



Developing Operation Policies Using Stochastic Dual Dynamic Programming with Markov Uncertainty Modelling

F. Sadeghi¹, H. Poorsepahy-samian², B. Zahraie^{3*}
and S. Jamali⁴

Abstract

In the last decades, various methods have been proposed for stochastic operation optimization of reservoirs out of which one is the Stochastic Dual Dynamic Programming (SDDP). Reviewing the literature shows that in most previous studies the inflow uncertainties have been mostly modeled by autoregressive AR(1) or seasonal autoregressive PAR(2) models when using SDDP. Another approach toward inflow uncertainty modeling by SDDP uses Markov Chain which has received less attention. Furthermore, applicability of SDDP in developing long-term operation policies has not been tested before. In this study, MSDDP model has been developed which uses Markov chain concept. Also, after presenting an algorithm for using SDDP and MSDDP for formulating long-term operation policies, their performances have been compared in Karoun multi-reservoir hydropower system. The results have shown absolute superiority of MSDDP in formulating long-term operation policies. Furthermore, operation policies obtained from SDDP have shown highest compatibility with the best possible operation policy when there is no uncertainty (deterministic conditions).

Keywords: Optimization, Operation, Multi-Reservoir Systems, Hydropower, SDDP, Markov Chain, Karoun Multi-Reservoir System.

Received: April 4, 2017

Accepted: December 30, 2017

تدوین سیاست بهره‌برداری توسط مدل پویای دوگان غیرقطعی با مدل‌سازی عدم قطعیت مارکوفی

فرناز صادقی^۱، حامد پورسپاهی سامیان^۲، بنفشه زهرایی^{۳*}
و سعید جمالی^۴

چکیده

ماهیت غیرقطعی مسأله بهره‌برداری از مخزن، کاربرد روش‌های بهینه‌سازی غیرقطعی در حل این مسأله را ایجاب می‌کند. در دهه‌های گذشته، روش‌های متعددی جهت حل مسأله بهینه‌سازی غیرقطعی بهره‌برداری از مخزن پیشنهاد شده است که یکی از آنها روش برنامه‌ریزی پویای دوگان غیرقطعی (SDDP)^۱ است. بررسی پیشینه تحقیقات نشان می‌دهد که در اغلب آنها، عدم قطعیت جریان ورودی به مخازن در روش SDDP براساس یک مدل آماری خودهمبسته (AR)^۲ یا خودهمبسته فصلی (PAR)^۳ مدل‌سازی شده است. رویکرد دیگر برای مدل‌سازی عدم قطعیت در SDDP که کمتر به آن پرداخته شده است، مدل‌سازی عدم قطعیت جریان به صورت یک زنجیره مارکوف است که در این تحقیق تحت عنوان مدل MSDDP پیاده‌سازی شده است. همچنین علیرغم اینکه محققان متعددی از روش SDDP در زمینه حل مسأله بهره‌برداری میان‌مدت یا بلندمدت سیستم‌های چندمخزن استفاده کرده‌اند، با این حال قابلیت این روش در زمینه تدوین سیاست‌های پایدار بلندمدت در مخازن سدها بررسی نشده است. در این تحقیق پس از ارائه الگوریتمی برای کاربرد مدل‌های SDDP و MSDDP به منظور تدوین سیاست‌های پایدار بهره‌برداری بلندمدت از سیستم‌های چندمخزن، عملکرد این دو مدل در این زمینه مقایسه شده است. به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد بررسی، نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چندمخزنه‌ی برق‌آبی در گام زمانی هفتگی در حوضه رودخانه‌ی کارون بررسی شده است. براساس نتایج به دست آمده، مدل MSDDP عملکرد به مراتب بهتری در ارائه سیاست بهره‌برداری بهینه از سیستم داشته است. مقدار سود حاصله از شبیه‌سازی سیستم براساس سیاست‌های بلندمدت به دست آمده در روش MSDDP حدود ۳۵ درصد نسبت به SDDP بیشتر است. همچنین، مقایسه نتایج مدل‌ها با بهترین جواب‌های ممکن (در شرایط قطعیت کامل) نشان داد جواب‌های حاصل از سیاست بهره‌برداری مستخرج از مدل MSDDP نزدیک به بهترین جواب‌های ممکن بوده است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، بهره‌برداری، سیستم‌های چندمخزنه، برق‌آبی، SDDP، زنجیره‌ی مارکوف، سیستم چندمخزنه‌ی کارون.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۱۰/۹

1- M.Sc. Graduated, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

2- Ph.D. Candidate in Water Resources Management, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

3- Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran. Email: bzahraie@ut.ac.ir

4- Assistant Professor, Department of Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

۲- دانش‌آموخته دکتری، دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

Philpott and De Matos (2012) با تشریح این رویکرد به بیان مزایای استفاده از زنجیره‌های مارکوفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت در روش SDDP پرداخته‌اند. مزیت اصلی مدل‌سازی جریان به روش زنجیره مارکوف، در نحوه تقریب تابع هدف در این روش است. به گونه‌ای که در این روش برای هر گسسته‌سازی جریان یک دسته تقریب مجزا محاسبه شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. حال اینکه در صورت مدل‌سازی به صورت خودهمبسته، تقریب‌ها با استفاده از اشتراک‌گذاری برش‌ها، برای کل توزیع احتمال جریان محاسبه می‌شوند. محاسبه تقریب‌های تابع هدف برای هر گسسته‌سازی جریان، باعث افزایش دقت تقریب اما از سوی دیگر باعث افزایش بار محاسباتی می‌شود. دقت مدل‌سازی جریان می‌تواند اثر جدی بر عملکرد روش SDDP داشته باشد. (2016) Poorsepahy-Samian et al. با ارائه روشی جهت مدل‌سازی جریان با تبدیل باکس-کاکس، نشان دادند استفاده از تبدیل‌های خطی جهت نزدیک کردن توزیع جریان به توزیع نرمال، باعث بهبود قابل توجه عملکرد روش SDDP می‌شود.

Karamouz et al. (2003) بهره‌برداری بهینه از مخازن برق‌آبی را به چهار قسمت بلندمدت، میان مدت، کوتاه مدت و زمان واقعی تقسیم کرد. مدل‌های بهره‌برداری بلندمدت (با گام زمانی ماهانه یا هفتگی و با افق زمانی بیش از پنج سال) اطلاعات راهبردی نظیر ارزش بلندمدت آب و محدودیت‌های بلندمدت برای حجم مخازن را مشخص می‌کنند. سپس با استفاده از این اطلاعات، مدل‌های میان مدت با گام‌های زمانی یک هفته تا یک ماه و با افق زمانی دو تا پنج سال اجرا می‌شوند. این مدل‌ها نیز قیود لازم برای مدل‌های کوتاه مدت را مشخص می‌کنند. مدل‌های کوتاه مدت با گام زمانی یک ساعت تا یک روز و با افق زمانی یک روز تا یک هفته اطلاعات جزئی‌تر بهره‌برداری را مشخص می‌کنند.

مرور تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که علی‌رغم اینکه محققان متعددی همچون Tilmant and Kelman (2007) از روش SDDP در زمینه حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری میان مدت یا بلندمدت از سیستم‌های چندمخزنه استفاده کرده‌اند، با این حال قابلیت این روش در زمینه تدوین سیاست‌های پایدار بلندمدت در مخازن سدها بررسی نشده است. یکی از روش‌هایی که در زمینه تدوین سیاست‌های بهره‌برداری بلندمدت کاربرد زیادی داشته، روش SDP بوده است. اما در مورد سیستم‌های با تعداد مخازن زیاد، نفرین ابعادی مانع از به کارگیری روش SDP جهت تدوین سیاست‌های بلندمدت می‌شود. اگرچه SDDP توانسته مشکل نفرین ابعادی مربوط به SDP را از میان بردارد، اما چنانچه پیش‌تر گفته شد، کاربردهای SDDP در زمینه

مسأله‌ی بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن یکی از اساسی‌ترین مسائل در زمینه بهره‌برداری و مدیریت منابع آب است. تاکنون روش‌های بهینه‌سازی متعددی جهت حل این مسأله پیشنهاد شده‌اند. برنامه‌ریزی پویای غیرقطعی (SDP)^۴ یکی از پرکاربردترین روش‌ها در زمینه بهره‌برداری غیرقطعی از سیستم‌های منابع آب بوده است. مشکل اصلی و شناخته شده در روش SDP این است که با افزایش تعداد متغیرهای حالت در این روش، میزان تلاش محاسباتی لازم جهت حل مسأله به صورت توانی افزایش می‌یابد. این مشکل که از آن به عنوان "نفرین ابعادی"^۵ یاد می‌شود سبب می‌شود کاربرد این روش به سیستم‌های سه تا چهار مخزنه محدود شود (Bellman, 1957). یکی از روش‌های ارائه شده در زمینه حل مشکل نفرین ابعادی SDP، روش برنامه‌ریزی پویای دوگان غیرقطعی (SDDP) است که توسط Pereira and Pinto (1991) ارائه شده است. SDDP جزء روش‌های برنامه‌ریزی پویای تقریبی محسوب می‌شود که به تدریج طرفداران آن در حال افزایش است. در سال‌های اخیر نیز Goor et al. (2010) در حوضه رودخانه نیل^۶ و Tilmant et al. (2010) در حوضه زامبزی^۷ از این روش جهت بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه‌ی برق‌آبی استفاده نموده‌اند. در روش SDDP با کاربرد اصل دوگانگی برنامه‌ریزی خطی و تقریب تابع سود مورد انتظار با استفاده از تقریب‌های خطی، مشکل نفرین ابعادی که در روش برنامه‌ریزی پویای غیرقطعی (SDP) وجود داشت از میان برداشته شود. چرا که در این روش به جای محاسبه مقدار تابع سود مورد انتظار در محل تمام گسسته‌سازی‌ها، تقریبی خطی از تابع امید ریاضی به ازای مقادیر آزمایشی متغیرهای حالت محاسبه شده و سپس تعداد این تقریب‌ها در قالب یک فرآیند تکراری افزایش می‌یابد تا دقت تقریب به حد مطلوب برسد. در نتیجه تلاش محاسباتی مورد نیاز برای حل مسأله به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

بررسی پیشینه تحقیقاتی نشان می‌دهد روش رایج برای مدل‌سازی عدم قطعیت جریان ورودی به سیستم در روش SDDP، کالیبره کردن یک مدل آماری خودهمبسته (AR) یا خودهمبسته فصلی^۸ (PAR) براساس جریان تاریخی ورودی به سیستم و سپس استفاده از سناریوهای تولید شده براساس این مدل آماری و استفاده از پارامترهای مدل آماری تدوین شده در فرآیند الگوریتم SDDP است. رویکرد دیگر برای مدل‌سازی عدم قطعیت در روش SDDP، مدل‌سازی عدم قطعیت جریان به صورت یک زنجیره مارکوف است. در تحقیقات پیشین، این رویکرد در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

$$F_t^* = \text{Max} (f_t + F_{t+1}^*) \quad (1)$$

که در اینجا F_t^* نشان‌دهنده امید ریاضی تابع هدف از ابتدای مرحله t تا انتهای افق زمانی و f_t نشان‌دهنده مقدار تابع هدف در مرحله t است.

