

Time-dependent Stochastic Hedging Rules to Reservoir Operation: A Case Study of the Bukan Dam Reservoir

SHAHRAM ZEBARDAST¹, MASOUD PARSINEJAD^{1*}

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Apr. 28, 2021- Revised: June. 23, 2021- Accepted: June. 30, 2021)

ABSTRACT

In operation of dam reservoir, due to the possibility of severe water shortages in the future, supplying total demand of current step is not rational, and the use of hedging rules can provide insurance for water supply in the future. In the reservoir long-term operation to supply the irrigation water demand, uncertainty of reservoir inflow and uncertainty of irrigation water demand have a significant effect on release. Crop water stress sensitivity variation at different growth stages varies the crop production function slope, which is not seen in seasonal production functions. In this study, a stochastic planning model with time-dependent production functions and a deterministic planning model with seasonal production function, in operation of the Bukan dam reservoir by using hedging rules are compared. The results show the reservoir operation by hedging rules increases economic benefit by 46.8% compared to the existing operation model. The time-dependent production function can improve the results by 19% over seasonal production functions. Also, the results show using stochastic model with the inflow uncertainty, irrigation water demand uncertainty and both, inflow uncertainty and irrigation water demand uncertainty simultaneously, the economic benefit increase by 0.73, 4.95 and 12.99%, respectively.

Keywords: Reservoir Operation, Hedging Rules, Inflow Uncertainty, Irrigation Water Demand, Stochastic.

فرمان‌های نگهداشت تصادفی وابسته به زمان برای بهره‌برداری مخزن: مطالعه موردی مخزن سد بوکان

شهرام زبردست^۱، مسعود پارسی‌نژاد^{۱*}

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۴/۲ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۴/۹)

چکیده

بهره‌برداری مخزن سد برای تأمین کل نیاز گام زمانی جاری به دلیل احتمال مواجهه با کمبود آب شدید در آینده منطقی نیست و استفاده از فرمان‌های نگهداشت می‌تواند تأمین آب در آینده را بیمه کند. در بهره‌برداری بلند-مدت مخزن سد برای تأمین نیاز آبیاری، عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن و نیاز آبیاری اثر قابل توجهی در نتایج رهاسازی از مخزن خواهد داشت. همچنین تغییرات حساسیت محصول به تنش آبی در دوره‌های مختلف رشد باعث تغییر در شیب تابع عملکرد محصول می‌شود، که در توابع عملکرد فصلی دیده نشده و مسئله را پیچیده‌تر می‌کند. در این مطالعه مزایای استفاده از مدل تصادفی و توابع عملکرد وابسته به گام زمانی نسبت به مدل قطعی و تابع عملکرد فصلی در بهره‌برداری از مخزن سد بوکان با استفاده از فرمان‌های نگهداشت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌برداری مخزن با فرمان‌های نگهداشت نسبت به مدل بهره‌برداری موجود، ۴۶/۸ درصد سود اقتصادی را افزایش می‌دهد. همچنین توابع عملکرد وابسته به گام زمانی ۱۹ درصد نتایج را نسبت به تابع عملکرد فصلی بهبود می‌بخشد. نتایج مقایسه مدل تصادفی با مدل قطعی بهره‌برداری مخزن نشان می‌دهد که وارد کردن جداگانه عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن و نیاز آبیاری و ورود همزمان هر دو متغیر در محاسبات به ترتیب ۰/۷۳، ۴/۹۵ و ۱۲/۹۹ درصد سود اقتصادی را افزایش خواهد داد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری مخزن، فرمان‌های نگهداشت، عدم قطعیت جریان ورودی، نیاز آبیاری، استوکستیک.

مقدمه

در گذشته مدل‌های مختلفی در راستای بهره‌برداری از مخزن سد استفاده شده است (Yeh, 1985). (Shih & ReVelle 1994) به بهره‌برداری از مخزن در شرایط خشکی با استفاده از فرمان‌های نگهداشت پرداختند. فرمان‌های نگهداشت در حقیقت یک مصونیت و بیمه‌ای برای آینده دارای عدم قطعیت ایجاد می‌کنند. به دلیل محدب بودن تابع تلفات، مدیریت تأمین آب، کمبود آب با تعداد بیشتر را نسبت به تعداد کمتر کمبود آب با شدت بیشتر ترجیح می‌دهد (Shih & ReVelle 1995) و سیاست فرمان‌های نگهداشت برای بهره‌برداری از مخزن، یک مقدار محدود کمبود در تأمین نیاز در گام زمانی جاری را می‌پذیرد که از کمبود شدید در گام‌های زمانی آینده اجتناب کند (You & Cai 2008). (Tu et al., 2003) با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط برای تأمین آب با کمینه کردن صدمات در شرایط خشکی و کمبود، منحنی‌های فرمان متداول را با فرمان‌های نگهداشت جفت کردند. برخی مطالعات برای استخراج منحنی فرمان نگهداشت از روش مستقیم استفاده کردند (Shih & ReVelle (1994); Neelakantan & Pundarikanthan (1999); Tu et al. (2003); Shiau & Lee (2005); Tu et al. (2008); Seo et al. (2019); Wan et al. (2019); Men et al. (2019)

افزایش آب مورد نیاز بخش کشاورزی برای تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد امروز و خشکسالی‌های متوالی باعث فشار بر منابع محدود آب شده است و در این شرایط چاره‌ای جز استفاده بهینه از منابع آب وجود ندارد. با توجه به شرایط اقلیمی از نظر جریان ورودی رودخانه مخزن سد، ابعاد مخزن و نوع مصرف کننده، مدل‌های مختلفی در مطالعات پیشین برای بهره‌برداری بهینه از مخزن پیشنهاد شده است. عدم قطعیت ذاتی موجود در جریان ورودی مخزن، مسئله بهره‌برداری مخزن را پیچیده می‌کند. در گذشته، در سیاست بهره‌برداری استاندارد، برای بهره‌برداری از مخزن، با توجه به داده‌های تاریخی جریان ورودی، سری زمانی جریان ورودی، و مشخصات فیزیکی مخزن، منحنی‌های فرمان برای رهاسازی در هر گام زمانی تهیه می‌شد که هیچ پیش‌بینی و توجهی از احتمال شرایط کمبود و خشکی آینده نداشتند (Yeh, 1985). در سیاست بهره‌برداری استاندارد، اولویت تأمین آب مورد نیاز در گام زمانی جاری است که این مدل در شرایط خشکی و کوچک بودن مخزن سد که اطمینان از توانایی تأمین آب مورد نیاز در گام زمانی آینده وجود ندارد مناسب نیست.

آب مورد نیاز در محاسبات نتیجه بهتری را در مقایسه با بهره- برداری استاندارد و قطعی در نظر گرفتن آب مورد نیاز در بر دارد. برای در نظر گرفتن اثرات عدم قطعیت در مقدار جریان ورودی رودخانه در بهره‌برداری از مخزن برای تأمین آب مورد نیاز سیستم برق آبی، (Belsnes *et al.* (2016) با استفاده از یک مدل بهینه- سازی تصادفی برنامه‌ریزی خطی متوالی (Aasgård *et al.* 2015) در یک مطالعه موردی در کشور نروژ، نشان دادند که وارد کردن عدم قطعیت جریان ورودی در محاسبات نتایج را بهبود می‌بخشد. این محققین عدم قطعیت در جریان ورودی و قیمت فروش برق را به صورت جداگانه و همزمان در محاسبات وارد کردند و نتیجه گرفتند که اثر وارد کردن عدم قطعیت جریان ورودی در بهبود نتایج بیشتر از اثر وارد کردن اثر عدم قطعیت آب مورد نیاز در محاسبات است.

در مطالعات انجام شده بر روی بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن برای تأمین نیاز آبیاری، با استفاده از فرمان‌های نگهداشت، کمتر به اثرات عدم قطعیت و شیوه‌های مختلف برخورد با عدم- قطعیت پرداخته شده است. در حالیکه بیشتر مطالعات بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، تنها به ارزیابی مدل‌های مختلف بهینه سازی بسنده کرده‌اند.

روش تصادفی و استفاده از سناریو در مسئله‌های مدیریت منابع آب به طور موفق استفاده شده است. Moghaddasi *et al.* (2010) برای در نظر گرفتن عدم قطعیت آب مورد نیاز بخش کشاورزی از ۲۹ سناریوی دمای هوا در سال‌های مختلف آماری استفاده کردند و همچنین (Belsnes *et al.* (2016) از سناریوهای مختلف جریان ورودی و قیمت فروش برق برای وارد کردن عدم قطعیت موجود در جریان ورودی مخزن و سود اقتصادی حاصل از فروش برق در بهره‌برداری سیستم برق- آبی استفاده کردند. (You and Cai (2008b) از ۴۱ سناریوی حجم مخزن، که تحت تأثیر جریان ورودی به مخزن است، برای مدل‌سازی عدم قطعیت آب قابل برنامه‌ریزی استفاده کردند

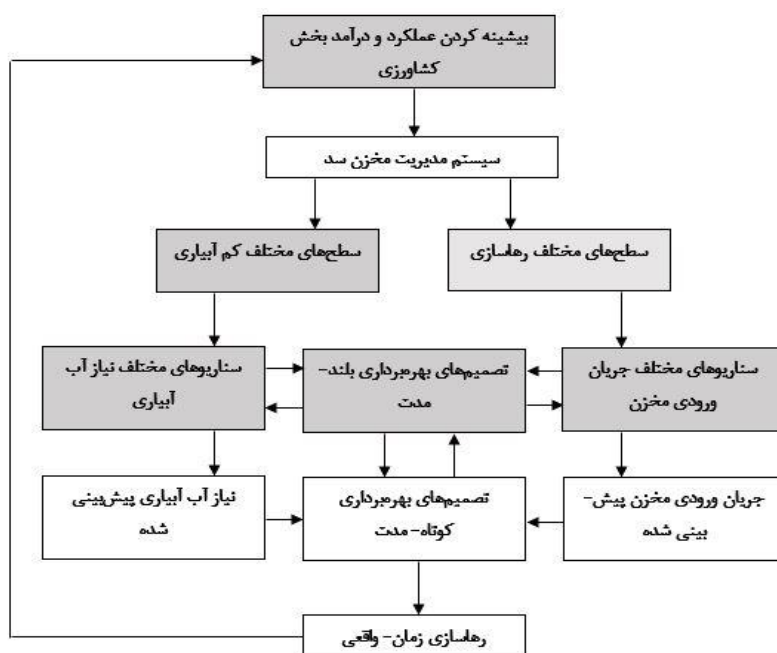
در این مطالعه اثر وارد کردن عدم قطعیت‌های موجود در جریان ورودی رودخانه و شرایط آب هوایی، که اثر مستقیم بر روی آب مورد نیاز گیاهان دارد، در محاسبات بهینه‌سازی بهره- برداری از مخزن سد بوکان، واقع شده در شمال غربی ایران، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این بهینه‌سازی تصادفی بهره- برداری از مخزن بوکان، مدیریت دقیق‌تر در جهت صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی بدون تأثیر منفی بر معیشت کشاورزان است.

