فصلنامه علوم محیطی، دوره پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶

۱۹۹-۲۱۶

مدیریت منابع آب در سد تبارک‌آباد قوچان: کاربرد چندجمله‌ای‌های متعامد برای حل مسائل برنامه‌ریزی تصادفی پویا

سعید عظیمی‌فرد*، حمید محمدی، محمود صبوحی صابونی و سامان ضیایی

گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۲۲

عظیمی فرد، س.، محمدی، ح.، صبوحی صابونی، م. و س. ضیایی. ۱۳۹۶. مدیریت منابع آب در سد تبارک آباد قوچان: کاربرد چندجمله ای های متعامد برای حل مسئله برنامه ریزی تصادفی پویا. فصلنامه علوم محیطی. ۱۵(۲): ۲۲۰-۲۰۱.

سابقه و هدف: عدم استفاده کارآمد از آب به‌عنوان یک نهاده تولید باعث شده است که مقدار قابل‌توجهی از این نهاده که با هزینه‌های زیاد تأمین و استحصال‌شده، هدر رود. اغلب استان‌های کشور چندین دهه است که با بحران آب روبه‌رو هستند. علائم بحران آب از اوایل دهه ۱۳۵۰ در بعضی از دشت‌های استان خراسان نیز مشاهده شد و در دهه اخیر به دلیل عدم مدیریت صحیح منابع آب، این بحران تشدید شده است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با رویکردی پویا، به بررسی مدیریت منابع آب در سد تبارک‌آباد شهرستان قوچان می‌پردازد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از یک روش آسان کاربرد برای حل مسائل برنامه‌ریزی پویای تصادفی در نرم‌افزار Gams استفاده‌شده است. این روش با استفاده از چندجمله‌ای‌های متعامد، که برای حل مسائل تقریب مفید هستند، و با استفاده از تکرار محاسبات در افق بی‌نهایت، به ویژگی‌های یک چندجمله‌ای استاندارد همگرا خواهد شد. این روش با استفاده از نمونه موردی سد تبارک‌آباد قوچان شرح داده‌شده است. برای این منظور، داده‌های مربوط به سد تبارک‌آباد، برای سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۸۶ از طریق سامانه ملی اطلاعاتی سدهای کشور جمع‌آوری شد. همچنین، داده‌های مربوط به تخمین تابع تقاضای آب کشاورزی در شهرستان قوچان، از طریق پرسش‌نامه هزینه تولید سازمان جهاد کشاورزی به دست آمد.

نتایج و بحث: بر اساس نتایج به‌دست‌آمده و با مقایسه مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده برای مخزن سد (متغیر حالت) و رهاسازی آب (متغیر کنترل)، مشخص می‌شود که شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با روش چندجمله‌ای متعامد چی‌بی‌شف، با تقریب مناسبی انجام‌شده است. درنهایت بر اساس نتایج، ارزش حال خالص آب تخصیصی به کشاورزی در سد تبارک‌آباد در دوره موردبررسی برابر با ۱۴۷۱۲۰۵ ریال بوده و آب تخصیصی نیز معادل ۲۴/۷۴۵ میلیون مترمکعب در سال اندازه‌گیری شده است.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و تقریب مناسب مقادیر شبیه‌سازی‌شده، می‌توان از روش پیشنهادی این پژوهش برای حل مسائل برنامه‌ریزی تصادفی پویا، به‌ویژه درزمینه مدیریت منابع آب، بهره برد. همچنین، با استفاده از مقدار آب تخصیصی سالانه، و با توجه به سایر محدودیت‌های زراعی منطقه، می‌توان الگوی کشت مناسبی جهت استفاده پایدار از آب کشاورزی برای سال‌های آتی در زمین‌های تحت پوشش سد تبارک‌آباد ارائه داد.

* Corresponding Author. *E-mail Address*: s.azimifard65@gmail.com

Archive of SID

www.SID.ir

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی پویا، صرفه‌جویی محاسباتی، تئوری تقریب، مدیریت منابع آب.