در روش SDP، تعیین مقدار F_t^* براساس تعدادی گسسته‌سازی انجام می‌شود. به گونه‌ای که با گسسته‌سازی متغیرهای حالت، مقدار F_t^* به ازای هر ترکیب از گسسته‌سازی‌های متغیر حالت در مرحله t محاسبه می‌شود. به این ترتیب، در صورت بالا رفتن تعداد متغیرهای حالت و یا تعداد گسسته‌سازی‌ها، زمان مورد نیاز برای محاسبه این مقادیر به صورت نمایی بالا می‌رود که این مشکل نفرین ابعادی نامیده می‌شود.

هدف اصلی در روش‌های تقریبی همچون MSDDP که در این تحقیق توسعه داده شده است این است که به جای محاسبه تابع هدف در تعداد زیادی از گسسته‌سازی‌های متعدد، یک تقریب خطی از امید ریاضی تابع هدف به ازای یک سری مقادیر آزمایشی متغیرهای حالت تعیین شود. با توجه به اینکه ایده اصلی این روش، برگرفته از روش تجزیه بندرز است، هر کدام از این تقریب‌های خطی یک برش بندرز نامیده می‌شوند. با بالا رفتن تعداد برش‌های بندرز ایجاد شده در هر مرحله t ، دقت تقریب افزایش می‌یابد. هر برش به طور کلی به شکل زیر است:

$$F_{t+1}^* - \phi_{t+1}^T s_{t+1} \leq \delta_{t+1} \quad (2)$$

در معادله فوق s_{t+1} ماتریس احجام ذخیره آب موجود در مخازن در ابتدای دوره $t+1$ است و ϕ_{t+1} و δ_{t+1} ماتریس‌های مربوط به پارامترهای تقریب هستند. ϕ_{t+1} نشان‌دهنده میزان شیب F_{t+1}^* نسبت به s_{t+1} است و δ_{t+1} نیز عرض از مبدأ معادله خطی است. مقدار این متغیرها براساس ضرایب دوگان مسئله تک مرحله‌ای در مرحله $t+1$ به دست می‌آید. برای مطالعه بیشتر در مورد نحوه محاسبه پارامترهای تقریب‌های خطی در الگوریتم‌های بهینه‌سازی SDDP به Tilmant and Kelman (2007) و برای مطالعه در مورد نحوه محاسبه پارامترها در روش MSDDP به Philpott and De Matos (2012) و Sadeghi (2016) مراجعه کنید.

در روش MSDDP، متغیر غیرقطعی مسئله به تعداد N گسسته‌سازی دسته‌بندی می‌شود و در هر مرحله به ازای هر کدام از این گسسته‌سازی‌ها یک بهینه‌سازی تک‌مرحله‌ای حل می‌شود. سپس پارامترهای برش بندرز به ازای هر گسسته‌سازی مربوط به مرحله

بهره‌برداری مخزن، متمرکز بر بهره‌برداری میان‌مدت بوده‌اند. برخی از محققین نظیر Helseth و Gjelsvik et al. (2010) and Braaten (2015) مسائل بهره‌برداری از سیستم‌های برق‌آبی را در افق بلندمدت حل کرده‌اند. اما تاکنون تدوین سیاست پایدار بهره‌برداری با در نظر گرفتن افق بلندمدت با استفاده از روش SDDP انجام نشده است. بلکه در حل مسئله بلندمدت، جواب بهینه‌سازی برای کل افق برنامه‌ریزی بلند مدت تعیین شده ولی سیاست بهره‌برداری ارائه نشده است. مقصود از سیاست پایدار بهره‌برداری، سیاستی خاص برای هر دوره زمانی (برای مثال هر دوره ماهانه یا هفتگی در هر سال) است که بتوان از آن جهت اتخاذ تصمیمات بهره‌برداری مربوط به آن دوره زمانی (یک ماه خاص سال یا یک هفته مشخص از سال) در تمام سال‌های بهره‌برداری استفاده کرد.

در این راستا، در ادامه این مقاله، ضمن تشریح MSDDP، با الهام گرفتن از فرآیند تعیین سیاست‌های پایدار در SDP، الگوریتمی برای کاربرد روش‌های SDDP و MSDDP به منظور تدوین سیاست‌های بهره‌برداری بلندمدت از سیستم‌های پنج مخزنه‌ی برق‌آبی در حوضه‌ی رودخانه‌ی کارون، در گام زمانی هفتگی و با هدف حداکثرسازی سود سیستم نیز ارائه شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

در ادامه این مقاله در بخش ۲، روش‌های مورد استفاده تشریح شده‌اند. در ابتدا، در بخش ۲-۱، نحوه تقریب امید ریاضی تابع هدف در روش MSDDP مطرح شده و سپس در بخش ۲-۲، فرمول‌بندی مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنه ارائه شده است. در بخش ۲-۳، الگوریتم روش بهینه‌سازی MSDDP براساس دو فاز بهینه‌سازی پسر و شبیه‌سازی پیشرو تشریح شده است. سپس در بخش ۲-۴ الگوریتم پیشنهادی برای تدوین سیاست‌های پایدار بهره‌برداری در سیستم‌های چندمخزنه ارائه شده است. منطقه مورد مطالعه در این مقاله در بخش ۳ معرفی شده و سپس در بخش ۴ نتایج حاصل از کاربرد روش پیشنهادی در این منطقه ارائه و به بحث گذاشته شده است. نهایتاً در بخش ۵ جمع‌بندی و پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه شده است.

۲- روش انجام کار

۲-۱- نحوه تقریب امید ریاضی تابع هدف در روش MSDDP

در روش SDDP و MSDDP، بهینه‌سازی به صورت مرحله‌ای انجام می‌شود که در آن تابع هدف در هر مرحله t به طور کلی به شکل زیر است:

همچنین سود حاصل از برقایی براساس روش ارائه شده توسط Poorsepahy-Samian et al. (2014) محاسبه شده است. در این روش تابع سود حاصل از فروش برقایی در هر گام زمانی با در نظر گرفتن تغییرات ساعتی قیمت فروش برق در بازار برق و براساس روش ارائه شده توسط Madani and Lund (2009) تعیین می‌شود. سپس این تابع با استفاده از تعدادی تقریب خطی تقریب زده شده و در مدل بهره‌برداری در نظر گرفته می‌شود.

محدودیت‌های موجود در حل زیر مسأله‌ی بهره‌برداری از مخازن شامل: معادله‌ی پیوستگی میان مخازن در تمامی دوره‌ها، محدودیت‌های فیزیکی مخازن سدها و نیروگاه‌های برق‌آبی (حجم ذخیره مخازن، ظرفیت توربین، ظرفیت کانال انتقال و غیره)، محدودیت‌های موجود در ظرفیت مخازن مجازی، تأمین نیاز زیست‌محیطی، محدودیت بر روی میزان آب خروجی جهت مصارف کشاورزی و تأمین نیاز برق‌آبی است.

با توجه به موارد فوق‌الذکر در روش MSDDP برای هر گسسته‌سازی \tilde{i} در مرحله t ، یک مسأله بهینه‌سازی به فرم زیر حل می‌شود:

$$F_{t,\tilde{i}}^*(s_t, q_{t,\tilde{i}}, y_{t-1}) = \text{Max} \{ f_{t,\tilde{i}} + F_{t+1,\tilde{i}}^* \} \quad (5)$$

$$f_t = \text{HP}_t + \text{IR}_t + \text{PE}_t + \text{PH}_t \quad (6)$$

Subject to :

$$s_{t+1} = s_t + q_{t,\tilde{i}} + C^R (r_t + I_t) - \quad (7)$$

$$e_t(s_t) - C^I(W_t) \quad (8)$$

$$y_{t+1} = y_t + W_{at} \quad (9)$$

$$\underline{s}_{t+1} \leq s_{t+1} \leq \bar{s}_{t+1} \quad (10)$$

$$\underline{r}_t \leq r_t \leq \bar{r}_t \quad (11)$$

$$\underline{y}_t \leq y_t \leq \bar{y}_t \quad (12)$$

$$\underline{W}_t \leq W_t \leq \bar{W}_t \quad (13)$$

$$\text{IR}_{t,d} = \begin{cases} P_{p,d} \times y_{t,d} \times Y_{p,d} & t = \text{tf} \\ 0 & t \neq \text{tf} \end{cases} \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J G_{t,j} \geq h \text{dem}_t \quad (15)$$

$$r_t + I_t \geq W_t \quad (16)$$

$$AW_{j,t} \geq \text{env}_t \quad (17)$$

$$\begin{cases} \text{HP}_t(j) - \tau_t^A(j) \hat{G}_t(j) \leq \omega_t^A(j) \\ \vdots \\ \text{HP}_t(j) - \tau_t^B(j) \hat{G}_t(j) \leq \omega_t^B(j) \end{cases} \quad (18)$$