در روش مستقیم استخراج فرمان‌های نگهداشت از یک تابع هدف استفاده می‌شود که کمبود در گام زمانی جاری و گام‌های زمانی آینده را تحت قید رابطه پیوستگی مخزن و قید حالت حجم مخزن و رهاسازی، کمینه می‌کند. (Draper and Lund (2004 در شرایطی که یک مخزن تکی تأمین کننده آب است، برای غلبه بر مشکلات جستجوی مستقیم از یک روش تحلیلی برای محاسبه مقدار بهینه رهاسازی، از فرمان‌های نگهداشت، استفاده کردند. این روش بر این اساس است که وقتی سود حاشیه‌ای تابع سود رهاسازی برابر با سود حاشیه‌ای تابع سود ذخیره سازی شود، مقدار رهاسازی بهینه است و همچنین زمانی فرمان‌های نگهداشت به روش بهره‌برداری استاندارد برتری دارد که تابع سود اقتصادی غیر خطی باشد. (Karamouz and Araghinejad (2008 به جای استفاده از داده‌های تاریخی برای استخراج فرمان‌های نگهداشت، مدل بهره‌برداری بلند- مدت، با استفاده از روش تحلیلی، از داده‌های پیش‌بینی جریان و مدل زمان واقعی استفاده کردند. نتایج نشان داد که کاربرد پیش‌بینی جریان در مدل بلند- مدت همراه با فرمان‌های نگهداشت باعث تسکین اثرات خشکی می‌شود. در روش تحلیلی ارائه شده توسط Draper and Lund (2004) آب موجود برای رهاسازی در گام‌های زمانی آینده از مجموع حجم آب ذخیره شده در مخزن و جریان ورودی به مخزن بدست می‌آید و مقدار جریان ورودی همچنین از میانگین داده- های تاریخی بدست آمده است. You and Cai (2008a); You and Cai (2008b) برای محاسبه اثرات عدم قطعیت جریان ورودی در گام زمانی آینده، مقدار ورودی را از حجم ذخیره مخزن در تابع هدف مسئله، که بیشینه کردن سود اقتصادی گام زمانی جاری و گام زمانی آینده است، جدا کردند و به جای در نظر گرفتن یک مقدار ثابت برای جریان ورودی، از تابع توزیع جریان ورودی استفاده کردند. نتایج نشان داد که محاسبه عدم قطعیت جریان ورودی، با استفاده از یک روش تصادفی، روش تحلیلی بدست آوردن فرمان‌های نگهداشت را اصلاح می‌کند و نتایج را بهبود می‌بخشد. در روش ارائه شده توسط این محققین عدم- قطعیت جریان ورودی در گام زمانی آینده در محاسبات وارد شد ولی به عدم قطعیت در آب مورد نیاز که تحت تأثیر وضعیت آب و هوا در گام زمانی آینده است پرداخته نشد. از طرفی Plamer *et al.* (1995) بیان کردند که اثر عدم قطعیت در آب مورد نیاز به دلیل تغییرات شرایط آب و هوایی بیشتر از دیگر عدم قطعیت‌ها است. در این راستا، نتایج مطالعه Moghaddasi *et al.* (2010) در بهره‌برداری از مخزن سد زاینده رود نشان داد که استفاده از سیاست بهره‌برداری نگهداشت همراه با وارد کردن عدم قطعیت

مواد و روش‌ها

گرفته است. مدل تخصیص با استفاده از رابطه تابع سود اقتصادی در برابر آب مصرف شده برای محصول‌های مختلف تحت کشت مقدار نیاز آب آبیاری را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. مدل بهره‌برداری بهینه مخزن با در نظر گرفتن نیاز آب آبیاری و جریان ورودی مخزن مقدار رهاسازی بهینه را در هر زمان مشخص تعیین می‌کند. افق زمانی مدل بهره‌برداری بلند-مدت یک سال می‌باشد و گام زمانی مورد استفاده در این مطالعه یک ماه است.

شکل (۱) نمودار برنامه‌ریزی و مدیریت مخزن سد را نشان می‌دهد. در این شکل بخش‌هایی از مطالعه مدیریت سیستم منابع آب که این مقاله به آن پرداخته است، نشان داده شده است. در این مقاله مدل بهره‌برداری بهینه بلند-مدت مخزن و ارتباط آن با تخصیص نیاز آب آبیاری در بخش کشاورزی تحت شرایط عدم قطعیت جریان ورودی مخزن و نیاز آب آبیاری مورد تحقیق قرار



شکل ۱- نمودار گردش سیستم مدیریت مخزن (جعبه‌های خاکستری بخش‌های مورد تحقیق در این مطالعه هستند)

صورت جداگانه محاسبه شده و در جدول (۱) آورده شده است. داده‌های هیدروکلیماتولوژی استفاده شده در این مطالعه مربوط به سال‌های بین ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۶ است.

آب و هوای منطقه مطالعه، دشت میاندوآب، بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه در اقلیم خشک و سرد و نیمه خشک و سرد قرار دارد و همچنین بر اساس طبقه‌بندی دو مارتن در اقلیم نیمه خشک و سرد قرار می‌گیرد.

میزان بارندگی سالانه محدوده مورد مطالعه حدود ۲۵۴ میلی‌متر است. بررسی‌های داده‌های بارندگی ایستگاه‌های باران-سنجی منطقه نشان می‌دهد که عمده بارندگی در زمستان است. ماه‌های فروردین و آبان با متوسط بارندگی به ترتیب ۳۷/۷ و ۳۴/۹ میلی‌متر، پر باران‌ترین ماه‌های سال محسوب می‌شوند. و همچنین، ماه‌های مرداد، تیر و شهریور با متوسط بارندگی به ترتیب ۰/۸، ۲/۲ و ۳/۸ میلی‌متر دارای کم باران‌ترین ماه‌های سال هستند. بررسی‌های هواشناسی نشان می‌دهد ۳۲/۲۷ درصد بارندگی سالانه در فصل پاییز، ۳۵/۰۶ درصد در فصل زمستان،

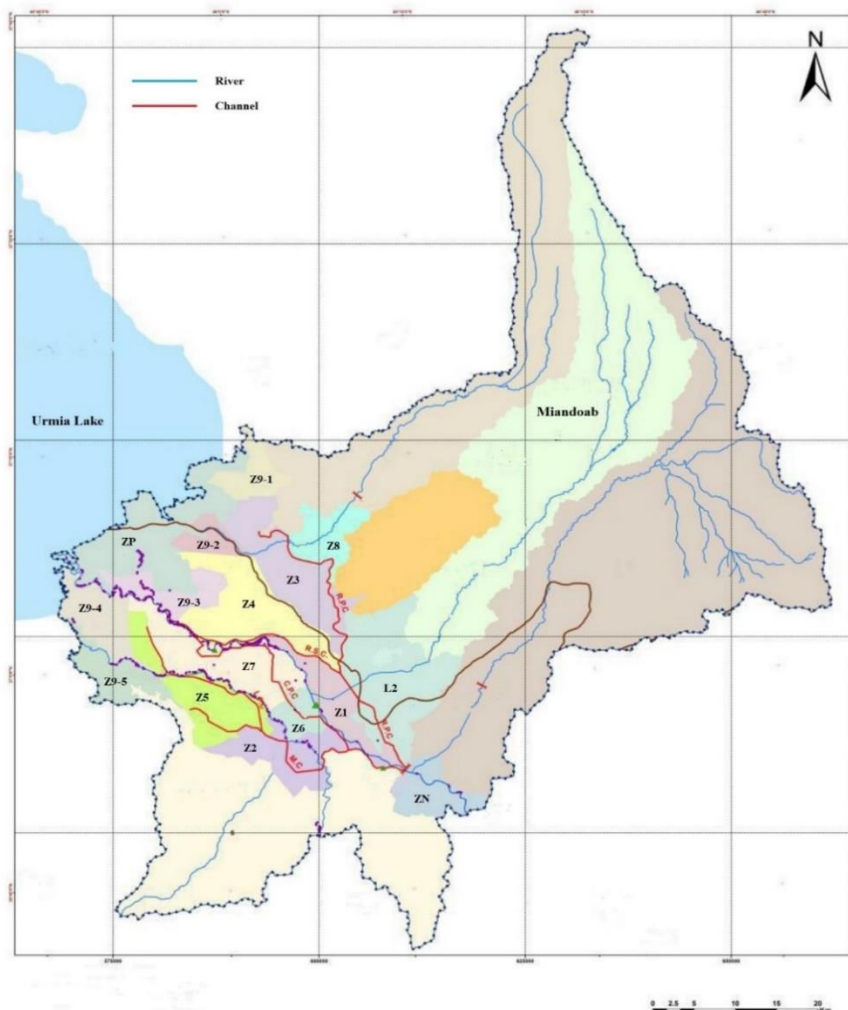
محدوده مورد مطالعه و داده‌ها

حوضه زرينه-رود از زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه می‌باشد که در شمال غربی ایران واقع شده است. زرينه-رود تأمین کننده آب مورد نیاز شرب و صنعت شهرهای تبریز، بوکان، شاهین دژ و میاندوآب است و حدود ۷۴ درصد آب زرينه-رود برای تأمین نیاز آبیاری بخش کشاورزی حوضه مصرف می‌شود. همچنین زرينه-رود تأمین کننده حدود ۴۰ درصد آب مورد نیاز دریاچه ارومیه است. سد شهید کاظمی (بوکان) با حجم مخزن ۸۵۰ میلیون متر مکعب بر سر راه این رودخانه قرار گرفته است. میانگین ماهانه حجم آب ورودی به مخزن ۱۶۵ میلیون متر مکعب است. در حوضه رودخانه زرينه-رود در پایین دست سد شهید کاظمی حدود ۷۵ درصد نیاز آبیاری محصول‌های زراعی و باغی ناحیه‌های مختلف از منابع آب سطحی تأمین می‌شود. شکل (۲) حوضه آبریز زرينه-رود و ناحیه‌های مختلف تحت آبیاری دشت میاندوآب را نشان می‌دهد. ضریب‌های تابع سود برای ماه‌های مختلف، با توجه به ضریب حساسیت محصول‌های زیر کشت در ماه، به

خوار و بار جهانی معرفی و ارائه شده استفاده شده است. نتایج مدل نشان می‌دهد که مجموع تبخیر و تعرق پتانسیل در منطقه مورد مطالعه ۱۱۴۲ میلی‌متر است. ماه تیر با ۱۸۷/۲ میلی‌متر و ماه دی با ۲۲/۸ میلی‌متر به ترتیب بیشترین و کمترین میزان تبخیر تعرق پتانسیل را به خود اختصاص می‌دهند.