مقدمه

قرار گرفتن ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک باعث شده که در بسیاری از مناطق کشور آب کافی برای انجام فعالیت‌های کشاورزی وجود نداشته باشد و آب به‌عنوان مهم‌ترین و محدودکننده‌ترین نهاده تولیدی در اغلب مناطق کشاورزی ایران خودنمائی کند. ایران در منطقه خاورمیانه واقع‌شده که ۲۰ کشور این منطقه با داشتن ۵ درصد جمعیت جهان، تنها به یک درصد آب جهان دسترسی دارند. میانگین میزان بارندگی در کشور ۲۴۰ میلی‌متر، یعنی یک‌سوم متوسط بارندگی جهان است. کل مقدار بارندگی در سطح کشور در حدود ۴۰۰ میلیارد مترمکعب آب است که با توزیع جغرافیایی و زمانی غیریکنواختی نازل می‌شود، به‌طوری‌که ۳۱۰ میلیارد مترمکعب (بیش از ۷۷ درصد) آن در مناطق کوهستانی و تنها ۹۰ میلیارد مترمکعب آن در دشت‌ها می‌بارد. از این میزان نزولات حدود ۲۸۶ میلیارد مترمکعب به‌صورت تبخیر و تعرق در سطح زمین ازدست‌رفته و مانده آن حدود ۱۱۴ میلیارد مترمکعب در سال است که حدود ۲۰ میلیارد مترمکعب موجب تغذیه طبیعی سفره‌های زیرزمینی شده و ۹۴ میلیارد مترمکعب در سال به‌صورت جریان‌های سطحی درمی‌آید (Anonymous, 2011).

اغلب استان‌های کشور چندین دهه است که با بحران آب روبه‌رو هستند. علائم بحران آب از اوایل دهه ۱۳۵۰ در بعضی از دشت‌های استان خراسان از طریق افت مستمر سطح آب زیرزمینی، که در هیدرو گراف واحد آب‌خانه‌های آن‌ها نمود یافته بود، مشاهده شد. مدیریت کارآمد، حکم می‌کرد که پس از مشاهده بحران، اقداماتی اساسی در جهت مهار افت سطح آب زیرزمینی، در کوتاه‌مدت صورت گیرد و در بلندمدت، تمهیداتی پیرامون تقویت پتانسیل آبی و تعادل بخشی این دشت‌ها، از طریق کاهش آبدهی چاه‌ها، جلوگیری از اضافه برداشت و یا تغذیه مصنوعی آب‌خانه و غیره به عمل آید. ولی چون این قبیل اقدامات، به‌طورجدی صورت نگرفته است، درنتیجه در سال‌های بعد، تعداد بیشتری از دشت‌ها نیز به سرنوشت دشت‌های مزبور گرفتار آمدند و به‌این‌ترتیب بحران آب تمامی استان را تا اواخر دهه ۱۳۶۰ فراگرفت و ادامه یافت (Velayati, 2013).

قوچان یکی از شهرستان‌های استان خراسان رضوی است که در شمال این استان و در فاصله ۱۳۰ کیلومتری از مرکز استان واقع‌شده است. کل آب قابل استحصال از منابع زیرزمینی و سطحی در شهرستان قوچان ۰/۱۸۵۶ میلیارد مترمکعب است که از این میزان ۰/۱۴۲۷ میلیارد مترمکعب سالانه از منابع آب زیرزمینی تخلیه می‌شود.

در شهرستان قوچان، برداشت‌های غیرمجاز، عدم تخصیص مناسب آب سد تبارک و بهره‌وری پایین آب در بخش کشاورزی از دلایل عمده مشکلات آب کشاورزی در این شهرستان بوده به‌طوری‌که در حال حاضر بسیاری از روستاهای این شهرستان با مشکل کم‌آبی مواجه هستند (Anonymous, 2012).

از منابع تأمین آب کشاورزی در شهرستان قوچان سد تبارک‌آباد است که در فاصله ۳۰ کیلومتری شهر قوچان و در روستایی با همین نام واقع‌شده است. این سد از نوع سنگ‌ریزه‌ای با هسته رسی با ارتفاع ۷۴ متر است. طول تاج ۱۹۳/۵ متر و نوع سرریز آن سرسره‌ای با ظرفیت مخزن ۶۰ میلیون مترمکعب، حجم خاک‌برداری ۸۷۰ هزار مترمکعب، حجم خاک‌ریزی ۱۳۰۰ هزار مترمکعب و حجم بتن‌ریزی ۴۷ هزار مترمکعب است. ساخت این سد در سال ۱۳۸۳ به پایان رسیده و در ۲۱ بهمن ۱۳۸۳ مورد بهره‌برداری قرارگرفته است (Anonymous, 2016).