$t+1$ محاسبه می‌شود. حال به ازای هر گسسته‌سازی مرحله t ، می‌توان مقدار تجمعی پارامترهای برش بندرز را براساس رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\phi_{t+1,\tilde{i}} = \sum_{n=1}^N P_{i,n}^t \phi_{t+1}^n; \quad \delta_{t+1,\tilde{i}} = \sum_{n=1}^N P_{i,n}^t \delta_{t+1}^n \quad (3)$$

که در آن، ϕ_{t+1}^n و δ_{t+1}^n مقدار پارامترهای تقریب به ازای گسسته‌سازی n ام در مرحله $t+1$ هستند و $\phi_{t+1,\tilde{i}}$ و $\delta_{t+1,\tilde{i}}$ مقدار پارامترهای تجمیع شده برش بندرز براساس گسسته‌سازی \tilde{i} مربوط به مرحله t و $P_{i,n}^t$ احتمال انتقال از گسسته‌سازی \tilde{i} ام در زمان t به گسسته‌سازی n ام در زمان $t+1$ است. بر این اساس، در صورتی که در مرحله t در گسسته‌سازی \tilde{i} ام باشیم، مقدار امیدریاضی تابع هدف از مرحله $t+1$ تا انتهای دوره براساس رابطه زیر تقریب زده می‌شود:

$$\begin{cases} F_{t+1,\tilde{i}}^* - \phi_{t+1,\tilde{i}}^I s_{t+1} \leq \delta_{t+1,\tilde{i}}^I \\ \vdots \\ F_{t+1,\tilde{i}}^* - \phi_{t+1,\tilde{i}}^L s_{t+1} \leq \delta_{t+1,\tilde{i}}^L \end{cases} \quad (4)$$

که در این رابطه L نشان دهنده تعداد برش بندرز محاسبه شده در مرحله $t+1$ است.

۲-۲- فرمول‌بندی ریاضی مسأله بهره‌برداری بهینه از سیستم چندمخزنه

در مدل تدوین شده در این تحقیق تابع هدف به صورت حداکثر کردن مجموع سود حاصل از میزان آب تخصیص داده شده به بخش کشاورزی و برق‌آبی در نظر گرفته شده است. محاسبه سود کشاورزی، با پیروی از روش ارائه شده توسط Tilmant et al. (2008)، از تعدادی مخزن مجازی استفاده شده است. این مخازن میزان آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی، در دوره‌ی آبیاری گیاه را به صورت تجمعی ذخیره می‌کنند. در دوره‌ی برداشت محصول با توجه به میزان آب تجمعی ذخیره شده در مخزن، سود حاصل از بخش کشاورزی محاسبه می‌شود.

تابع تولید برق‌آبی، تابعی غیر محدب و غیرخطی است. از همین رو، در این مقاله با پیروی از ایده ارائه شده توسط Goor et al. (2010)، به منظور لحاظ کردن تابع تولید غیر محدب و غیرخطی برق‌آبی از تقریب پوسته مانند تابع تولید برق‌آبی استفاده شده است. ایده‌ی اصلی در این روش این است که با استفاده از صفحات خطی، تقریب دقیقی از تابع تولید حقیقی برق‌آبی (که در آن تأثیر تغییرات متوسط بلندای آب بر روی توربین مخزن بر میزان تولید در نظر گرفته شده باشد) به دست آید.

نیروگاه مخزن زام در طول دوره t ، $hdem_t$ نیاز شبکه برق به تولید برق آبی در دوره t ، مقدار آب در دسترس در پایین دست مخزن z در گام زمانی t ، env_t ماتریس نیاز زیست محیطی در رودخانه پایین دست مخازن در دوره t ، $\tau_t^B(j)$ و $\omega_t^B(j)$ پارامترهای مربوط به خط B ام در مخزن زام جهت تقریب سود در گام زمانی t ، ϕ_{t+1}^1 ماتریس ضرایب مربوط به حجم مخازن در برش 1 ام مربوط به زمان $t+1$ ، η_{t+1}^1 ماتریس ضرایب مربوط به متغیر حالت در مخازن مجازی در برش 1 ام مربوط به زمان $t+1$ ، مقدار ثابت برش 1 ام مربوط به زمان $t+1$ ، \hat{G}_t تولید تقریبی برق آبی در دوره t و δ^H ، ω^H ، ψ^H بردارهای مربوط به پارامترهای صفحه H جهت تقریب تابع تولید برق آبی است. معادلات (۷)، (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) به ترتیب مربوط به پیوستگی مخازن، تأمین نیاز شبکه برق به تولید برق آبی، حداکثر میزان برداشت کشاورزی و تأمین حداقل نیاز زیست محیطی در رودخانه پایین دست می‌باشند. همچنین معادلات (۱۷) محدودیت‌های مربوط به تولید برق آبی است که توسط Goor et al. (2010) پیشنهاد شده‌اند و معادلات (۱۸) محدودیت‌های مربوط به برش‌های مورد نیاز جهت تقریب تابع امید ریاضی سود هستند. توجه کنید که این معادلات پیرو روش مورد استفاده توسط Tilman et al. (2008) با در نظر گرفتن مخازن مجازی مربوط به کشاورزی نوشته شده‌اند. معادلات (۱۹) نیز محدودیت‌های مربوط به سود تولید برق آبی است که توسط Poorsepahy-Samian et al. (2014) ارائه شده است.

۲-۳- تشریح الگوریتم بهینه‌سازی MSDDP

الگوریتم حل مسأله در روش MSDDP و SDDP براساس تکرار دو فرآیند بهینه‌سازی پسرو و شبیه‌سازی پیشرو است. این دو فرآیند به صورت متوالی تا جایی تکرار می‌شوند که همگرایی برقرار شود. در این بخش به صورت خلاصه به تشریح دو فرآیند بهینه‌سازی پسرو و شبیه‌سازی پیشرو می‌پردازیم. برای مطالعه بیشتر در مورد جزئیات انجام این دو فرآیند به مقالات (Pereira and Pinto (1985) و Tilmant and Kelman (2007) مراجعه کنید.

۲-۳-۱- بهینه‌سازی پسرو

در بهینه‌سازی پسرو در MSDDP، در طی یک فرآیند بازگشتی (از انتهای افق زمانی به عقب)، مقادیر آزمایشی برای متغیرهای حالت، در انتهای مرحله قبل (s_t, y_{t-1}) ، هر مرحله در نظر گرفته می‌شوند. سپس مسأله بهینه‌سازی تک مرحله‌ای برای هر گام زمانی t و به ازای هر گسسته‌سازی $n = 1, \dots, N$ ، حل می‌شود. به منظور افزایش

$$\begin{cases} F_{t+1, \tilde{i}}^* - \phi_{t+1, \tilde{i}}^1 s_{t+1} - \eta_{t+1, \tilde{i}}^1 y_{t+1} \leq \delta_{t+1, \tilde{i}}^1 \\ \vdots \\ F_{t+1, \tilde{i}}^* - \phi_{t+1, \tilde{i}}^L s_{t+1} - \eta_{t+1, \tilde{i}}^L y_{t+1} \leq \delta_{t+1, \tilde{i}}^L \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \hat{G}_t - \psi^1 \times (s_{t+1}/2) - \omega^1 \times \\ r_t \leq \delta^1 + \psi^1 \times (s_t/2) \\ \vdots \\ \hat{G}_t - \psi^H \times (s_{t+1}/2) - \omega^H \times \\ r_t \leq \delta^H + \psi^H \times (s_t/2) \end{cases} \quad (19)$$

که در معادلات بالا F_{t+1}^* تابع سود مورد انتظار پس از انتهای مرحله t که با استفاده از احتمال انتقال‌های وارد شدن به هر گسسته‌سازی به عنوان یک مجموعه برش خطی به دست آمده است. $f_t(\cdot)$ سود حاصل از بهره‌برداری سیستم در مرحله t ، \tilde{i} دسته‌ای از گسسته‌سازی که جریان q_t ، در آن دسته قرار دارد، \tilde{i} دسته‌ای از گسسته‌سازی که ممکن است q_{t+1} در آن قرار داشته باشد، s_t حجم ذخیره مخزن در ابتدای گام زمانی t ، r_t دبی خروجی از توربین در طول گام زمانی t ، y_t ماتریس متغیر حالت تخصیص کشاورزی در ابتدای گام زمانی t ، $q_{t, \tilde{i}}$ متغیر غیرقطعی سیستم (جریان) در گسسته‌سازی \tilde{i} ام در مرحله t ، W_t ماتریس میزان برداشت آب نیاز کشاورزی در گام زمانی t ، W_{at} ماتریس میزان تخصیص به نیاز کشاورزی در گام زمانی t ، HP_t سود حاصل از تأمین نیاز برق آبی در گام زمانی t ، IR_t سود حاصل از تأمین نیاز کشاورزی در گام زمانی t ، PE_t جریمه تخطی از تأمین نیاز زیست محیطی در گام زمانی t ، PH_t جریمه تخطی از تأمین نیاز برق آبی در گام زمانی t ، $IR_{t, d}$ سود حاصل از تخصیص آب در انتهای دوره رشد محصول در محل نیاز d ، C^R ماتریس بیانگر ارتباط میان مخازن سیستم، l_t ماتریس میزان سرریز از مخازن در دوره t ، e_t ماتریس میزان تبخیر از مخازن در دوره t ، C^1 ماتریس تعیین‌کننده ارتباط مابین تخصیص‌های کشاورزی و مخازن و نیز درصد آب بازگشتی، $Y_{p, d}$ پتانسیل تولید محصول (تن) در محل نیاز d ، tf_d دوره متناظر با برداشت محصول در محل نیاز d ، $P_{p, d}$ قیمت محصول P به ازای هر واحد آب دریافتی در محل نیاز d ، $y_{t, d}$ متغیر حالت سود کشاورزی در انتهای دوره رشد در محل نیاز d ، \bar{s}_{t+1} و \bar{s}_{t+1} به ترتیب حداکثر و حداقل حجم مجاز مخازن در گام زمانی $t+1$ و r_t به ترتیب حداکثر دبی عبوری از توربین‌ها و حداقل آزادسازی از مخازن در گام زمانی t ، \bar{y}_t و \underline{y}_t به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل متغیر حالت مربوط به مخازن مجازی در گام زمانی t ، \bar{W}_t و \underline{W}_t به ترتیب حداکثر و حداقل برداشت آب کشاورزی در گام زمانی t ، $G_{t, z}$ میزان تولید در