۲۹/۹۹ درصد در فصل بهار و ۶/۸ درصد در فصل تابستان اتفاق می‌افتد.

برای تعیین آب مورد نیاز محصول‌های کشاورزی برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ضرورت دارد. مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در این مطالعه از نرم افزار Cropwat که توسط سازمان



شکل ۲- دشت میان‌دوآب و ناحیه‌های مختلف تحت آبیاری

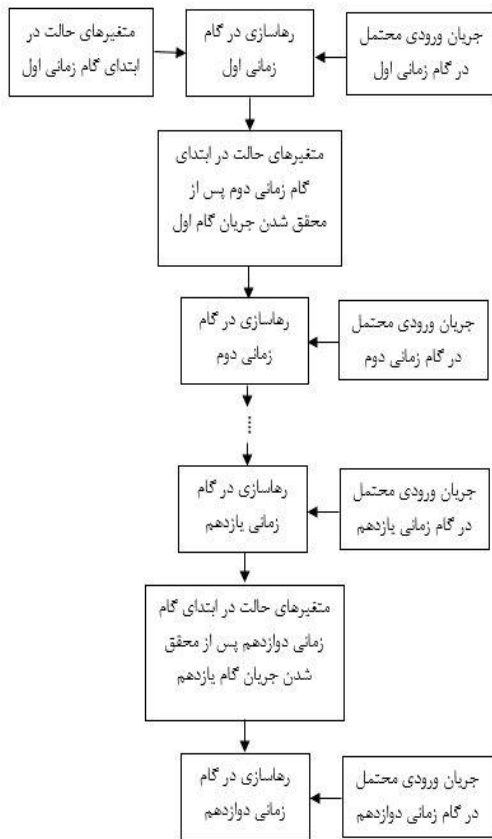
برنامه‌ریزی بهره برداری بلند-مدت مخزن

الگوهای کوتاه-مدت زمان-واقعی رهاسازی اگر بدون در نظر گرفتن اهداف بلند مدت باشد فاقد اعتبار لازم بوده و در فرمان‌های نگهداشت شکست خواهد خورد (Srekanth *et al*, 2012). هر چه طول دوره برنامه‌ریزی کوتاه تر باشد اثر عدم قطعیت کاهش می‌یابد. یک چالش اصلی که بر سر راه برنامه‌ریزی بلند-مدت مخزن قرار دارد عدم قطعیت‌های موجود به دلیل بلند بودن طول دوره‌ی تصمیم‌گیری است. بهره‌برداری از مخزن برای تأمین نیاز آبیاری علاوه بر عدم قطعیت جریان ورودی رودخانه، با اثرات عدم قطعیت شرایط آب و هوایی بر روی نیاز آبیاری روبرو است. به دلیل اینکه اثر عدم قطعیت دمای هوا بیشتر از دیگر عوامل است،

جدول ۱- ضریب‌های ثابت تابع رهاسازی برای گام‌های زمانی مختلف

گام‌های زمانی	a	b	c
مهر	۰/۰۰۰۲۸	۱۸۴۱۰۳/۶۷	-۰/۰۰۸۴
آبان	۰	۱۸۰۳۷۴/۳۱	-۰/۰۱۲۲
آذر	۰/۰۰۰۰۳	۳۳۲۱۱۵/۳۳	-۰/۰۴۰۶
دی	۰/۰۰۰۰۳	۴۵۳۰۴۹/۳۳	-۰/۰۴۶۲
بهمن	۰/۰۰۰۰۵	۲۵۶۰۴۱/۳۳	-۰/۰۱۵۴
اسفند	-۰/۰۰۰۳۲	۱۱۹۴۸۱/۱۱	-۰/۰۰۳۳
فروردین	۰/۰۰۰۶۹	۸۷۰۸۶/۸۵	-۰/۰۰۰۷
اردیبهشت	۰/۰۰۰۳۲	۴۸۲۱۸/۴۹	-۰/۰۰۰۲
خرداد	۰/۰۰۰۱۶	۳۳۸۹۶/۹۸	-۰/۰۰۰۱
تیر	-۰/۰۰۰۲۹	۴۰۴۰۳/۵۶	-۰/۰۰۰۲
مرداد	-۰/۰۰۰۵۷	۴۸۶۳۰/۵۱	-۰/۰۰۰۵
شهریور	۰/۰۰۰۱۴	۷۱۲۳۰/۹۲	-۰/۰۰۱۲

شاخه تقسیم می‌شود که هر شاخه یک اتفاق محتمل است. پدیده‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده در منابع آب به طور کلی با مقدار رویدادهای قبلی و بعدی موجود در مجموعه داده‌های سری زمانی خود دارای همبستگی هستند و در این مورد می‌توان از مفهوم احتمال انتقال متغیرهای تصادفی استفاده کرد (Bzorg haddad, 2014). در درخت سناریو، اتفاق‌های محتمل در هر گره با اتفاق محقق شده در گره قبل همبستگی دارد. به هر مسیر از ریشه تا برگ درخت، نقطه ابتدای نمودار درختی تا هر نقطه در پایان افق زمانی برنامه‌ریزی تصادفی، یک سناریو گفته می‌شود (Belsnes et al. 2016). برای ارزیابی اثر عدم قطعیت‌ها، جریان ورودی به مخزن و دمای هوا به صورت جداگانه و همزمان وارد محاسبات شده و نتایج با مدل قطعی مورد مقایسه قرار داده شده است. شکل (۳) مراحل مدل برنامه‌ریزی تصادفی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- الگوریتم برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای

فرمان‌های نگهداشت

در مدل تحلیلی برای استخراج فرمان‌های نگهداشت، تابع هدف مدل بهینه‌سازی، بیشینه کردن مجموع سود اقتصادی بدست آمده تحت قید تساوی رابطه پیوستگی مخزن و قید حالت نامساوی حجم ذخیره مخزن و رهاسازی است (Draper and Lund, 2004).

$$Max_{R,S} B(R) + B(S) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این مطالعه به اثر تغییرات دما پرداخته شده است (Moghaddasi et al. 2010). در مواجهه با عدم قطعیت در منابع آب از روش‌های مختلفی استفاده شده است و برخی از مطالعات برای کاهش اثرات آن تنها به بروز رسانی داده‌ها در ابتدای هر گام زمانی اکتفا کردند (Gavahi et al. 2018). در این مطالعه مدل بهره‌برداری بلند-مدت دارای افق زمانی یک سال آبی و گام‌های زمانی یک ماهه استفاده شده است.

مدل سازی عدم قطعیت

مسئله‌های مهندسی منابع آب با داده‌های دارای عدم قطعیت مواجه هستند و برای برنامه‌ریزی و حل این مسئله‌ها باید از روش‌های توانمند به در نظر گرفتن عدم قطعیت بهره گرفت (Bzorg haddad, 2014). علم گرفتن بهترین تصمیم در شرایطی که هزاران امکان انحراف وجود دارد برنامه‌ریزی تصادفی از شاخه‌های برنامه‌ریزی عدم قطعیت نامیده می‌شود (Mirhasani and Hoshmandkhaligh, 2019). جریان ورودی مخزن، از متغیرهای مهم دارای عدم قطعیت در مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن برای تأمین آب آبیاری است. تفاوت اصلی برنامه‌ریزی تصادفی با برنامه‌ریزی قطعی در عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی مسئله است که در زمان اتخاذ تصمیم مقدار آنها در یک محدوده و احتمال مشخص نامعلوم است. (Mirhasani and Hoshmandkhaligh, 2019). در این مسئله برنامه‌ریزی فرمان-های نگهداشت تصادفی، رابطه‌ها مانند مدل قطعی ارائه شده توسط Draper and Lund (2004) است. روش‌های مختلفی برای مواجهه با عدم قطعیت شامل عدم قطعیت و تحلیل حساسیت، عدم قطعیت و تبدیل به قطعی و عدم قطعیت و استفاده از سناریوها وجود دارد. روش برخورد با عدم قطعیت و تحلیل حساسیت برای مسئله‌های کوچک با یک پارامتر متغیر مناسب است و روش تصادفی و تبدیل به قطعی حالت‌های خوش بینانه و بدبینانه مسئله به صورت جداگانه و قطعی در نظر می‌گیرد که در نتیجه استفاده از این روش جواب خوش بینانه دارای ریسک بالا و جواب بدبینانه بسیار محافظه کارانه و پرهزینه خواهد بود. در روش استفاده از سناریو در حقیقت پارامترهای تصادفی و پیش‌آمدهای محتمل را تحت عنوان یک سناریو معرفی می‌کنند (Mirhasani and Hoshmandkhaligh, 2019). متغیرهای تصادفی، در برنامه‌ریزی تصادفی با استفاده از سناریو، به صورت متغیرهای مستقل و به شکل درخت سناریو مشخص می‌شوند. درخت سناریو در حقیقت یک نمودار درختی است و برای شبیه‌سازی عدم قطعیت در سیستم مخزن استفاده می‌شود. نقطه ابتدایی این درخت یک اتفاق محقق شده است و هر گره از این نمودار درختی به تعدادی

تحت قیدهای:

$$\begin{aligned} S_{t+1} &= S_t + I_t - R_t - E_t \\ 0 &\leq S_t \leq S_{max} \\ R_{min,t} &\leq R_t \leq D_t \end{aligned}$$