Archive of SID
www.SID.ir

آب رهاشده از سد تبارک‌آباد در روستاهای پایین‌دست که شامل ۲۵ روستا با ۳۴۲۸ هکتار سطح زیر کشت آبی، ۱۵۱۴۵ هکتار سطح زیر کشت دیم و ۷۲۲ هکتار سطح زیر کشت باغات هستند، توسط ۴۱ گره به‌منظور استفاده کشاورزی و شرب تقسیم می‌شود.

باوجود موارد استفاده بسیار زیاد مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی، این‌گونه مسائل به‌نحوی‌که از ابتدا انتظار می‌رفت در حل مسائل منابع طبیعی به‌طور گسترده به کار گرفته نشده است. در دهه شصت میلادی، Burt and Allison (1963) پیش‌بینی کرده بودند که برنامه‌ریزی تصادفی یکی از ابزارهای استاندارد برای حل مسائل کشاورزی و منابع طبیعی خواهد شد. پس از گذشت پنج دهه، هنوز تعداد نسبتاً کمی از مطالعات مدیریت منابع اقتصادی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی پویا، به‌عنوان یک ابزار تحلیلی به انجام رسیده است. شاید یک دلیلش این باشد که روش‌های محاسباتی برای این نوع از مسائل برنامه‌ریزی به‌طور گسترده در دسترس نیست.

در این پژوهش از روشی برای حل مسائل برنامه‌ریزی تصادفی پویا استفاده‌شده است که در نرم‌افزار Gams نیز قابل‌استفاده بوده و برای محاسبات الگوریتمی با استفاده از تئوری تقریب بسیار کارا و قدرتمند است.

فلسفه اصلی این روش حداقل کردن مراحل محاسباتی موردنیاز برای ارزیابی نقطه گسست است. در عوض، در این روش از محاسبات روش‌های تقریب اقتصادی (Judd, 1998)، برای تعیین توابع ارزش پیوسته استفاده می‌شود که استفاده از توابع غیرخطی را نسبت به دو دهه اخیر افزایش می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، در این روش به‌جای روش‌های تکرار گذشته از روش تکرار ارزشی برای به دست آوردن تابع ارزش معادله Bellman استفاده می‌کند که به‌مراتب سریع‌تر هستند(Judd *et al.*, 1976 ; Burt, 1994). Miranda and Fackler (2009) از روشی ابداعی استفاده کردند که از معیارهای پیوسته برای متغیر حالت استفاده می‌کرد به‌طوری‌که یک‌فاصله گسسته برای متغیرهای کنترل ایجاد می‌کرد. آن‌ها این روش را برای اجتناب از تکرار محاسبات توابع اصلی در تقریب‌های چندجمله‌ای تابع ارزش استفاده می‌کردند و با این روش قادر بودند ماهیت خطی محاسبات را حفظ کنند و در نرم‌افزارهای MATLAB و GAUSS به حل مسائل بپردازند. در مقابل، روش مورداستفاده در این پژوهش هر دو متغیر کنترل و حالت را به‌صورت پیوسته (ولی مقید) در نظر می‌گیرد و با استفاده از روش‌های غیرخطی در Gams (که اجازه تکرار سریع محاسبات را در تقریب‌های چندجمله‌ای می‌دهد) حل می‌کند. روش تکرار ارزش، سریع همگرا می‌شود و در مورد مطالعات منابع طبیعی، محقق را قادر می‌سازد که از متغیرهای کنترل و حالت به‌صورت پیوسته استفاده کند که دامنه وسیع‌تری از سیاست‌ها و مسائل منابع طبیعی را در برمی‌گیرد.