۲-۴- تعیین سیاست‌های پایدار بلندمدت

به طور کلی هدف در SDP تعیین سیاست بهره‌برداری پایدار است که بتوان براساس متغیرهای حالت ابتدای هر دوره و وضعیت متغیر غیرقطعی در آن دوره، تصمیم بهره‌برداری را براساس آن سیاست تعیین کرد. تعیین گام زمانی برای تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از جمله اقدامات ضروری برای شروع حل مسأله است. این گام زمانی می‌تواند ماهانه یا هفتگی و یا غیره باشد. به عنوان مثال، Vedula and Mujumdar (1992) گام زمانی ۱۰ روزه را برای مدل SDP خود انتخاب کرده‌اند. در اغلب تحقیقات قبلی، تدوین سیاست‌های پایدار برای یک دوره یک‌ساله مد نظر بوده است. بنابراین مثلاً اگر بازه هفتگی انتخاب شده باشد، تعداد گام زمانی در هر دوره برابر با ۵۲ هفته خواهد بود. معمولاً معادله بازگشتی با شروع از گام زمانی آخر برای تمام گام‌های زمانی دوره‌ی یک‌ساله‌ی اول حل می‌شود. در حل مسأله دوره‌ی اول فرض می‌شود سود انتهای دوره برابر با صفر است. سپس دوره‌ی یک ساله‌ی دوم حل می‌شود؛ تابع سود انتهای دوره برای دوره‌ی یک ساله‌ی دوم براساس تابع سود مربوط به گام زمانی اول در دوره یک‌ساله‌ی اول تعیین می‌شود. پس از حل دوره‌ی یک‌ساله‌ی دوم، معیار همگرایی کنترل می‌شود. در صورتی که معیار همگرایی برقرار بود، حل مسأله متوقف می‌شود و در غیر این صورت دوره‌ی یک‌ساله‌ی سوم حل می‌شود و در حل آن سود انتهای دوره برابر با سود گام زمانی اول مربوط به دوره‌ی یک‌ساله‌ی دوم فرض می‌شود. نحوه‌ی قرارگیری دوره‌های یک‌ساله به صورت متوالی در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این مقاله رویکرد مشابهی برای تدوین سیاست‌های بهره‌برداری بلندمدت براساس روش SDDP و MSDDP استفاده شده است. بنابراین آنچه که گفته شد، می‌توان الگوریتم تدوین سیاست بهره‌برداری بلندمدت با استفاده از روش SDDP (یا MSDDP) را به صورت زیر نشان داد:

در فلوجارت ارائه شده در شکل ۲، c نشان دهنده شماره‌ی دوره‌ی یک‌ساله و F_{T+1}^* امید ریاضی سود پس از پایان دوره یک‌ساله است که در حل دوره‌ی یک‌ساله‌ی اول برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین $F_{T+1}^*(c+1) = F_1^*(c)$ به این معناست که برش‌های انتهای افق زمانی در دوره یک‌ساله $c+1$ ام برابر با برش‌های به دست آمده برای گام زمانی اول دوره یک‌ساله c ام هستند. معیار همگرایی مدل بلندمدت در این مقاله براساس یکسان شدن سیاست‌های بهره‌برداری بهره‌ی همه گام‌های زمانی در نظر گرفته شده است.

تعداد برش‌ها و بالا رفتن دقت، در هر بار اجرای بهینه‌سازی پسر، هر یک از این مسائل بهینه‌سازی تک مرحله‌ای را به ازای L جواب آزمایشی مختلف حل می‌کنیم. در نتیجه به ازای هر گسسته‌سازی $n = 1, \dots, N$ در هر گام زمانی t, L برش به دست می‌آید.

۲-۳-۲- شبیه‌سازی پیشرو

در شبیه‌سازی پیشرو، M سناریوی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سناریوها استفاده از یک مدل آماری تولید می‌شوند که براساس آماری تاریخی دبی ورودی مخازن کالیبره شده است. با توجه به برش‌های تولید شده در فرآیند بهینه‌سازی پسر، بهینه‌سازی‌های تک مرحله‌ای با شروع از گام زمانی اول و حرکت به سمت انتهای دوره به ازای هر کدام از سناریوها حل می‌شوند. در این فرآیند، به ازای دبی هر گام زمانی ابتدا مشخص می‌شود که این دبی متعلق به کدام دسته از گسسته‌سازی‌های دبی مربوط به آن گام زمانی است و سپس براساس مقادیر احتمال انتقال مربوط به آن گسسته‌سازی، بهینه‌سازی تک مرحله‌ای حل می‌شود. مقادیر حجم ذخیره به ازای تمام این سناریوها و در تمام گام‌های زمانی ذخیره می‌شود تا در تکرار بعدی به عنوان جواب آزمایشی در بهینه‌سازی پسر در تکرار بعدی مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از جواب‌های تولید شده در شبیه‌سازی پیشرو به عنوان جواب آزمایشی بهینه‌سازی پسر باعث می‌شود که برش‌های تولید شده در مرحله بعد در نزدیکی جواب بهینه باشند و به این ترتیب دقت تقریب در اطراف جواب بهینه افزایش می‌یابد (Espanmanesh et al., 2013).

۲-۳-۳- همگرایی

همانطور که پیشتر گفته شد، در هر تکرار از حل مسأله بهینه‌سازی در روش MSDDP، برش‌هایی به منظور تقریب تابع هدف تولید می‌شوند. هرچه تعداد تکرارهای حل مسأله بیشتر شود، برش‌های بیشتری برای تقریب تابع هدف تولید می‌شوند و در نتیجه دقت تقریب نیز بالاتر می‌رود. آنچه که باعث تغییر جواب‌های بهینه از یک تکرار به تکرار بعد می‌شود نیز برش‌های جدیدی است که به مسأله افزوده می‌شوند. اگر همگرایی مسأله را از نظر همگرا شدن جواب‌های بهینه بررسی کنیم، می‌توان گفت همگرایی مسأله زمانی برقرار می‌شود که برش‌های تولید شده در تکرار جدید باعث ایجاد تغییر قابل توجهی در مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مسأله نشوند. بنابراین اگر اختلاف بین سیاست‌های به دست آمده براساس برش‌های تولید شده در تکرار کنونی با سیاست‌های به دست آمده بدون لحاظ کردن برش‌های تولید شده در تکرار کنونی از مقدار آستانه دقت مورد انتظار کمتر باشد، مسأله همگرا شده است و فرآیند تکرار روش MSDDP متوقف می‌شود.

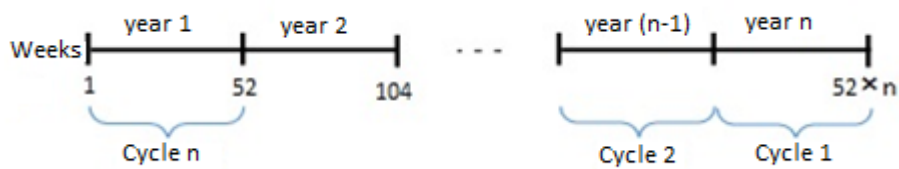


Fig. 1- The consecutive arrangement of the one-year cycles
 شکل ۱- نحوه قرارگیری دوره‌های یک‌ساله به صورت متوالی

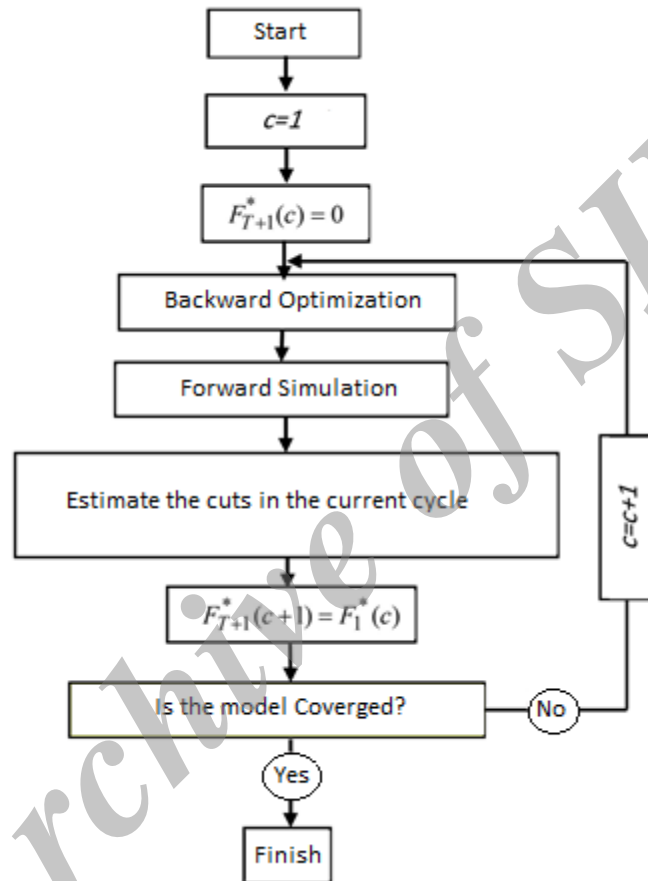


Fig. 2- The proposed algorithm for deriving multireservoir steady state operation policies using SDDP
 شکل ۲- الگوریتم پیشنهادی جهت تدوین سیاست‌های پایدار بهره‌برداری سیستم چندمخزنه با استفاده از روش SDDP

بر همین اساس، در حل مسأله مربوط به دوره‌ی یک‌ساله نیز معیار همگرایی متفاوتی نسبت به آنچه در تحقیقات پیشین مورد استفاده قرار گرفته، استفاده شده است. در تحقیقات پیشین معمولاً همگرایی الگوریتم SDDP براساس اختلاف بین تقریب امید ریاضی گام زمانی اول و میزان واقعی امیدریاضی مشاهده شده در گام زمانی اول بررسی شده است (Shapiro, 2011). اما با توجه به اینکه در مدل بلندمدت یکسان شدن جواب‌های بهینه بهره‌برداری مد نظر است، در مدل

چرا که تجربه مؤلفین در زمینه استفاده از روش‌های SDDP و MSDDP نشان داده است که اگرچه مقدار متوسط تابع هدف مربوط به چندین سناریوی مختلف به یک مقدار ثابت در حالت همگرایی می‌رسد، اما تصمیمات بهینه مراحل مختلف با افزوده شدن برش‌های جدید تغییر می‌کنند و در مواردی ممکن است این تغییرات چشمگیر باشند. به این ترتیب با در نظر گرفتن یکسان شدن جواب‌های بهینه بهره‌برداری، معیار همگرایی سخت‌گیرانه‌تری لحاظ شده است.