$B(R)$ تابع سود حاصل از رهاسازی در گام زمانی جاری

است؛ $B(S)$ تابع سود حاصل از ذخیره کردن و نگهداشت است؛ S حجم آب ذخیره شده در مخزن است؛ I حجم جریان ورودی به مخزن است؛ R حجم رهاسازی است؛ E کل حجم تلفات از مخزن است؛ D آب مورد نیاز است؛ و نمایه t نشان دهنده گام زمانی است. در بهره‌برداری از مخزن برای مصارف صنعت و یا برق - آبی که به تولید و سود اقتصادی منتهی می‌شود، اگر شیب تابع سود اقتصادی ذخیره برای گام زمانی آینده، که در ادامه بیشتر در این مورد توضیح داده خواهد شد، در محدوده آب در دسترس، بیشتر از شیب تابع سود رهاسازی در گام جاری باشد، رهاسازی تا مقدار صفر کاهش خواهد یافت. این بهره‌برداری برای تأمین نیاز کشاورزی، بهینه نخواهد بود و ممکن است به بیشینه سود اقتصادی منجر نشود. به عنوان مثال اگر در گام زمانی جاری محصول در مرحله رشد رویشی قرار داشته باشد و در گام زمانی آینده در مرحله گلدهی، که دارای حساسیت بیشتری نسبت به کم آبی است، قرار بگیرد و شرایط موجود با توجه به پیش‌بینی جریان ورودی و حجم مخزن، مدل بهره‌برداری از مخزن، بهره‌برداری بهینه را ذخیره کل حجم مخزن و رهاسازی صفر نشان دهد، شرایط مانند قبل پیش نخواهد رفت و محصول ممکن است صدمه ببیند و در گام زمانی آینده در شرایط پیش‌بینی شده قرار نگیرد و تابع سود دچار تغییر و جابجایی مرحله رشد گیاه شود. از این رو یک مقدار کمینه با توجه به مدیریت مخزن برای رهاسازی و حساسیت کشت در هر گام زمانی مشخص می‌شود که با $R_{min,t}$ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعه Draper and Lund (2004)، در این مطالعه تابع سود رهاسازی، تابع درجه دوم در نظر گرفته شده است.

$$B(R) = a + b.R + c.R^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

ضریب‌های a ، b و c مقادیر ثابت رابطه درجه دوم هستند. در این مطالعه واحد $B(R)$ ریال و مربوط به گزارش‌های سال‌های ۹۴ و ۹۵ است، و واحد R ، حجم آب آبیاری، متر مکعب است. تابع سود حاصل از رهاسازی وابسته به تابع عملکرد محصول است و با توجه به تغییرات ضریب حساسیت، عملکرد حاشیه‌ای محصول در گام‌های زمانی مختلف تغییر خواهد کرد. تابع سود

حاصل از نگهداشت علاوه بر تابع سود حاصل از رهاسازی در گام - های زمانی آینده، تحت تأثیر عوامل مختلف مانند جریان ورودی محتمل و ظرفیت مخزن قرار می‌گیرد. برای تصمیم‌گیری در مورد حجم رهاسازی و حجم آبی که از رهاسازی منع می‌شود و برای بدست آوردن سود در آینده در مخزن ذخیره می‌شود، نیاز است به ظرفیت ذخیره مخزن و مدت زمان لازم برای پر شدن مخزن توسط جریان ورودی توجه شود. ظرفیت زیاد مخزن نسبت به نیاز آبی و جریان ورودی محتمل زیاد، از ارزش نگهداشت کم خواهند کرد. حجم تلفات نشت و تبخیر از سطح آب ذخیره شده در مخزن نیز بخشی از این نیاز آبی در نظر گرفته می‌شوند که خود تحت تأثیر حجم ذخیره مخزن است. (Draper and Lund 2004) با در نظر گرفتن اثر تابع سود در گام زمانی آینده، حجم مخزن و حجم جریان ورودی محتمل، رابطه زیر را برای تابع سود ذخیره پیشنهاد

دادند:

(رابطه ۳)

$$B(S) = \text{Max} \left[EV \left\{ \sum_{t=1}^{\infty} \left(B_t \left[R_t + S_t + \frac{\partial R_t}{\partial A_t} (S - \sum_{t=1}^t s_t) \right] - B_t(R_t) \right) \exp(-rt) \right\} \right]$$

این رابطه با تقسیم حجم ذخیره مخزن S به مقدارهای کوچکتر s_t در هر بازه زمانی t ، ارزش ذخیره را برابر با امید ریاضی حاشیه‌ای رهاسازی اضافی آینده حاصل از مجموع ارزش s_t در نظر گرفته می‌شود و فرض شده است که استفاده بهینه آب در آینده در یک ضریب کاهش $\exp(-rt)$ ضرب می‌شود. در این رابطه A نشان دهنده آب در دسترس در زمان حاضر است ($S_t + I_t - E_t$). به دلیل پیچیدگی زیاد این رابطه Karamouz and Araghinejad (2008) با بدست آوردن سود بیشینه در طول افق زمانی پر شدن مخزن در برابر حجم‌های مختلف ذخیره، رابطه زیر را برای تابع سود ذخیره‌سازی پیشنهاد دادند که توابع سود رهاسازی در آینده، افق زمانی پر شدن مخزن، ظرفیت ذخیره مخزن و حجم جریان ورودی محتمل را همچنین در نظر می‌گیرد:

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T B(R_t) \quad (\text{رابطه ۴})$$

تحت قیدهای:

$$\begin{aligned} I_t + S_t - S_{t+1} - E_t &= R_t \\ 0 &< S_t < Cap \end{aligned}$$

در این رابطه T افق زمانی یا تعداد گام‌های زمانی است که مخزن پر خواهد شد. I_t حجم جریان ورودی در گام زمانی t است. در مدل بهره‌برداری بلند-مدت از امید ریاضی جریان ورودی به مخزن در گام مورد نظر استفاده می‌شود. در این مطالعه به دلیل پیچیدگی کمتر، از رابطه (Karamouz and Araghinejad 2008)

(2004) رابطه‌های (۶) و (۷) برای محدوده کاربرد فرمان‌های نگهداشت پیشنهاد دادند.

$$S_t + I_t - E_t > \frac{(b_s - b_r)}{2C_r} \quad (\text{رابطه ۶})$$

(رابطه ۷)

$$S_t + I_t - E_t \leq \text{Min} \left[D_t \left(1 + \frac{C_r}{C_s} \right) + \frac{b_r - b_s}{2C_s}, K \left(1 + \frac{C_s}{C_r} \right) + \frac{b_s - b_r}{2C_r} \right]$$

You and Cai (2008b) یک مدل تحلیلی برای مشخص

کردن محدوده کاربرد فرمان‌های نگهداشت ارائه کردند، و بیان کردند که از نظر ریاضی نقطه شروع کاربرد فرمان‌های نگهداشت، نقطه‌ای است که سود حاشیه‌ای رهاسازی نسبت به مقدار کل آب در دسترس برابر با سود حاشیه‌ای ذخیره‌سازی با ذخیره صفر می‌باشد.

$$\frac{\partial B(R)}{\partial R} \Big|_{R=A} = \frac{\partial B(S)}{\partial S} \Big|_{S=0} \quad (\text{رابطه ۸})$$

در حقیقت قبل از نقطه شروع فرمان‌های نگهداشت، بهره‌برداری بهینه، سیاست بهره‌برداری استاندارد است و کل آب در دسترس برای تأمین آب مورد نیاز گام زمانی جاری رهاسازی می‌شود. با افزایش آب در دسترس سود حاشیه‌ای ذخیره شروع به کاهش می‌کند و این روند تا تأمین کل آب مورد نیاز ادامه دارد، که این نقطه پایان کاربرد سیاست بهره‌برداری فرمان‌های نگهداشت است. در این نقطه، سود حاشیه‌ای رهاسازی با تأمین کل آب مورد نیاز، برابر با سود حاشیه‌ای ذخیره است. از آنجایی که $S = A - R$ است، می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial B(R)}{\partial R} \Big|_{R=D} = \frac{\partial B(A-R)}{\partial S} \Big|_{A=A_0} \quad (\text{رابطه ۹})$$

با توجه به رابطه بالا $A_0 = S_t + I_t - E_t$ حجم آب در دسترسی است که پس از آن فرمان‌های نگهداشت بی اثر خواهد بود و نقطه پایان بهینه بودن آن است.

مقایسه تابع سود متداول وابسته به گام زمانی

برای بهینه‌سازی مصرف، در ابتدا نیاز است که ارتباط میان نهاده مصرفی و بازده و خروجی سیستم مشخص شود. از این رو، تابع سود در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد برای مصارف مختلف از جمله صنعت، سیستم برق-آبی و کشاورزی تهیه می‌شود. توابع تولید سود اقتصادی، متناسب با حجم مشخص مصارف مختلف، مقدار سود اقتصادی بدست آمده و سپس با روش‌های مختلف، تابع سود برای هر مصرف کننده تهیه می‌شود. برخی مصرف کننده‌ها مانند سیستم‌های برق-آبی، سود اقتصادی می‌تواند وابسته به زمان باشد که منجر به پیچیدگی مسئله خواهد شد. اما سود اقتصادی حاصل از بخش کشاورزی به دلیل وابستگی سود اقتصادی به نوع محصول زیر کشت و زمان، نسبت به دیگر مصرف

برای بدست آوردن تابع سود ذخیره استفاده شده است. رابطه (۴) با استفاده از نرم افزار LINGO (Lindo System, 2003) بهینه‌سازی شده است.

با توجه به رابطه (۴) که توسط Karamouz and Araghinejad (2008) برای بدست آوردن تابع سود ذخیره پیشنهاد شده است، تابع سود ذخیره تحت تأثیر جریان ورودی و ظرفیت مخزن قرار دارد و این رابطه از طریق زمان لازم برای پر شدن مخزن توسط جریان ورودی در رابطه وارد شده است. در نتیجه برای وارد کردن عدم قطعیت در محاسبه تابع سود ذخیره به اطلاع از سناریوی محتمل جریان در طول افق زمانی پر شدن مخزن، توسط جریان ورودی، نیاز است. برای توصیف یک توالی از رویدادهای احتمالی از مفهوم زنجیره مارکوف^۱ استفاده می‌شود که در آن احتمال هر رویداد در هر گام زمانی، تنها به رویداد گام قبل بستگی دارد و مستقل از گذشته است. Bzorg haddad (2014) بیان می‌کند که می‌توان با استفاده از زنجیره مارکوف و ماتریس احتمال انتقال مقدار احتمال وقوع یک متغیر تصادفی را از اتفاق محقق شده در گام زمانی قبل از آن بدست آورد. You and Cai (2008b) and Belsnes *et al.* 2016 از مفهوم زنجیره مارکوف و ماتریس احتمال انتقال برای تهیه سناریوی محتمل جریان ورودی در گام‌های زمانی آینده استفاده کردند. برای محاسبه تابع سود ذخیره تصادفی، رابطه (۴) برای سناریوی مختلف حل خواهد شد.