این روش برگرفته از Betty Crocker است و هرکسی را قادر می‌سازد که به‌راحتی از روش‌های حل مسائل برنامه‌ریزی تصادفی پویا استفاده کند.

این روش قادر است کلیه محاسبات مربوط به روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی‌های تصادفی و سایر مسائل برنامه‌ریزی را در افق‌های محدود و بی‌نهایت حل کند. در تمامی موارد، مفروضات اقتصاد خردی بر مدل حاکم است:

تابع ارزش در متغیرهای حالت و کنترل پیوسته است.

تابع ارزش در متغیرهای حالت و کنترل مقعر است.

تصمیم‌گیرنده، مجموع ارزش‌های تنزیل شده انتظاری را بهینه می‌کند.

استفاده از زنجیره مارکوف در پویاسازی مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی، امری مرسوم است که در بررسی‌های دیگری نیز کاربرد داشته است. Najafi and Khalilian(2014)، از این زنجیره برای تخصیص بهینه آب سد لتیان در طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۲ و با استفاده

Archive of SID
www.SID.ir

از برنامه‌ریزی تصادفی پویا بهره برده‌اند. آنان باهدف حداکثر کردن مازاد رفاه مصرف‌کننده از تقاضای آب شهری و کشاورزی به این نتیجه رسیدند که آب بهینه برای کشاورزی و مصرف شهری به ترتیب برابر با ۲۲۰/۷۰۴ و ۳۸۳/۵۶۱ میلیون مترمکعب است و مقدار آب تخصیص‌یافته به کشاورزی باید افزایش یابد.

مدل برنامه‌ریزی پویای تصادفی گسسته نیز یکی از روش‌های موسوم در مدیریت منابع آب است. Anyata *et al*. (2014) از این مدل برای برنامه‌ریزی استفاده هم‌زمان از آب و آب‌های زیرزمینی منابع سطحی برای حال و آینده تقاضای آب در دانشگاه بنین، شهر بنین، استان ادو در نیجریه استفاده کردند. آنان که این مدل را برای پیش‌بینی تقاضا، مصرف و سود خالص از مصرف توأم از دو منبع ایجاد کرده بودند به این نتیجه رسیدند که در حدود m^3 ۵۲۰۰۰ آب می‌تواند در هرروز با استفاده هم‌زمان از منابع سطحی و زیرزمینی عرضه شود. این مقدار ۳۲۵۰۰ مترمکعب در روز بالاتر از تقاضای روزانه در حال حاضر بود و می‌توانست تقاضا تا سال ۲۰۲۳ را برآورده کند. سود خالص در استفاده از روش چندمرحله‌ای حدود ۱/۷ برابر بیشتر از استفاده از هر دو منابع به‌صورت مجزا به دست آمد. این مطلب گواهی بر اهمیت استفاده از برنامه‌ریزی پویای تصادفی در مدیریت منابع آب است.

با توجه به مشکل عمده بسیاری از محققان علاقه‌مند به استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی پویا در اجرای عملیاتی این مدل، یک بسته نرم‌افزاری به نام SDP-GAMS، برای تسهیل حل مشکل برنامه‌نویسی پویا تصادفی توسعه داده‌شده است. این بسته نرم‌افزاری سیاست‌های مطلوب، منافع مطلوب و تصمیم‌گیری‌های بهینه در پاسخ به جریان خاص سری زمانی و تقاضاها را به دست می‌آورد. Velazquez و Sorribes(2016) بهینه‌سازی آب اقتصادی تحت عدم قطعیت جریان را با استفاده از این ابزار بهینه‌سازی بررسی کردند. آنان که مدیریت منابع آب در حوضه رودخانه Mijare (اسپانیا) با دو مخزن و چهار تقاضای اصلی را با استفاده از زنجیره مارکوف و یک طبقه ۹۱ شبکه‌ای گسسته با دو مخزن بررسی می‌کردند، به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش مدل‌سازی SDP آب-اقتصادی برای دست آوردن سیاست‌های مطلوب با در نظر گرفتن عدم قطعیت جریان، می‌تواند به بهبود در بهره‌وری از سیستم‌های منابع آب منجر شود. یکی دیگر از کاربردهای برنامه‌ریزی پویای تصادفی درزمینه کشاورزی مربوط به تعیین الگوی کشت است که در پژوهش حاضر نیز از این کاربرد استفاده خواهد شد. Gakpo *et al*. (2005) با استفاده از الگوی کشت یونجه-ذرت- گندم و با بهره‌گیری از مدل SYM-DY-SYM (شبیه‌سازی-برنامه‌ریزی پویا-شبیه‌سازی) نشان دادند که تولید نهایی‌های ایجادشده توسط مدل برنامه‌ریزی تصادفی پویا بیشتر از سایر مدل‌های مرسوم مانند برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی مثبت در ارائه الگوی کشت است که این مهم نشان‌دهنده کاربرد مؤثر SDP در طراحی الگوی کشت است.