یکساله نیز معیار مشابهی مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه تشریح می‌شود.

$$\text{perc}_n, \text{perc}_{n-1}, \text{perc}_{n-2}, \text{perc}_{n-3}, \text{perc}_{n-4} < 0.05 \quad (21)$$

معیار همگرایی فوق‌الذکر برای همگرا شدن حل مسأله در هر دوره‌ی یکساله در نظر گرفته شده است. در مورد همگرا شدن فرآیند کلی تدوین سیاست‌های بلندمدت نیز معیار دیگری به کار گرفته شده است. به این ترتیب که میزان اختلاف جواب بهینه به دست آمده برای گام‌های زمانی $t = 1, \dots, 52$ در دوره‌ی یکساله‌ی کنونی با دوره‌ی یکساله‌ی قبلی مقایسه شده است و درصد اختلاف بین آنها محاسبه شده است. در صورتی که میزان این تغییر کمتر از ۵ درصد باشد، شرط همگرایی برآورده شده است و فرآیند حل قطع می‌شود.

۳- منطقه مورد مطالعه

سیستم چندمخزنی برق‌آبی در حوضه‌ی کارون، اصلی‌ترین سیستم تولید برق‌آبی در ایران است که به خصوص در ساعات اوج سهم بسزایی در تولید برق کشور دارد. حوضه‌ی آبریز کارون در استانهای خوزستان، لرستان، چهارمحال بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد جریان دارد و مساحت آن تا مصب رودخانه در خلیج فارس در حدود ۶۷۰۰۰ کیلومتر مربع است. این حوضه از سمت شمال به حوضه آبریز رودخانه‌های قره‌چای، ساوه، گلپایگان و زاینده رود، از مغرب به حوضه رودخانه کرخه و از مشرق به حوضه رودخانه‌های زهره، مارون و جراحی محدود می‌شود. ۶۹ درصد حوضه را کوهستان و ۳۲ درصد را دشت و کوهپایه تشکیل می‌دهد. براساس بیان ۴۰ ساله هیدروکلیماتولوژی در دشت و ارتفاعات حوضه‌ی کارون، میزان بارش، رواناب، تبخیر و تعرق و نفوذ در این حوضه به ترتیب ۴۲۲۷۹، ۱۸۶۰۴، ۱۹۴۳۰ و ۴۲۴۵۰ میلیون متر مکعب است (Behan Sad, 2013). در این منطقه هم‌اکنون پنج سد مخزنی کارون ۴، کارون ۳، شهید عباس‌پور، مسجد سلیمان و گتوند، به صورت سری در حال بهره‌برداری هستند. میانگین بلندمدت آورد طبیعی رودخانه کارون در دوره ۱۳۳۱-۱۳۸۷ در محل سد گتوند نزدیک به ۴۸۵ متر مکعب بر ثانیه است. متوسط بارش سالانه حوضه نیز براساس مطالعات انجام شده برابر ۵۳۰ میلی‌متر گزارش شده است (Dezab, 2009).

شکل ۳ نقشه‌ی منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشخص شده است، نیاز کشاورزی در پایین دست سدهای عباس‌پور، گتوند و مسجدسلیمان در نظر گرفته شده است.

همانطور که قبلاً اشاره شد، در هر تکرار از حل مسأله بهینه‌سازی در روش MSDDP (و SDDP)، برش‌هایی به منظور تقریب تابع هدف تولید می‌شوند. هرچه تعداد تکرارهای حل مسأله بیشتر شود، برش‌های بیشتری برای تقریب تابع هدف تولید می‌شوند و در نتیجه دقت تقریب نیز بالاتر می‌رود. آنچه که باعث تغییر جواب‌های بهینه از یک تکرار به تکرار بعد می‌شود نیز برش‌های جدیدی است که به مسأله افزوده شده‌اند. اگر همگرایی مسأله را از نظر همگرا شدن جواب‌های بهینه بررسی کنیم، می‌توان گفت همگرایی مسأله زمانی برقرار می‌شود که برش‌های تولید شده در تکرار جدید باعث ایجاد تغییر قابل توجهی در مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مسأله نشوند. بنابراین اگر سیاست‌های به دست آمده توسط برش‌های تولید شده در این تکرار با سیاست‌های به دست آمده بدون لحاظ کردن برش‌های تولید شده در همان تکرار با اختلاف کمی یکسان شوند، مسأله همگرا شده است. در نتیجه در هر تکرار از حل مسأله مربوط به یک دوره‌ی یک ساله، فرآیند شبیه‌سازی پیشرو را یک بار با در نظر گرفتن برش‌های تولید شده در این تکرار و یک بار بدون در نظر گرفتن آن‌ها، حل می‌کنیم. اگر جواب‌های بهینه‌ی به دست آمده از فرآیند شبیه‌سازی پیشرو در الگوریتم SDDP (یا MSDDP) برای سناریوی m ام و تکرار n ام با در نظر گرفتن برش‌های تولید شده در یک تکرار مشخص را $\hat{x}_{m,t}, t = 1, \dots, T$ و جواب‌های بهینه به دست آمده بدون در نظر گرفتن برش‌های تولید شده در همان تکرار را $x_{m,t}, t = 1, \dots, T$ بنامیم، درصد تغییرات جواب بهینه با نظر گرفتن برش‌های تولید شده در این تکرار و بدون در نظر گرفتن آنها، براساس رابطه (۲۰) به دست می‌آید.

$$\text{perc}_n = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \frac{\hat{x}_{m,t} - x_{m,t}}{x_{m,t}} \quad (20)$$

در نتیجه مقدار perc_n به ازای هر تکرار به دست می‌آید. در این مقاله، الگوریتم را زمانی همگرا فرض کرده‌ایم که مقدار درصد اختلاف جواب‌ها، perc_n ، کمتر از ۵٪ شود.

نکته مهم دیگری که براساس تجربه کاربرد الگوریتم SDDP مشخص شده است، این است که ممکن است perc_n در یکی از تکرارهای اولیه الگوریتم SDDP به مقداری کمتر از مقدار آستانه همگرایی (که در این تحقیق برابر با ۵ درصد است) نیز برسد، اما مجدداً در تکرار بعدی مقدار آن بسیار بیشتر از آستانه باشد. برای جلوگیری از این مسأله، شرط همگرایی به این صورت تعریف شده است که مقدار perc_n در پنج تکرار متوالی کمتر از مقدار آستانه باشد. یعنی:

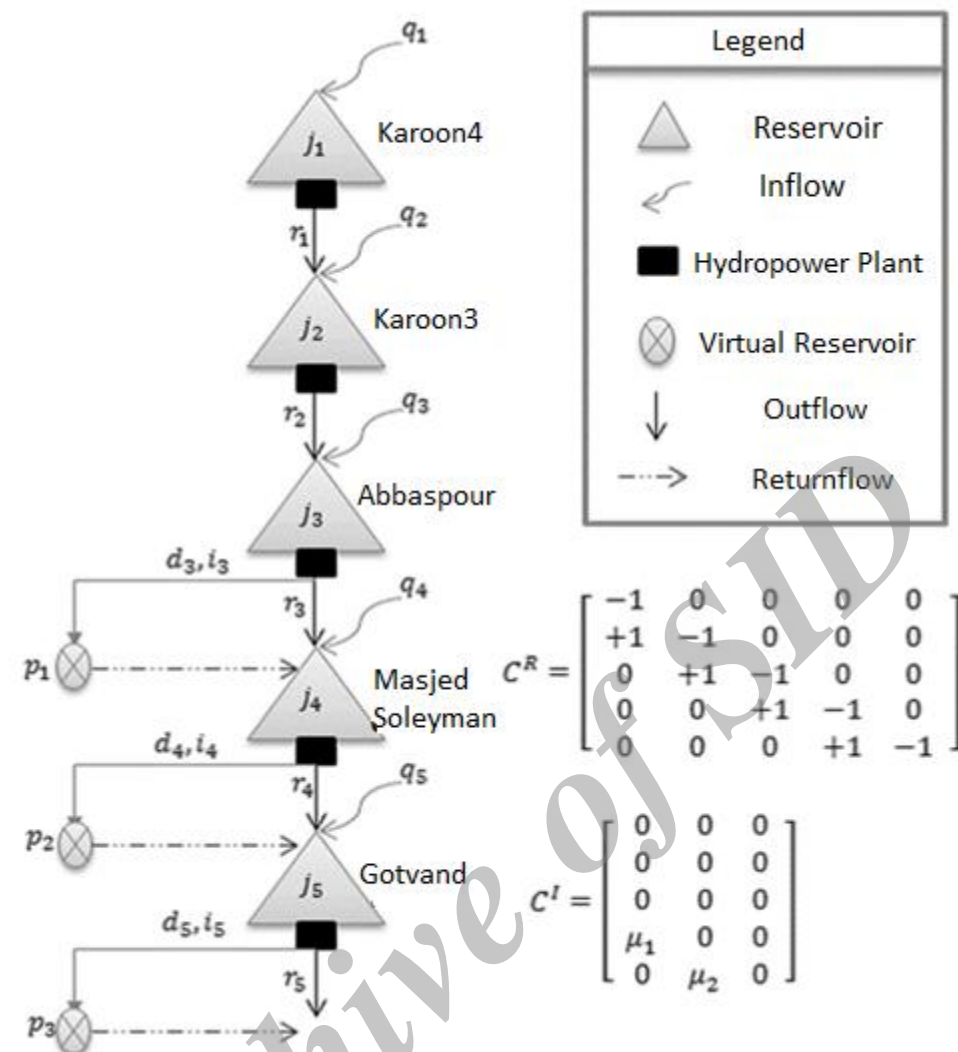


Fig. 3- Schematics diagram of the system under study and the system connectivity matrices

شکل ۳- نمودار سیستم مورد مطالعه و ماتریس ارتباط میان مخازن اصلی و مجازی

بودن داده‌ها و خطاها و آزمون کفایت طول داده‌ها مورد قبول واقع شده است (Safavi 2009). لازم به ذکر است تمامی محاسبات توسط رایانه با پردازشگر Intel@Core(TM) i5 و سرعت پردازش ۲/۵ گیگا هرتز و با مقدار ۴ گیگا بایت حافظه RAM انجام شده است.