Draper (2001) بیان کرد که برای فرمان‌های نگهداشت دو نقطه‌ای، تابع درجه دوم برای محدوده گسترده‌ای از مسائل مناسب خواهد بود. همچنین Draper and Lund (2004) نشان دادند که زمانی تابع هدف، رابطه (۱)، بیشینه می‌شود که دیفرانسیل تابع سود رهاسازی نسبت به حجم رهاسازی برابر با دیفرانسیل تابع ذخیره‌سازی نسبت به حجم ذخیره شده شود. این به این معنی است که در رهاسازی بهینه، سود حاشیه‌ای رهاسازی برابر با سود حاشیه‌ای ذخیره‌سازی است.

$$\frac{\partial B(R)}{\partial R} = \frac{\partial B(S)}{\partial S} \quad (\text{رابطه ۵})$$

رابطه (۵) نشان دهنده برابری سود حاشیه‌ای رهاسازی و ذخیره‌سازی است. مقدار حجم رهاسازی بهینه در گام زمانی جاری با استفاده از حجم آب موجود در مخزن در ابتدای گام زمانی، مقدار حجم جریان ورودی در طول دوره، مقدار تلفات آب در مخزن در طول دوره، مقدار سود حاصل از مصرف هر واحد آب در گام زمانی جاری و گام‌های زمانی آینده تعیین می‌شود. برای اعمال قیدهای رابطه (۱) در رابطه خطی (۴)، Draper and Lund

مختلف تولید محصول بدست می‌آید و با روش حداقل مربع‌ها^۱ تابع سود درجه دوم حاصل از مصرف آب برای هر گام زمانی محاسبه می‌شود. تفاوت رابطه (۱۲) با رابطه (۱۰) در این است که به جای برابر قرار دادن عملکرد نسبی با مجموع تبخیر تعلق نسبی در مراحل مختلف رشد، محصول نسبی برابر با مجموع تبخیر تعلق نسبی محصول‌های زیر کشت در گام زمانی مورد نظر است. به بیان دیگر، در رابطه متداول، رابطه (۱۰)، محصول نسبی تحت تأثیر تبخیر تعلق نسبی و حساسیت محصول در مراحل مختلف رشد است ولی در رابطه پیشنهادی، رابطه (۱۲)، محصول نسبی تحت تأثیر تبخیر تعلق نسبی و حساسیت محصول‌های مختلف در مرحله رشد منطبق بر گام زمانی مورد نظر است.

شکل (۴) خطای ناشی از یکسان در نظر گرفتن تابع سود گام‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل $B(R)$ و $B(S)$ به ترتیب تابع سود حاصل از رهاسازی و ذخیره‌سازی هستند، i و d به ترتیب نشان دهنده تابع سود متداول و تابع سود وابسته به گام زمانی هستند. این شکل نشان می‌دهد که تابع سود وابسته به گام زمانی، رهاسازی با خطای کمتری نسبت به نیاز واقعی گام زمانی مورد نظر خواهد داشت. در این شکل محور عمودی سود حاشیه‌ای و محور افقی حجم رهاسازی است. نقطه تقاطع دو محور مختصات سود حاشیه‌ای و رهاسازی دارای مقدار صفر هستند. با توجه به محور افقی، هر مقدار آب که برای تأمین نیاز و دریافت سود در گام زمانی جاری رهاسازی نشود، برای بردن سود در گام زمانی آینده در مخزن ذخیره خواهد شد. با افزایش رهاسازی از سود حاشیه‌ای رهاسازی کاسته می‌شود و حجم ذخیره برای گام زمانی آینده کاهش می‌یابد، در نتیجه سود حاشیه‌ای حاصل از ذخیره افزایش می‌یابد. نقطه تقاطع این دو تابع سود حاشیه‌ای رهاسازی و ذخیره‌سازی در حقیقت نقطه برابری این دو تابع و مشخص کننده مقدار بهینه رهاسازی است. در شکل (۴) دیده می‌شود که تابع سود ذخیره مدل تابع یکسان محور افقی را قطع می‌کند و قبل رسیدن به نقطه بیشینه ذخیره و کمینه رهاسازی، سود حاشیه‌ای ذخیره برابر مقدار صفر می‌شود. این حالت نشان دهنده آن است که با توجه به تابع سود در نظر گرفته شده باید یک مقدار حداقل رهاسازی که فاصله بین نقطه تقاطع محورهای مختصات و تابع سود ذخیره با محور افقی است وجود داشته باشد، در غیر این صورت احتمال متحمل شدن هزینه سر ریز از مخزن در آینده وجود دارد.

کننده‌ها از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. Moghaddasi *et al.* (2010) برای تهیه تابع سود در بخش کشاورزی با جمع اثر مصرف آب بر تولید محصول نسبی در دوره‌های مختلف رشد و درآمد حاصل از مقدار تولید هر محصول، جمع تابع سود کل محصول‌های زیر کشت را بدست آوردند.

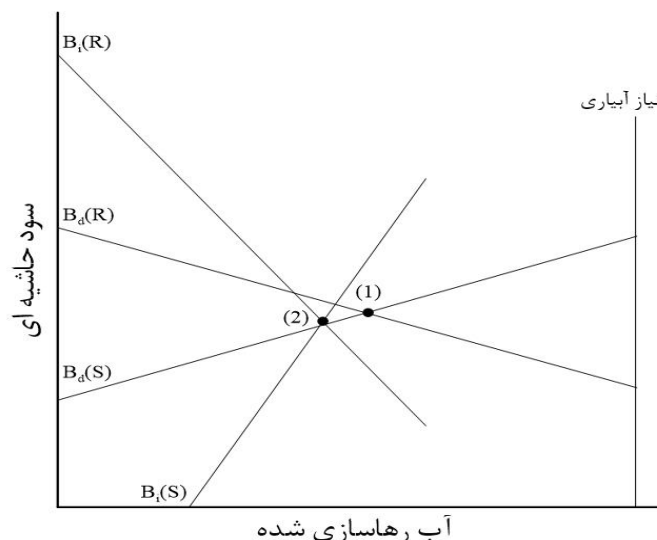
$$\text{Max: } \frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \sum_{g=1}^n ky_g \left(1 - \frac{ET_{a,g}}{ET_{m,g}} \right) \quad (\text{رابطه } 10)$$

$$\text{Max: } \sum_{k=1}^K F_k(Q_k) A_k Y_m P_k \quad (\text{رابطه } 11)$$

در رابطه (۱۰)، Y_m و Y_a به ترتیب میزان محصول تولید شده واقعی و پتانسیل تولید است، $ET_{m,g}$ و $ET_{a,g}$ به ترتیب تبخیر تعلق واقعی و پتانسیل محصول در دوره رشد g است. ky_g ضریب حساسیت گیاه در دوره رشد g و n تعداد دوره‌های رشد است. و در رابطه (۱۱)، $F_k(Q_k)$ ، تابع تولید محصول k در برابر حجم آب مصرف شده Q_k را نشان می‌دهد. K تعداد کل محصول‌ها و همچنین A_k و P_k به ترتیب سطح زیر کشت و قیمت واحد جرم محصول k را نشان می‌دهند. با استفاده از این دو رابطه، تابع سود بخش کشاورزی را تهیه کردند. با استفاده از این روش، اثر کمبود آب در زمان‌های مختلف سال نادیده گرفته شده است و یک تابع سود ثابت برای کل سال وجود دارد. با استفاده از این رابطه سود حاشیه‌ای در کل دوره رشد محصول یکسان خواهد بود و تفاوت اثر تنش آبی در گام‌های زمانی مختلف دیده نمی‌شود. (Karamouz and Araghejad 2008) با توجه به این که بیشینه سود در شرایط تأمین کل نیاز بدست می‌آید و خسارت‌های ناشی از کمبود در دوره‌های خشکسالی، دو تابع سود برای دو شرایط اقلیمی استفاده کردند. مسئله‌ای که باعث پیچیدگی بیشتر تابع سود بخش کشاورزی می‌شود این است که در گام‌های زمانی مختلف محصول‌های مختلفی زیر کشت هستند و هر یک از این محصول‌ها در دوره رشد و حساسیت مختلفی نسبت به تنش کم آبی قرار دارند و عدم در نظر گرفتن حساسیت محصول می‌تواند موجب خطا در تصمیم‌گیری در شرایط کمبود آب شود. در این مطالعه به منظور در نظر قرار دادن این مسئله، به جای تهیه تابع سود برای هر محصول و جمع توابع سود کل محصول‌های زیر کشت برای بخش کشاورزی، تابع سود برای هر گام زمانی تهیه شده است. از این رو رابطه (۱۰) تنها برای دوره رشدی که گام زمانی مورد نظر در آن قرار دارد حل می‌شود.

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{k=1}^C ky_k \left(1 - \frac{ET_{a,k}}{ET_{m,k}} \right) \quad (\text{رابطه } 12)$$

با قرار دادن مقادیر مختلف برای تبخیر تعلق واقعی، مقادیر



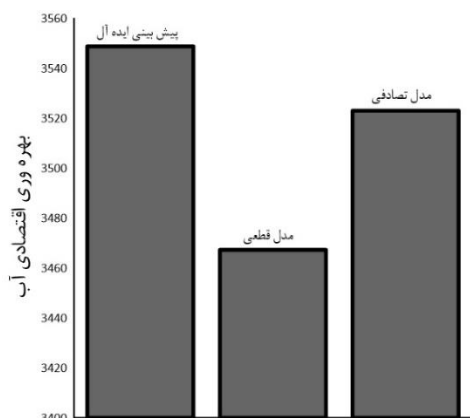
شکل ۴- تعادل توابع سود و ذخیره گام زمانی نمونه

حساسیت گیاه در گام‌های زمانی مختلف در برآورد آب مورد نیاز، دارای خطای بیشتری نسبت به تابع سود وابسته به گام زمانی خواهد بود. در هر دو مدل تابع سود یکسان و تابع سود وابسته به گام زمانی، به دلیل جریان ورودی زیاد در گام‌های زمانی ماه‌های فروردین و اردیبهشت، قوانین نگهداشت بی‌اثر بوده است و آب مورد نیاز به طور کامل تأمین شده است. بررسی نتایج حاکی از آن است که مقدار خطای استفاده از توابع یکسان در مراحل حساس رشد بیشتر می‌شود. به عنوان مثال با مقایسه دو ماه خرداد و تیر که محصول و سطح زیر کشت یکسان است، مقدار خطای این مدل در برآورد آب مورد نیاز تیر ماه که نسبت به ماه خرداد محصولات در دوره حساس تر رشد قرار دارند بیشتر است.