با توجه به اهمیت مدیریت منابع آب، تاکنون مدل‌های متنوعی برای برنامه‌ریزی کردن استفاده بهینه از این منابع طراحی‌شده‌اند. دراین‌بین، مدل فازی یکی از دقیق‌ترین مدل‌های ارائه‌شده درزمینه مدیریت منابع آب است. هرچند مدل SDP از عملکرد بهتری نسبت به مدل فازی در این زمینه برخوردار است (Varaiya, 2013). مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای نادقیق نیز یکی از روش‌های پرکاربرد برای مدیریت منابع آب است که اشکال اصلی آن ساده‌سازی بیش‌ازحد فروض توابع عضویت فازی است هرچند که این مدل نسبت به مدل تک‌مرحله‌ای نتایج واقعی‌تری را برای مدیریت منابع آب ارائه می‌دهد (Huang, 2010). همچنین، کاربرد برنامه‌ریزی تصادفی درجه‌دو خطی برای مدیریت منابع آب توسط Ertunga *et al*. (1997) در سد Tenkiller در حوضه رودخانه ایلینوی در اوکلاهاما ارائه شد. در پژوهش وی، حفاظت از حجم در سیستم مخزن، حداقل و حداکثر

Archive of SID
www.SID.ir

حد مجاز برای آزادی آب و سطح مخزن به‌عنوان محدودیت‌های سیستم و جریان آب از حوضه زهکشی مخزن، بارش و تبخیر به‌عنوان متغیرهای ورودی تصادفی در نظر گرفته شدند. نتایج تحقیق وی نشان‌دهنده مزیت برنامه‌ریزی تصادفی نسبت به برنامه‌ریزی قطعی در مدیریت منابع آب بود.

علاوه بر زنجیره مارکوف در پویاسازی مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی، الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی[1] (RLS) نیز کاربرد مشابهی را دارا است. به‌طوری‌که اضافه کردن RLS به مدل می‌تواند در تصادفی کردن متغیرها به‌ویژه در مورد متغیر بارندگی نتایج دقیق‌تری ارائه دهد (Sastri, 2007).

در مطالعات داخلی نیز محققان بسیاری برای بهینه‌سازی استفاده از منابع آب تلاش کرده‌اند به‌طوری‌که مدل بهره‌برداری بهینه از مخزن سد لار توسط Rastegaripour and Karbasi(2014) با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی نادقیق پنج مرحله‌ای، مدل بهره‌برداری از مخزن سد ارس با استفاده از برنامه‌ریزی پویا به‌وسیله مؤمنی و Momeni and Rezaee (2008)، مدیریت منابع آب زیرزمینی در دشت نریمانی استان خراسان توسط Sabouhi *et al.* (2007)، مدیریت سد بارزو شیروان از طریق تخصیص بهینه آب بین اراضی زیر سد توسط Chizari and Keramatzadeh (2005) و بهینه‌سازی توزیع آب در سیستم ۹ مخزنی حوضه آبریز رودخانه کلامرز میانه توسط Sattari *et al.*(2002) به انجام رسیدند و به نتایج تقریباً مشابهی دست یافتند.