در حوضه‌ی مورد مطالعه در این مقاله ۳۴ سال سابقه تاریخی (از سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۸۲) جریان ورودی به مخازن کارون ۳ و کارون ۴ در دسترس است و به عنوان یک فرض ساده کننده از مقادیر جریان بین راهی ورودی به مخازن سدهای شهید عباسپور، مسجدسلیمان چشم‌پوشی شده است. سری زمانی ورودی به این مخازن با استفاده از مدل ARMA(3,1) روی ۱۳ سال اول (از سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۶۱) مدل شده و در نهایت از داده‌های ۲۱ سال باقیمانده (از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۲) به منظور شبیه‌سازی مدل استفاده شده است.

۴- نتایج

در این تحقیق، بهینه‌سازی بهره‌برداری بلندمدت از سیستم پنج مخزنه حوضه رودخانه کارون، با هدف حداکثرسازی سود سیستم به منظور تدوین سیاست‌های پایدار بلندمدت، برای روش MSDDP و SDDP مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین به منظور تولید سناریوی جریان در شبیه‌سازی پیشرو از مدل ARMA(3,1) استفاده شده است. این مدل با استفاده از رسم نمودارهای همبستگی نگار^{۱۰} (ACF) و همچنین همبستگی نگار جزئی^{۱۱} (PACF) و یافتن مناسب‌ترین تأخیر زمانی، انتخاب شده است. نمودارهای ACF و PACF شاخه‌های جریان ورودی به مخازن کارون ۳ و کارون ۴ در شکل ۴ ارائه شده است. مدل منتخب در آزمون‌های آماری از جمله آزمون استقلال زمانی خطاها، آزمون نرمال

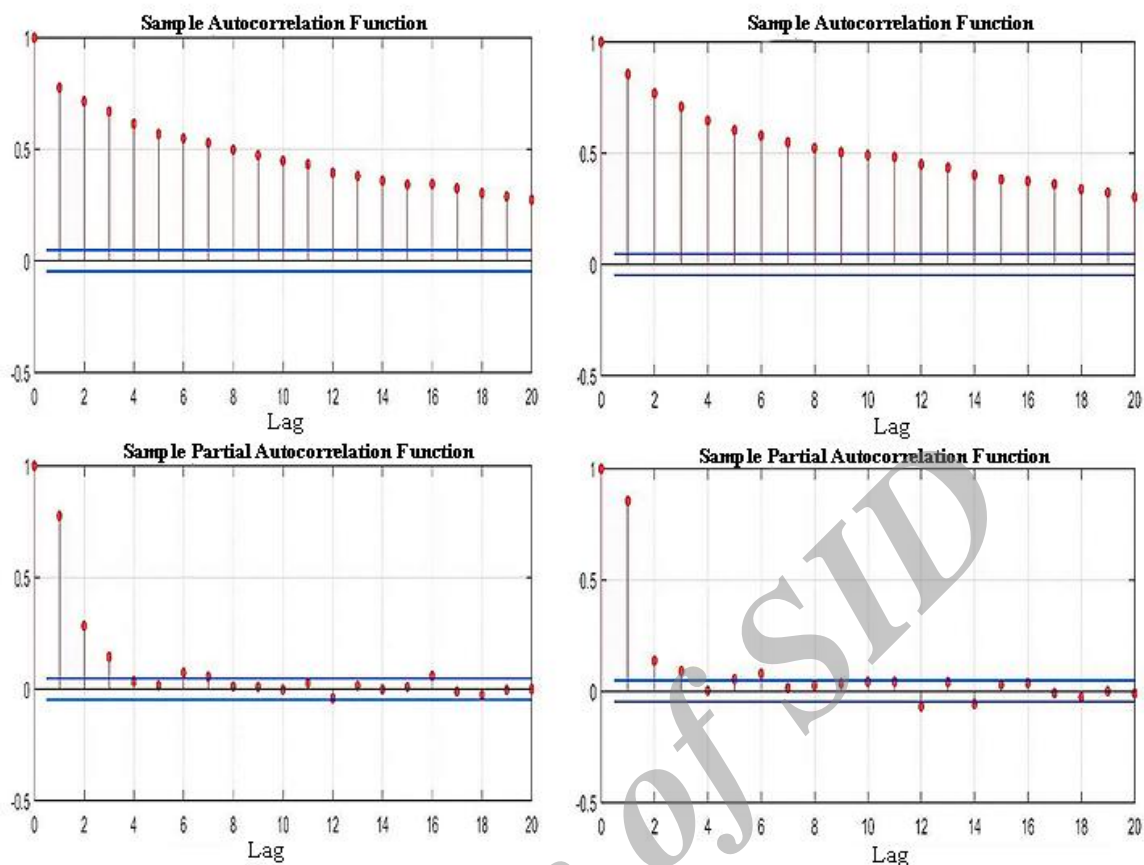


Fig. 4- Sample ACF and PACF of the inflows to Karoon 4 Dam (Left) and Karoon 3 Dam (Right)
 شکل ۴- نمودارهای ACF و PACF مربوط به شاخه جریان ورودی به سد کارون ۴ (سمت چپ) و شاخه جریان ورودی به سد کارون ۳ (سمت راست)

جدول ۱ مقایسه تعداد دوره تا رسیدن به همگرایی و زمان اجرای مدل را در دو روش SDDP و MSDDP ارائه کرده است. با توجه به این جدول می‌توان گفت زمان اجرای مدل در روش MSDDP کمتر از SDDP بوده است. همچنین شکل ۵ حجم ذخایر (سیاست‌های) مخزن کارون ۳ را به عنوان نمونه در قبل و بعد از همگرایی به ترتیب برای روش‌های MSDDP و SDDP نشان می‌دهند. همان‌طور که در این دو شکل مشخص است، قبل از همگرایی سیاست‌های هر دوره تفاوت قابل ملاحظه‌ای با دوره قبلی داشته است. اما پس از همگرایی این تفاوت بسیار ناچیز شده و سیاست‌ها پایدار شده‌اند.

دلیل این مسأله را می‌توان اینگونه توضیح داد که مقدار جریان به کار رفته جهت محاسبه برش در روش SDDP در هر بار تغییر می‌یابد و در نتیجه هر بار که یک برش محاسبه می‌شود مقدار جریان مربوط به آن با مقدار جریان مربوط به برش‌های دیگر تفاوت دارد. اما در MSDDP دسته‌های مشخصی برای جریان وجود دارد و برش‌های مربوط به هر دسته براساس مقدار شاخص آن دسته محاسبه می‌شوند.

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد در SDDP به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت جریان در شبیه‌سازی پیشرو از مدل‌های خودهمبسته استفاده می‌شود. در این مطالعه، در مدل SDDP از یک مدل $PAR(4)$ استفاده شده و تا دستیابی به همگرایی اجرا شده است. بازه‌ی زمانی برای ساخت مدل‌های $ARMA(3,1)$ مربوط به MSDDP و $PAR(4)$ مربوط به SDDP مشابه یکدیگر بوده است.

با توجه به در نظر گرفتن سه نقطه مصرف کشاورزی، در مجموع پنج مخزن اصلی به علاوه سه مخزن مجازی (جهت در نظر گرفتن آب‌بران کشاورزی) در نظر گرفته شده است. میزان آب برگشتی از آب‌برهای کشاورزی به رودخانه ۴۰٪ فرض شده است. تعداد گسسته‌سازی‌ها برابر ۶ در نظر گرفته شده است و همچنین مقدار اولیه برای حجم مخازن اصلی برابر ۴۰ درصد حجم مخزن فرض شده است و تابع جریمه‌ای نیز برای نیاز زیست‌محیطی و نیاز برقابی در نظر گرفته شده است.