جدول (۲) حجم آب رهاسازی توسط دو نوع تابع سود متداول و تابع پیشنهادی و نیاز آبی ماه‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تابع سود وابسته به محصول در همه گام‌های زمانی دچار کم برآوردی شده است و علت آن عدم اطلاع از نیاز واقعی است که باعث خطا شده است. مدل توابع یکسان از دو نوع تابع سود استفاده می‌کند که یکی برای نیمه اول سال و دیگری برای نیمه دوم سال تهیه شده است. این مدل به ۲۴ درصد کم برآوردی در آب مورد نیاز است که مدیریت بهره‌برداری را گرفتار خطا خواهد کرد. همچنین نتایج این جدول مصرف آب بدست آمده حاصل از بهره‌برداری با روش استاندارد موجود در مقابل فرمان‌های نگهداشت، در شرایط مصرف آب سالانه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد تابع سود بدون در نظر گرفتن

جدول ۲- حجم رهاسازی (متر مکعب) و سود اقتصادی بدست آمده (ریال) برای گام‌های زمانی مختلف توسط توابع وابسته به محصول، وابسته به گام زمانی و

گام‌های زمانی	رهاسازی تابع وابسته به گام زمانی	رهاسازی تابع متداول	رهاسازی مدل بهره‌برداری موجود	نیاز آبی
مهر	۱۰۹۷۷۳۰۰	۵۴۱۱۱۰۰	۴۱۴۳۴۰	۱۱۴۶۰۲۶۴
آبان	۷۱۹۱۶۰۰	۵۲۱۴۰۰۰	۸۶۷۱۳۶۰	۷۴۴۵۰۱۰
آذر	-	-	-	-
دی	-	-	-	-
بهمن	-	-	-	-
اسفند	-	-	-	-
فروردین	۳۳۲۸۸۷۹۲	۳۳۲۸۸۷۹۲	۲۵۶۹۱۳	۳۳۱۴۹۵۰۹
اردیبهشت	۵۱۷۹۱۵۳۰	۵۱۷۹۱۵۳۰	۱۸۷۷۲۸۸۰	۵۱۶۸۶۲۸۵
خرداد	۶۰۲۷۵۴۷۰	۳۲۵۶۸۶۰۰	۳۶۴۳۱۹۷۳	۶۹۹۱۴۰۹۴
تیر	۴۱۳۲۵۴۸۰	۲۹۲۵۰۶۷۰	۳۶۰۰۹۶۶۰	۶۴۴۱۴۰۹۴
مرداد	۲۷۵۹۹۹۲۰	۱۸۲۱۲۸۱۰	۳۸۵۳۴۹۰۰	۳۱۷۳۶۶۲۲
شهریور	۲۰۶۵۶۲۳۰	۶۹۰۹۲۸۰	۲۹۷۶۳۵۲۷	۲۹۹۳۰۰۱۸
	۲۵۳۱۰۶۳۲۱	۱۸۲۶۴۶۷۸۱	۱۶۸۸۵۵۵۵۳	۲۹۹۷۸۷۳۱۴



شکل ۵- مقایسه نسبت عملکرد اقتصادی به آب مصرف شده مدل تصادفی و مدل قطعی با شرایط ایده آل اطلاع از آینده

به هر حال، استفاده و حل مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی مشکل و زمان بر خواهد بود و سوالی که به جای می‌ماند این است که ارزش استفاده از این روش‌ها چقدر خواهد بود تا بتوانیم در مسئله‌های مختلف نسبت بتوان به هم مقایسه‌ای داشته باشیم. Hubbard (2011) شاخص امید ریاضی اطلاعات کامل^۲ را قیمت و هزینه‌ای که پرداخته می‌شود تا به اطلاعات کامل دسترسی پیدا کنیم معرفی کردند. در شرایط عدم قطعیت این امکان وجود دارد که جواب بدست آمده برای مسئله کاملاً اشتباه باشد. این شاخص سعی می‌کند هزینه مورد انتظار آن عدم قطعیت را اندازه‌گیری کند که می‌تواند به عنوان ارزش مورد انتظار اطلاعات کامل (EVPI) تفسیر شود، چرا که اطلاعات کامل می‌توانند امکان تصمیم‌گیری اشتباه را حداقل از منظر نظری از بین ببرند (Claxton et al. 2002). Mirhasani and Hoshmandkhaligh (2019) شاخص (EVPI) را به صورت اختلاف هزینه‌ای که با استفاده از مدل تصادفی و پیش‌بینی ایده‌آل از شرایط آینده به سیستم متحمل می‌شود معرفی کردند و بیان کردند که این شاخص نشان دهنده میزان تأثیر کمبود اطلاعات و مقدار قابل هزینه برای بدست آوردن اطلاعات کامل است. در این مطالعه رابطه زیر که اختلاف بهره‌وری حاصل از اطلاع کامل از جریان ورودی آینده و بهره‌وری حاصل از مدل برنامه‌ریزی تصادفی است استفاده شده است.

$$EVPI = P_I - P_S \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

در این رابطه P_I بهره‌وری آب در شرایط ایده‌آل اطلاع کامل از شرایط آینده و P_S بهره‌وری حاصل از استفاده از مدل برنامه‌ریزی تصادفی است. با حل رابطه (۱۶) مشخص می‌شود مقدار حدود ۶۶۷ واحد سود اقتصادی در مصرف هر واحد آب، بدست

نتایج و بحث

مقایسه مدل قطعی و تصادفی

عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن

متغیر هیدرولوژیکی جریان ورودی مخزن دارای عدم قطعیت ذاتی است که با افزایش دخالت بشر در حوضه رودخانه و برداشت‌های غیرقانونی و پیش‌بینی نشده این عدم قطعیت را افزایش می‌دهد (Zhang et al. 2018) و نادیده گرفتن این عدم قطعیت، خطای برنامه‌ریزی را افزایش خواهد داد. در این بخش از مطالعه، مدل برنامه‌ریزی تصادفی و اثر استفاده از آن در مقابل مدل قطعی، بر نتایج حاصل از سود اقتصادی و آب مصرفی، تشریح شده است. در برنامه‌ریزی تصادفی، بر خلاف برنامه‌ریزی قطعی، نیاز است تا از تابع توزیع احتمالی داده‌های دارای عدم قطعیت بجای مقدارهای مشخص و قطعی آنها استفاده شود. در این مطالعه برای تهیه توزیع احتمال جریان ورودی به مخزن از داده‌های سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۵ استفاده شده است. آزمون نیکویی برازش در نرم افزار Minitab مناسب بودن توزیع ویبول^۱ را برای داده‌های جریان ورودی نشان داد. در مطالعه برای انتخاب توزیع آماری مناسب برای داده‌ها، توزیع آماری انتخاب می‌شود که بیشترین مقدار p -value را داشته باشد و بیشترین تعداد ماه در سطح اطمینان ۹۵ درصد از آن توزیع تبعیت کنند. بنابراین، توزیع آماری ویبول برای داده‌های سری زمانی جریان ورودی مخزن برازش داده شده است. سپس مقادیر مختلف جریان هر ماه به پنج بخش با فراوانی یکسان تقسیم شده است. هر بخش یک سناریو برای ماه مورد نظر شناخته می‌شود و شامل سناریوی خیلی خشک، خشک، متوسط، مرطوب و خیلی مرطوب است. در برنامه‌ریزی تصادفی فرمان‌های نگهداشت، عدم قطعیت موجود در جریان ورودی، تابع سود ذخیره را، با توجه به اثر آن در موجودیت آب در دسترس برای آینده، تحت تأثیر قرار خواهد داد.

با استفاده از ماتریس احتمال انتقال، احتمال هر سناریوی محتمل در گام زمانی بعدی بدست آورده می‌شود و در گام‌های زمانی آینده و پس از آن مقادیر امید ریاضی جریان ورودی گام زمانی قرار داده می‌شود. شکل (۵) بهره‌وری آب در مدل تصادفی و مدل قطعی را با شرایط ایده‌آل، اطلاع کامل از جریان ورودی در آینده، مقایسه کرده است. همانطور که در این شکل می‌توان دید، نتیجه عملکرد مدل تصادفی بسیار به شرایط ایده‌آل نزدیک و بهتر از مدل قطعی عمل کرده است.

بدست آمده از ۲۹ سال آماری استفاده کردند. این توابع سود رهاسازی بر اساس میانگین درجه حرارت هر سال بدست آمده بود. (Belsnes *et al.* (2016) با استفاده از مفهوم زنجیره مارکوف و ماتریس احتمال انتقال در بهره‌برداری زمان واقعی مخزن برای سیستم برق-آبی به بررسی اثر وارد کردن عدم قطعیت موجود در جریان ورودی مخزن و نیاز پرداختند.

در این بخش مطالعه برای وارد کردن عدم قطعیت آب مورد نیاز، با استفاده از سناریوهای مختلف تبخیر تعرق در هر گام زمانی، توابع سود رهاسازی حاصل از آن‌ها بدست آمده است. در این بخش مقدار جریان ورودی به مخزن قطعی فرض شده است. سپس با استفاده از زنجیره مارکوف و ماتریس احتمال انتقال مدل سازی عدم قطعیت انجام شده است. برای مدل سازی برنامه‌ریزی تصادفی از داده‌های تبخیر تعرق سال‌های آماری ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۵ استفاده شده است و با داده‌های مربوط به سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ نتایج مورد آزمون قرار داده شد. در بهره‌برداری مخزن با فرمان‌های نگهداشت، تابع سود ذخیره تحت تأثیر تابع سود رهاسازی در گام زمانی آینده است. از این رو هر سناریوی تابع سود رهاسازی با سه سناریوی تابع سود ذخیره روبرو خواهد شد که نه سناریوی رهاسازی را تشکیل می‌دهد. جدول (۳) مقادیر ارزش مورد انتظار اطلاعات کامل و ارزش جواب تصادفی را برای برنامه‌ریزی تصادفی برای دو شرایط عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن با فرض قطعی بودن نیاز و عدم قطعیت آب مورد نیاز با فرض قطعی بودن جریان ورودی مورد مقایسه قرار داده است.

