg. and Mgmt., ASCE, 125(1): 41-47.

16- Zimmermann, H.J. (1996), " *Fuzzy Set Theory and its Applications* ", 3rd Ed., Kluwer Academic Publishers.