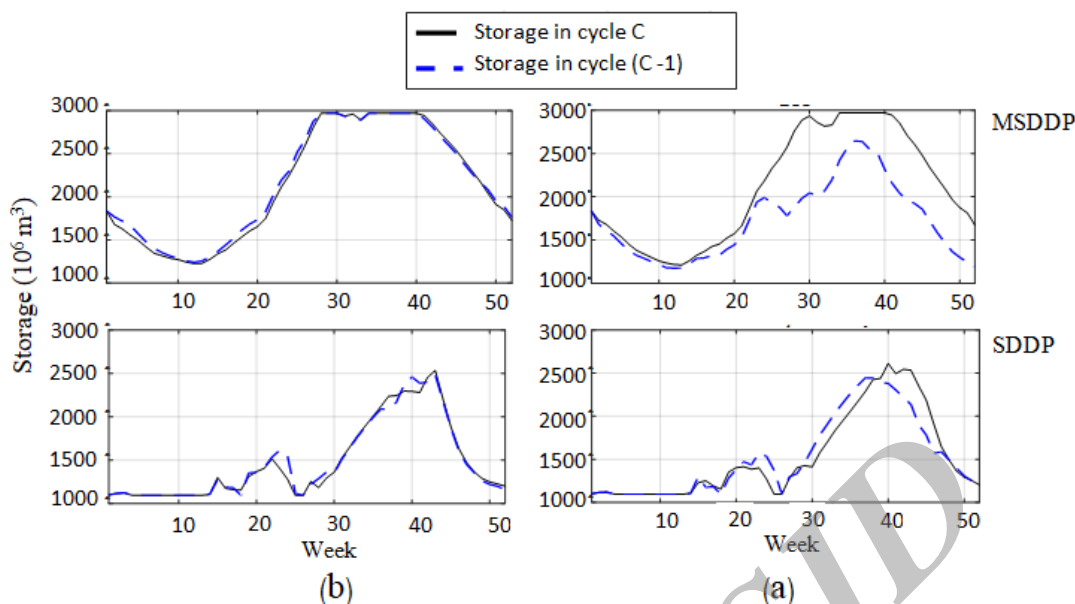


Fig. 5- Comparison of Karoon 3 reservoir storage in two consecutive cycles (a) before convergence and (b) after convergence

شکل ۵- روند همگرایی حجم ذخیره مخزن کارون ۳ در روش MSDDP و SDDP، (a) قبل از همگرایی (b) پس از همگرایی

جواب‌های ایده‌آل مسأله را به صورت قطعی تخمین می‌زند، محاسبه شده‌اند. حجم انتهایی دوره‌ی برنامه‌ریزی در LP برابر حجم انتهایی دوره در MSDDP در نظر گرفته شده است. همانطور که اشاره شد تابع هدف، مجموع سود برق‌آبی و کشاورزی منهای میزان جریمه‌های زیست‌محیطی و برق‌آبی است. به منظور ارزیابی بهتر کیفیت سیاست‌های استخراجی از روش پیشنهادی، جواب‌های حاصله با سیاست خطی مطرح شده توسط Karamouz et al. (1992) نیز مقایسه شده‌اند. این سیاست به فرم کلی زیر است:

$$r_t^j = a_t^j s_t^j + b_t^j I_t^j + c_t^j \quad t = 1, \dots, 52 \quad (21)$$

که در رابطه فوق، a_t^j ، b_t^j ، c_t^j ضرایب معادله سیاست مربوط به مخزن t ام برای گام زمانی t ام هستند و s_t^j و I_t^j به ترتیب حجم ذخیره مخزن t ام در ابتدای گام زمانی t و میزان کل جریان ورودی به مخزن t ام در گام زمانی t هستند. ضرایب معادله فوق برای مخازن سیستم براساس خروجی‌های شبیه‌سازی مدل SDDP استخراج شده و شبیه‌سازی سیاست خطی نیز برای دوره ۲۱ ساله شبیه‌سازی انجام شده است. جدول ۲ مقایسه‌ای از میزان تابع هدف، سود برق‌آبی، کشاورزی، جریمه زیست‌محیطی و برق‌آبی را در ۲۱ سال شبیه‌سازی برای سه روش MSDDP، SDDP و LP و سیاست خطی نشان می‌دهد.

نتایج حاکی از آن است که سود حاصل از شبیه‌سازی در MSDDP نسبت به SDDP حدود ۳۵٪ بیشتر است. سود برق‌آبی در MSDDP

با توجه به اینکه مقدار شاخص دسته تغییر نمی‌کند، برش‌ها در تمام بهینه‌سازی‌های یک‌ساله در نقاط یکسانی تعیین می‌شوند و در نتیجه انتظار می‌رود برش‌های تولید شده در دو بهینه‌سازی یک‌ساله با استفاده از MSDDP، شباهت بیشتری نسبت به برش‌های تولید شده در دو بهینه‌سازی یک‌ساله در SDDP داشته باشند.

Table 1- Comparison of the runtime and the number of cycles to reach convergence for SDDP and MSDDP methods

جدول ۱- مقایسه تعداد دوره تا رسیدن به همگرایی و زمان اجرای مدل بلندمدت برای دو روش MSDDP و SDDP

Method	Number of Cycles to reach convergence	Runtime (minutes)
MSDDP	4	199.98
SDDP	6	236.25

پس از همگرایی سیاست‌های بهره‌برداری و تعیین سیاست بهره‌برداری پایدار بهینه، شبیه‌سازی پیشرو با در نظر گرفتن یک سناریوی تاریخی ۲۱ ساله جریان (از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۲) انجام می‌شود. در این حالت مسأله‌ی تک مرحله‌ای ارائه شده، برای هر گام زمانی و با شروع از گام زمانی اول، با در نظر گرفتن دبی واقعی آن گام زمانی حل می‌شود و امید ریاضی سود مورد انتظار به صورت تقریبی و از طریق برش‌های ارائه شده در نظر گرفته می‌شود. همچنین جهت ارزیابی عملکرد مدل بلندمدت، نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی خطی (LP)، که

درصد حجم حداکثر مخزن فرض شده است. نحوه تغییرات حجم ذخیره مخزن کارون ۳ به عنوان نمونه در روش‌های MSDDP، SDDP و LP، حاصل از شبیه‌سازی سیستم با استفاده از ۲۱ سال سناریوی تاریخی جریان به ترتیب در شکل ۶ نشان داده شده است. توجه کنید که در این شکل جواب‌های مربوط به LP بیانگر جواب بهینه در شرایط قطعیت کامل است. به این معنا که اگر عدم قطعیت جریان وجود نداشت و جریان کل دوره ۲۱ ساله معلوم بود، بهترین بهره‌برداری ممکن برای سیستم با توجه به تابع هدف و محدودیت‌های در نظر گرفته شده به این شکل می‌بود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، طی هفته‌های ۷۰۰ تا ۹۰۰ سیاست‌های به دست آمده در MSDDP و SDDP در تمامی مخازن تفاوت قابل ملاحظه‌ای نسبت به سیاست‌های بهینه بهره‌برداری در شرایط قطعیت کامل دارد. علت این مسأله رخداد جریان ورودی کم به صورت متوالی در این دوره زمانی است.

براساس شکل ۶ دیده می‌شود که در روش MSDDP درصد پر بودن مخازن همواره بیشتر از روش SDDP است. دلیل این امر این است که مدل آماری به کار رفته در SDDP نسبت به MSDDP پیش‌بینی بالاتری از جریان ورودی مورد انتظار در دوره‌های بعدی دارد و به همین دلیل ارزش آب ذخیره شده در مخازن در SDDP کمتر از MSDDP بوده است.

بالاتر از SDDP است در صورتی که سود کشاورزی در SDDP بیشتر از MSDDP بوده است. علت این امر را نیز باید در تفاوت مدل سری زمانی جریان به کار رفته شده در این دو روش دانست. به این معنا که، مدل جریان به کار رفته در SDDP پیش‌بینی بالایی از جریان در گام‌های زمانی بعدی داشته و در نتیجه به راحتی آب موجود در سیستم را به کشاورزی تخصیص داده است. اما MSDDP که پیش‌بینی پایین‌تر، و واقع‌بینانه‌تری، از جریان گام‌های زمانی بعدی داشته است، سودآوری سیستم را در تامین نیازهای برق‌آبی و زیست‌محیطی دیده است. در نتیجه با توجه به جدول ۲ میزان جریمه ناشی از برآورده نشدن نیازهای زیست‌محیطی و برق‌آبی در SDDP بالاتر از MSDDP است.

همچنین براساس جدول ۲ دیده می‌شود که سیاست‌های غیرقطعی حاصله از روش پیشنهادی کیفیت بسیار بالاتری نسبت به سیاست خطی داشته‌اند به گونه‌ای که میزان تابع هدف شبیه‌سازی سیاست‌های غیرقطعی استخراجی از روش‌های MSDDP و SDDP، ۸۵٪ بهتر از تابع هدف شبیه‌سازی سیاست خطی پیشنهادی Karamouz et al. (1992) است.

برای ارزیابی وضعیت مخازن در دوره‌های آبیگری و آب‌دهی در مدل بلندمدت، در مدل شبیه‌سازی، مقدار اولیه برای حجم مخازن برابر ۴۰

Table 2- Comparison of the simulated revenues and penalties in the 21 years simulation for MSDDP, SDDP and linear operation policy LP methods

جدول ۲- مقایسه سود و جریمه در ۲۱ سال شبیه‌سازی برای سه روش MSDDP، SDDP و LP و سیاست بهره‌برداری خطی

Method	MSDDP	SDDP	LP	Linear Policy
Total revenue (10^9 Rials)	30.491	22.652	39.353	4.327
Revenue from hydropower (10^9 Rials)	16.363	14.510	16.451	15.98
Revenue from agriculture (10^9 Rials)	25.912	27.089	26.903	1.050
Penalty for instream flow deficit (10^9 Rials)	3.616	5.347	3.618	2.523
Penalty for hydropower demand deficit (10^9 Rials)	8.167	13.601	0	10.180

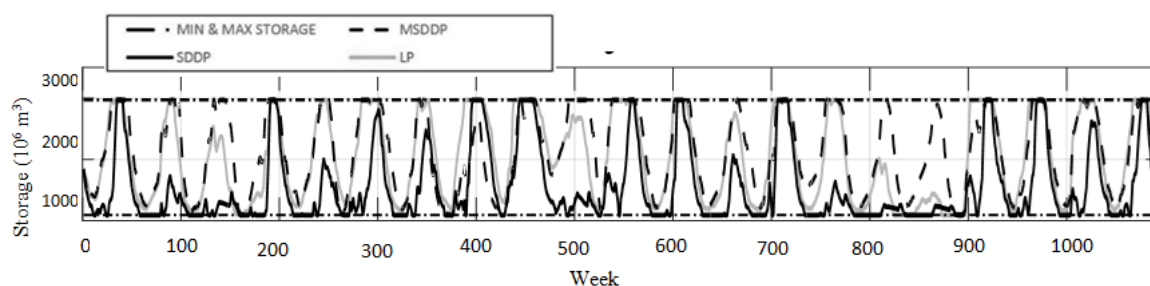


Fig. 6- Reservoir storage variation in Karoon 3 reservoir in the 21 years of simulation for MSDDP, SDDP and LP methods

شکل ۶- تغییرات حجم ذخیره مخزن کارون ۳ برای ۲۱ سال شبیه‌سازی در روش‌های MSDDP، SDDP و LP