آوردن اطلاعات بیشتر از جریان ورودی آینده ارزش هزینه کردن دارد که برابر حدود دو درصد سود کل سیستم خواهد بود. یک شاخص مفید دیگر ارزش جواب تصادفی^۱ است که نشان می‌دهد، نادیده گرفتن عدم قطعیت چه هزینه‌ای را به سیستم تحمیل می‌کند.

$$VSS = P_S - P_D \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

P_D سود اقتصادی نسبت به آب مصرف شده حاصل از بهره‌برداری با استفاده از مدل قطعی است. شاخص ارزش جواب تصادفی ۳۱۱ واحد سود در مصرف هر واحد آب را خواهد داشت و این مقدار حدود یک درصد سود کل سیستم خواهد بود.

عدم قطعیت آب مورد نیاز

در این بخش اثر وارد کردن عدم قطعیت آب مورد نیاز در محاسبات مدل برنامه‌ریزی تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است. عدم قطعیت آب مورد نیاز آبیاری ناشی از عدم قطعیت شرایط آب و هوایی است. شرایط مختلف تبخیر باعث تغییر در تابع تولید محصول می‌شود. از تابع تولید محصول (رابطه ۱۲) مشخص است که تغییر تبخیر تعرق بیشینه، ET_m ، در تولید محصول نسبی تأثیر خواهد داشت. در سال‌های مختلف مقدار تبخیر تعرق بیشینه ثابت نخواهد بود و تغییرات آن توأم با یک عدم قطعیت ذاتی است. (Moghaddasi *et al.* (2010) برای در نظر گرفتن عدم قطعیت آب مورد نیاز آبیاری، از ۲۹ سناریوی مختلف تابع سود رهاسازی

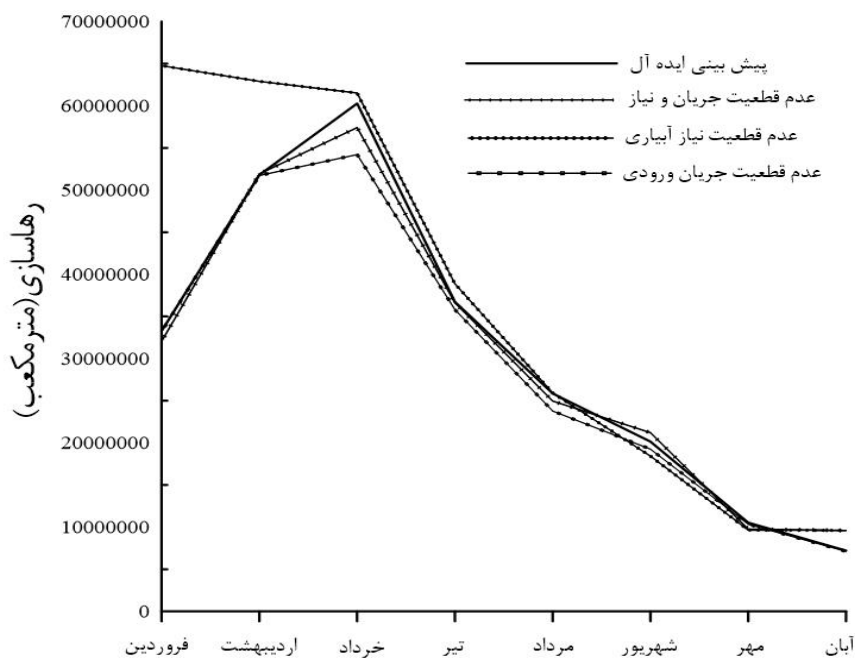
جدول ۳- مقایسه شاخص‌های ارزش مورد انتظار اطلاعات کامل و ارزش جواب تصادفی مدل برنامه‌ریزی تصادفی

VSS	EVPI	شاخص‌ها
۳۱۱	۶۶۷	عدم قطعیت در جریان ورودی مخزن
۱۴۵۲	۳۸۶۴	عدم قطعیت در آب مورد نیاز
۴۱۲۶	۴۰۸۹	عدم قطعیت در جریان ورودی مخزن و آب مورد نیاز

(2016) به بررسی و مقایسه وارد کردن هر دو عدم قطعیت جریان آب ورودی به مخزن و قیمت فروش برق در بهره‌برداری سیستم برق آبی پرداختند. نتایج مطالعه این محققین بر خلاف مطالعه پیش رو ارزشمندی بیشتر وارد کردن عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن را نسبت به عدم قطعیت نیاز نشان می‌دهد. در واقع قیمت فروش تابع غیر خطی از نیاز به برق بوده است. با افزایش مصرف برق در نقاط بیشینه مصرف قیمت برق هم متناسب با آن افزایش پیدا می‌کند. این نتیجه حاکی از آن است که اگر چه نیاز و قیمت فروش برق در سیستم برق-آبی می‌تواند متأثر از شرایط

نتایج این جدول نشان می‌دهد که ارزش مدل سازی عدم قطعیت آب مورد نیاز چهار برابر ارزش مدل سازی عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن است. (Moghaddasi *et al.* (2010) در مطالعه بهره‌برداری با استفاده از فرمان‌های نگهداشت ارزشمند بودن وارد کردن عدم قطعیت در آب مورد نیاز آبیاری با فرض قطعی بودن جریان ورودی به مخزن را نشان دادند. مطالعات دیگری همچون You and Cai (2008a) و Zhao *et al.* (2011) به بررسی ارزش وارد کردن عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن با فرض قطعی بودن آب مورد نیاز پرداختند. Belsnes *et al.*

جواب تصادفی در جدول (۳) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد مدل تصادفی با در نظر گرفتن توأمان عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن و آب مورد نیاز، شاخص امید ریاضی اطلاعات کامل را نسبت به مدل تصادفی با عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن و آب مورد نیاز به صورت جداگانه به ترتیب ۵/۵ و ۸۳/۷ درصد افزایش می‌دهد. همچنین این مدل شاخص ارزش جواب تصادفی را نسبت به مدل عدم قطعیت جریان ورودی و آب مورد نیاز به ترتیب ۶۴/۸ و ۹۲/۴ درصد افزایش می‌دهد. شکل (۶) نتایج رهاسازی در گاه‌های زمانی مختلف توسط سه مدل برنامه‌ریزی تصادفی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های جریان ورودی به مخزن و آب مورد نیاز آبیاری به صورت جداگانه و توأمان را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نتایج رهاسازی سه حالت مختلف ورود عدم قطعیت در محاسبات

زمانی خطای زیادی را بدنبال خواهد داشت. از طرف دیگر در رهاسازی ماه خرداد که گام زمانی آینده آن ماه تیر است و هر دو دارای اختلاف و عدم قطعیت زیاد در آب مورد نیاز هستند، مدل تصادفی با در نظر گرفتن عدم قطعیت آب مورد نیاز نتایج ارزشمندی را ارائه می‌کند. نتایج رهاسازی بدست آمده از این مدل تصادفی بسیار نزدیک به شرایط ایده‌آل است. مسئله دیگری که در این نمودار دیده می‌شود اختلاف مدل ایده‌آل با هر سه مدل تصادفی در ماه شهریور است. این اختلاف به دلیل محقق شدن یک سناریوی نیاز با احتمال کم بوده است که مربوط به دوره امتحان مدل می‌شود (سال آبی ۹۵-۹۶) و از سالی به سال دیگر این نتیجه می‌تواند متفاوت باشد.

آب و هوایی و درجه حرارت هوا باشد، ولی نسبت به عدم قطعیت تبخیر تعرق و آب مورد نیاز آبیاری دارای عدم قطعیت کمتری قابل پیش‌بینی‌تر است. این نتیجه با مطالعه Plamer *et al.* (1995) هم که بیان کردند که عدم قطعیت در آب مورد نیاز آبیاری بیش از دیگر عدم قطعیت‌ها است همخوانی دارد.

عدم قطعیت توأمان جریان ورودی به مخزن و آب مورد نیاز
در این بخش عدم قطعیت جریان ورودی مخزن و آب مورد نیاز آبیاری به صورت توأمان وارد محاسبات شده است. برای هر یک از پنج سناریوی جریان ورودی در هر ماه نه سناریوی نیاز وجود دارد که منجر به تشکیل ۴۵ سناریوی محتمل برای رهاسازی در هر ماه شده است. شاخص‌های امید ریاضی اطلاعات کامل و ارزش

نتایج موجود در این نمودار نشان می‌دهد همانطور که Belsnes *et al.* (2016) اشاره کردند نمی‌توان بیان کرد که در نظر گرفتن عدم قطعیت کدام متغیر، جریان ورودی و یا آب مورد نیاز، دارای اهمیت بیشتری است، این به مطالعه موردی مربوط است. نتایج نشان می‌دهند که در ماه فروردین که جریان ورودی به مخزن دارای اختلاف^۱ و عدم قطعیت بیشتری در مقدار است، مدل تصادفی با وارد کردن این عدم قطعیت نسبت به مدل تصادفی با عدم قطعیت در آب مورد نیاز نتایج بهتری خواهد داشت. نتایج مدل تصادفی با عدم قطعیت در جریان ورودی به مخزن در این ماه بسیار نزدیک به شرایط ایده‌آل اطلاع کامل از آینده است، در صورتی که در نظر گرفتن عدم قطعیت آب مورد نیاز در این گام

بحث و نتیجه‌گیری

برای بهره‌برداری بهینه از مخزن بوکان مطالعات مختلفی در گذشته انجام شده است. (Amerian *et al.* (2003). برای بهبود کارایی مخزن بوکان از مدل برنامه‌ریزی پویا با تابع هدف کمینه کردن کمبود تخصیص به بخش کشاورزی استفاده کردند. Zareabyaneh *et al.* (2017) برای استخراج منحنی فرمان مخزن بوکان مدل خطی و غیر خطی را مورد مقایسه قرار دادند که نتایج حاکی از بهتر بودن مدل خطی بود. (Emami and Koch (2017). بهره‌برداری از مخزن بوکان پرداختند. (Emami and Koch (2019) به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روی بهره‌برداری از مخزن بوکان پرداختند. (Gavahi *et al.* (2019) اثرات مدل پیش بینی جریان بر روی بهره‌برداری بهینه از مخزن را مورد بررسی قرار دادند. به هر حال، هیچ یک از مطالعات انجام شده بر روی مخزن بوکان عدم قطعیت همزمان جریان ورودی و آب مورد نیاز را در محاسبات لحاظ نکرده اند.

در این مطالعه یک روش تحلیلی حل فرمان‌های نگهداشت برای بهره‌برداری از مخزن سد بوکان پیشنهاد شده است. در این مدل بهره‌برداری از مخزن، رهاسازی از مخزن در هر گام زمانی تحت تأثیر تابع سود حاصل از رهاسازی، مقدار جریان آورد به مخزن و آب مورد نیاز قرار دارد. به دلیل متفاوت بودن ضریب حساسیت محصول در دوره‌های مختلف رشد، مقدار تولید محصول در برابر هر واحد مصرف آب، بهره‌وری آب، و همچنین هزینه و زیان حاصل از کمبود آب متفاوت خواهد بود. در این مطالعه برای وارد کردن اثر حساسیت محصول در بهره‌برداری مخزن، از توابع سود مختلف برای گام‌های زمانی مختلف استفاده شده است و متفاوت بود اثر کمبود آب در گام‌های زمانی مختلف از این طریق وارد محاسبات شده است و به گام‌های زمانی حساس تر اولویت بیشتری داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این مدل تحلیلی استفاده از فرمان‌های نگهداشت با تابع سود وابسته به گام زمانی ۴۶/۸ درصد سود اقتصادی را نسبت به مدل بهره‌برداری موجود مخزن بوکان افزایش می‌دهد و همچنین مدل

پیشنهادی، ۱۹ درصد سود اقتصادی را نسبت به مدل بهره‌برداری از مخزن با استفاده از فرمان نگهداشت با تابع سود ثابت افزایش می‌دهد. متغیرهای جریان ورودی به مخزن و آب مورد نیاز دارای عدم قطعیت ذاتی هستند. هدف دیگر این مطالعه بررسی اثر وارد کردن این عدم قطعیت‌ها در محاسبات بوده است. برای این منظور از یک مدل تصادفی فرمان‌های نگهداشت استفاده شده و نتایج توسط شاخص‌های EVPI و VSS مورد مقایسه قرار داده شده است. مطالعه اثر عدم قطعیت متغیرهای جریان ورودی و آب مورد نیاز در سه حالت انجام شد. حالت اول جریان ورودی به عنوان یک متغیر تصادفی و متغیر آب مورد نیاز قطعی در نظر گرفته شده است. مدل تصادفی ۰/۷۳ درصد سود اقتصادی را نسبت به مدل قطعی افزایش داده است. حالت دوم جریان ورودی را متغیر قطعی و آب مورد نیاز را متغیر تصادفی در نظر گرفته است. مدل تصادفی در این حالت ۴/۹۵ درصد بهتر از مدل قطعی عمل کرده است. و حالت سوم هر دو متغیر جریان و آب مورد نیاز را متغیر تصادفی در نظر می‌گیرد. در حالت سوم و وارد کردن هر دو عدم قطعیت در محاسبات، مدل تصادفی سود اقتصادی را ۱۲/۹۹ درصد نسبت به مدل قطعی افزایش داده است.

در مطالعه حاضر عدم قطعیت در یک گام زمانی در آینده در محاسبات وارد شده است و به دلیل افزایش چشمگیر تعداد سناریوی موجود، عدم قطعیت در افق زمانی محاسبه تابع سود ذخیره در محاسبات وارد نشده است. امید است که در آینده بتوان با روش‌های کاهش سناریو، سناریوهای همه این گام‌های زمانی در نظر گرفته شود. همچنین تخمین ماتریس احتمال انتقال در مدل سازی تصادفی از اهمیت بالایی برخوردار است (Meira-Machado *et al.* 2012) و بررسی روش‌های به روز و جدید تر ممکن است بتواند نتایج بهتری را به دنبال داشته باشد. در نهایت مدل تصادفی فرمان‌های نگهداشت پیشنهاد شده برای مخازن دیگر نیز امتحان شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Aasgård, E. K., Bolkesjø, T. H., Johnsen, R. I., Kristiansen, F., Larsen, T. J., Riddervold, H. O., ... & Skjelbred, H. I. (2015). Validating the SHARM model. SINTEF energy research. Postboks 4761 sluppen. No 7465. Trondheim, Norway. TR A7521- Unrestricted.
- Amerian, M., Mohammadi, K. and Eslami, H. R. (2003). Optimal operation model of Buchan dam reservoir by dynamic programming method (artificial neural network), the first national conference of hydropower plants, Tehran, Iran Water and Power Resources Development Company. (In Farsi)
- Belsnes, M. M., Wolfgang, O., Follestad, T., & Aasgård, E. K. (2016). Applying successive linear programming for stochastic short-term hydropower optimization. *Electric Power Systems Research, 130*, 167-180.
- Bzorg haddad, O. (2014). Optimization of water resources systems, University of Tehran Publishing Institute, Publication No. 3561, Second Edition, 412 pages. (In Farsi)
- Claxton, K., Sculpher, M., & Drummond, M. (2002). A rational framework for decision making by the National Institute for Clinical Excellence (NICE). *The Lancet, 360*(9334), 711-715.
- Draper, A. J., & Lund, J. R. (2004). Optimal hedging

- and carryover storage value. *Journal of water resources planning and management*, 130(1), 83-87.
- Emami, F., & Koch, M. (2017). Evaluating the water resources and operation of the Boukan Dam in Iran under climate change. *Eur. Water*, 59, 17-24.
- Emami, F., & Koch, M. (2019). Modeling the impact of climate change on water availability in the Zarrine River Basin and inflow to the Boukan Dam, Iran. *Climate*, 7(4), 51.
- Gavahi, K., Mousavi, S. J., and Ponnambalam, K. (2018). Comparison of Two Streamflow Forecast Approaches in an Adaptive Optimal Reservoir Operation Model.
- Gavahi, K., Mousavi, S. J., & Ponnambalam, K. (2019). Adaptive forecast-based real-time optimal reservoir operations: application to Lake Urmia. *Journal of Hydroinformatics*, 21(5), 908-924.
- Hubbard, D. (2011). How to Measure Anything: Finding the Value of "Intangibles" in Business. *People and Strategy*, 34(2), 58.
- Karamouz, M., & Araghinejad, S. (2008). Drought mitigation through long-term operation of reservoirs: case study. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(4), 471-478.
- Lindo Systems Inc. (2003). Optimization modeling with LINGO. USA Makridakis S, Wheelwright SC, Hyndman RJ (1998) Forecasting: methods and applications, 3rd edn. Wiley, New York
- Meira-Machado, L., de Uña-Álvarez, J., and Somnath, D. (2012). Conditional transition probabilities in a non-markov illness-death model. *Discussion Papers in Statistics and Operation Research*, 12(05).
- Men, B., Wu, Z., Liu, H., Li, Y., & Zhao, Y. (2019). Research on Hedging Rules Based on Water Supply Priority and Benefit Loss of Water Shortage—A Case Study of Tianjin, China. *Water*, 11(4), 778.
- Mirhasani, S. A. and Hoshmandkhaligh, F. (2019). Stochastic programming. Published by Amir Kabir University (polytechnic). 305-307. (In Farsi)
- Moghaddasi, M., Araghinejad, S., & Morid, S. (2010). Long-term operation of irrigation dams considering variable demands: Case study of Zayandeh-rud reservoir, Iran. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 136(5), 309-316.
- Neelakantan, T. R., & Pundarikanthan, N. V. (1999). Hedging rule optimisation for water supply reservoirs system. *Water resources management*, 13(6), 409-426.
- Palmer, R. N., Kersnar, J. M., and Choi, D., _1995_. "Estimating demand variability." *Proc., 22nd Annual ASCE Conf., Integrated Water Resources Planning for the 21st Century*, Water Resources Planning and Management Division of ASCE, Reston, Va.
- Seo, S. B., Kim, Y. O., & Kang, S. U. (2019). Time-Varying Discrete Hedging Rules for Drought Contingency Plan Considering Long-Range Dependency in Streamflow. *Water Resources Management*, 33(8), 2791-2807.
- Sreekanth, J., Datta, B., & Mohapatra, P. K. (2012). Optimal short-term reservoir operation with integrated long-term goals. *Water resources management*, 26(10), 2833-2850.
- Shiau, J. T., & Lee, H. C. (2005). Derivation of optimal hedging rules for a water-supply reservoir through compromise programming. *Water resources management*, 19(2), 111-132.
- Shih, J. S., & ReVelle, C. (1995). Water supply operations during drought: A discrete hedging rule. *European journal of operational research*, 82(1), 163-175.
- Shih, J. S., & ReVelle, C. (1994). Water-supply operations during drought: Continuous hedging rule. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(5), 613-629.
- Tu, M. Y., Hsu, N. S., & Yeh, W. W. G. (2003). Optimization of reservoir management and operation with hedging rules. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(2), 86-97.
- Tu, M. Y., Hsu, N. S., Tsai, F. T. C., & Yeh, W. W. G. (2008). Optimization of hedging rules for reservoir operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(1), 3-13.
- Wan, W., Zhao, J., & Wang, J. (2019). Revisiting Water Supply Rule Curves with Hedging Theory for Climate Change Adaptation. *Sustainability*, 11(7), 1827.
- Yeh, W. W. G. (1985). Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Water resources research*, 21(12), 1797-1818.
- You, J. Y., & Cai, X. (2008a). Hedging rule for reservoir operations: 1. A theoretical analysis. *Water Resources Research*, 44(1).
- You, J. Y., & Cai, X. (2008b). Hedging rule for reservoir operations: 2. A numerical model. *Water resources research*, 44(1).
- Zareabyaneh, H., Abdolazadeh, B. and Palangi, S. (2017). Development of control curves for reservoir operation of Buchan and Mahabad dams with PSO algorithm. *Irrigation and Water Engineering of Iran* 8 (2). (In Farsi)
- Zhang, Z., Zhang, Q., Singh, V. P., and Shi, P. (2018). River flow modelling: comparison of performance and evaluation of uncertainty using data-driven models and conceptual hydrological model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(9), 2667-2682.
- Zhao, T., Cai, X., and Yang, D. (2011). Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation. *Advances in water resources*, 34(4), 495-504.