از همین رو براساس سیاست SDDP، آزادسازی بیشتر آب انجام شده است که این مسأله منجر به عملکرد ضعیف‌تر سیاست حاصل از این روش شده است. همچنین این شکل گویای این مطلب است که سیاست‌ها و در پی آن تصمیمات بهینه بهره‌برداری از مخازن در MSDDP نسبت به SDDP بسیار نزدیک‌تر به تصمیمات بهینه بهره‌برداری در شرایط قطعیت کامل است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بهینه‌سازی بهره‌برداری بلندمدت از سیستم پنج مخزنه‌ی کارون، بزرگترین سیستم برق‌آبی ایران، با هدف حداکثرسازی سود سیستم به منظور تدوین سیاست‌های پایدار بلندمدت برای سه روش MSDDP مورد ارزیابی قرار گرفت. در همین زمینه رویکرد تک برشی در روش MSDDP به طور مختصر تشریح شده و نتایج حاصل از به کارگیری روش‌های MSDDP، SDDP و LP در بهینه‌سازی بهره‌برداری بلندمدت از این سیستم مقایسه شدند. نتایج ارائه شده در قسمت (۴)، حاکی از آن است که زمان اجرای مدل و تعداد دوره تا رسیدن به همگرایی در روش MSDDP کمتر از SDDP است. علت همگرایی سریع‌تر MSDDP نسبت به SDDP را می‌توان به نحوه تقریب تابع هدف در این روش مرتبط دانست. چرا که در روش MSDDP تقریب‌ها بر روی یک سری گسسته‌سازی‌های ثابتی از جریان ورودی محاسبه می‌شود و در نتیجه تقریب‌های ایجاد شده در دوره‌های مختلف شباهت بیشتری به یکدیگر دارند و همگرایی سریع‌تر رخ می‌دهد. اما در SDDP جریان به صورت تصادفی تولید می‌شود و تولید تقریب‌های تابع هدف براساس این جریان تصادفی انجام می‌شود و در نتیجه شباهت کمتری بین تقریب‌های ایجاد شده وجود دارد و همگرایی به تعداد دوره بیشتری نیاز دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که سود حاصل از شبیه‌سازی در MSDDP نسبت به SDDP حدود ۳۵٪ بیشتر است و سود برق‌آبی در MSDDP بالاتر از SDDP بوده در صورتی که سود کشاورزی در SDDP بیشتر از MSDDP بوده است. همچنین مشخص شد عملکرد سیاست‌های به دست آمده در SDDP نسبت به سیاست‌های به دست آمده از MSDDP ضعیف‌تر است. دلیل این امر این است که مدل آماری به کار رفته در SDDP نسبت به MSDDP پیش‌بینی بالاتری از جریان ورودی مورد انتظار در دوره‌های بعدی دارد. به علاوه نتایج نشان دادند که تصمیمات بهینه بهره‌برداری از مخازن در MSDDP نسبت به SDDP بسیار نزدیک‌تر به تصمیمات بهینه بهره‌برداری در شرایط قطعیت کامل است.

دیگری در بهره‌برداری واقعی از سیستم مد نظر بوده است که در این تحقیق در نظر گرفته نشده است. از آن جمله می‌توان به موضوع کنترل شوری آب در دریاچه سد گتوند و خروجی از این سد اشاره کرد که کاملاً از محدوده این تحقیق خارج بوده است. براساس فرضیات انجام شده و محدودیت‌های و اهداف در نظر گرفته شده، سیاست‌های به دست آمده از روش MSDDP عملکرد بهتری نسبت به سیاست‌های استخراجی از روش SDDP داشته‌اند. به نظر می‌رسد بهبود کارایی ملاحظه شده در عملکرد مدل MSDDP در شرایطی که تمام ملاحظات دستگاه‌های بهره‌بردار از سیستم مخازن کارون نیز در یک شرایط ایده‌آل مدل‌سازی در نظر گرفته شود، نسبت به مدل SDDP قابل انتظار باشد. بنابراین توصیه می‌شود در کاربردهای بعدی بخصوص برای اهداف کاربردی در مدیریت بهره‌برداری از سدهای واقع بر رودخانه کارون، به استفاده از مدل MSDDP نسبت به مدل SDDP اولویت داده شود.

با این حال روش MSDDP این ضعف را داراست که عملاً محدودیت نفرین ابعادی را وارد SDDP می‌کند. چرا که در صورت بالا رفتن تعداد شاخه‌های جریان ورودی یا بالا رفتن تعداد گسسته‌سازی‌ها، زمان اجرا بالاتر خواهد رفت. در این زمینه بررسی امکان استفاده همزمان از مدل‌سازی مارکوفی و مدل‌سازی سری زمانی برای شاخه‌های جریان می‌تواند در تحقیقات آینده مد نظر قرار گیرد. به این معنا که در برخی از شاخه‌های جریان سیستم از مدل سری زمانی که ساده‌تر و از نظر محاسباتی کم‌هزینه‌تر است استفاده شود و در شاخه‌های جریان مهم‌تر و یا دارای رژیم پیچیده‌تر، از رویکرد مارکوفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت جریان در SDDP استفاده شود. تابع هدف اقتصادی و محدودیت‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق، بیانگر شرایط واقعی سیستم نبوده و تنها به منظور بررسی عملکرد روش‌های مورد بررسی مورد استفاده قرار گرفتند. تدقیق توابع هدف و محدودیت‌های بهره‌برداری براساس الزامات و شرایط واقعی حاکم بر سیستم یکی دیگر از مسیرهای تحقیقاتی برای توسعه این تحقیق است. همچنین تعیین مقدار بهینه پارامترهای روش SDDP (تعداد سناریوهای استفاده شده و تعداد تقریب‌های خطی تولید شده در هر تکرار) براساس تعداد مخازن و تعداد متغیرهای حالت سیستم مورد نظر نیز به عنوان موضوعی برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Stochastic Dual Dynamic Programming
- 2-Autoregressive
- 3-Periodic Autoregressive
- 4-Stochastic Dynamic Programming
- 5-Curse of Dimensionality

در این تحقیق سعی شده تا حد امکان ملاحظات و اهداف بهره‌برداری در قالب فرمول‌بندی مدل در نظر گرفته شود ولی قطعاً ملاحظات متنوع

- system: a decomposition approach. *Water resources research* 21(6):779-792
- Pereira M V, Pinto L M (1991) Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning. *Mathematical programming* 52(1-3):359-375
- Philpott A B, De Matos V L (2012) Dynamic sampling algorithms for multi-stage stochastic programs with risk aversion. *European Journal of Operational Research* 218(2):470-483
- Poorsepahy-Samian H, Espanmanesh V, Zahraie B (2014) Optimization of the mid-term operation in multireservoir hydropower systems considering the hourly variations in power prices. In: Proc. of the 5th Iranian Water Resources Management Conference, Iranian Water Resources Association, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. http://www.civilica.com/Paper-WRM05-WRM05_445.html (In Persian)
- Poorsepahy-Samian H, Espanmanesh V, Zahraie B (2016) Improved inflow modeling in stochastic dual dynamic programming. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(12): 04016065
- Sadeghi F (2016) Application of stochastic dual dynamic programming in Optimal operation of hydropower reservoirs. (Unpublished master's thesis), University of Tehran, Tehran, Iran
- Safavi H R (2009) *Engineering Hydrology*. 2nd edition, Arkan Danesh, Esfahan, Iran, 604 pages (In Persian)
- Shapiro A (2011) Analysis of stochastic dual dynamic programming method. *European Journal of Operational Research*, 209(1):63-72
- Tilmant A, Beevers L, Muyunda B (2010) Restoring a flow regime through the coordinated operation of a multireservoir system: The case of the Zambezi River basin. *Water Resources Research* 46(7):W07533
- Tilmant A, Kelman R (2007) A stochastic approach to analyze trade-offs and risks associated with large-scale water resources systems. *Water Resources Research* 43(6):W06425
- Tilmant A, Pinte D, Goor Q (2008) Assessing marginal water values in multipurpose multireservoir systems via stochastic programming. *Water Resources Research* 44(12):W12431
- Vedula S, Mujumdar P P (1992) Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops. *Water Resources Research* 28(1):1-9
- 6-Nile
7-Zambezi
8-Periodic Autoregressive
9-Autocorrelation Function
10-Autoregressive Moving Average
11-Partial Autocorrelation Function
12-Linear Programming
- ۶- مراجع
- Bellman R (1957) *Dynamic programming*. Princeton Univ. Press
- Behan Sad (2013) Studies for updating water master plan of Iran: Karoon River watershed (In Persian)
- Dezab (2009) Systemic studies for Karoon and Dez River basins. Hydrology report (In Persian)
- Espanmanesh V, Zahraie B, Poorsepahy-Samian H (2013) Application of SDDP optimization method in optimization of the mid-term operation of Karoon multireservoir hydropower system. In: Proc. of 12th Iranian Hydraulic Conference, Agriculture and Natural Resources Campus, University of Tehran, Iran (In Persian)
- Gjelsvik A Mo B, Haugstad A (2010) Long- and medium-term operations planning and stochastic modeling in hydro-dominated power systems based on stochastic dynamic programming. *Handbook of Power Systems I. Energy Systems*, pp. 33-55, Springer, Berlin
- Goor Q, Kelman R, Tilmant A (2010) Optimal multipurpose-multireservoir operation model with variable productivity of hydropower plants. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(3):258-267
- Helseth A, Braaten H (2015) Efficient parallelization of the stochastic dual dynamic programming algorithm applied to hydropower scheduling. *Energies*, 8(12): 14287-14297
- Karamouz M, Szidarovszky F, Zahraie B (2003) *Water Resources Systems Analysis*. CRC press
- Karamouz M, Houck M H, Delleur G W (1992) Optimization and simulation of multiple reservoir systems. *ASCE J. Water Resources Planning and Management*, 118(1):71-81
- Madani K, Lund J R (2009) Modeling California's high-elevation hydropower systems in energy units. *Water Resources Research* 45(9):W09413
- Pereira M V F, Pinto L M V G (1985) Stochastic optimization of a multireservoir hydroelectric