بر اساس نتایج بررسی‌های داخلی در زمینه مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی تصادفی نادقیق پنج مرحله‌ای که از ترکیب دو برنامه‌ریزی پویا و نادقیق در چارچوب بهینه‌سازی تصادفی تشکیل‌شده است، نتایجی به‌مراتب واقعی‌تر و دقیق‌تر نسبت به برنامه‌ریزی قطعی و ایستا ارائه می‌دهد (Rastegaripour and Karbasi, 2015). همچنین، مدل تصادفی، مقدار آب در دسترس بیشتری را در اکثر ماه‌های مختلف برای تأمین مصارف کشاورزی و برق‌آبی در اختیار کشاورزان می‌گذارد، بنابراین مدل تصادفی نسبت به سایر مدل‌ها برای مدیریت منابع آب مناسب‌تر است (Momeni and Ziaei, 2009). در مقایسه دو روش برنامه‌ریزی غیرخطی و پویای استوکاستیکی در مدیریت منابع آب، روش برنامه‌ریزی پویای استوکاستیکی (تصادفی) نتایج بهتری ارائه می‌دهد و مقدار آب استفاده‌شده در این روش کمتر است (Ghahreman and sepaskhah, 2006). همچنین، تدوین مدل بهینه‌سازی خطی با محدودیت تصادفی برای تعیین حجم بهینه مخزن سد و توسعه اراضی سطح زیر کشت در مزارع پایین‌دست نتایج مطلوب‌تری نسبت به برنامه‌ریزی خطی با محدودیت‌های قطعی ارائه خواهد داد (Sattari, 2003).

با توجه به مطالب فوق، در این پژوهش از روش برنامه‌ریزی تصادفی پویا استفاده خواهد شد، زیرا باوجود دقت بیشتر مدل‌های فازی، مدل SDP از عملکرد بهتری در زمینه مدیریت منابع آب برخوردار است و همچنین در ارائه الگوی کشت موفق‌تر از سایر مدل‌های برنامه‌ریزی مانند برنامه‌ریزی مثبت عمل کرده است (Veinott, 2008).

مواد و روش‌ها

رویکرد تکرار ارزش

در این رویکرد، یک تقریب عددی برای افق بی‌نهایت تابع ارزش به دست می‌آید که ارزش تصمیماتی که تصمیم‌گیرنده در آینده خواهد گرفت را در زمان حال حداکثر می‌کند.

برای یک تابع هدف عمومی $f(x_t, u_t)$ و یک معادله حرکت برای متغیر حالت به‌صورت $x_{t+1}= g(x_t, u_t)$، می‌توان معادله بلمن را به‌صورت زیر نوشت:

(۱)

$$V(x_t) = \max_u \{f(x_t, u_t) + \beta . V(x_{t+1}) | x_{t+1} = g(x_t, u_t)\}$$

Archive of SID
www.SID.ir

که در رابطه فوق، $f(x_t, u_t)$ نشان‌دهنده تابع هدف و $x_{t+1} = g(x_t, u_t)$ معادله حرکت برای متغیر وضعیت است. فرآیند حل معادله فوق تکرار تابع هدف در دوره زمانی برای رسیدن به حالت بهینه است. به‌عبارت‌دیگر، در اینجا هدف به دست آوردن یک تقریب چندجمله‌ای از یک تابع هدف ناشناخته است، به‌طوری‌که توابع هدف میانی که با استفاده از نرخ تنزیل به دوره بعد منتقل می‌شوند، تابع هدف نهایی را تشکیل داده و حداکثر می‌شود. این رابطه، نقشه‌برداری است که به‌وسیله $V^{s+1}=TV^s$ نشان داده‌شده است. که در اینجا T نشان‌دهنده یک نقشه‌برداری است که با توجه به‌تقریب s= 0,1,…..,S تولیدشده و به یک حالت پایدار مانند V=TV همگرا می‌شود (Veinott, 2008). در اینجا دو فرض اساسی وجود دارد:

هر تابعی با استفاده از چندجمله‌ای از درجه کافی می‌تواند تقریب بخورد.

تابع در طی تعداد محدودی از تکرار پیدا می‌شود.

اثبات فرض دوم در تئوری به کار برده‌شده در n مرحله توسط Stokey و Lucus به همراه Prescott در سال ۱۹۸۸ ارائه‌شده است.

نوع تقریبی که در این حالت انتخاب می‌شود از نوع چندجمله‌ای چی‌بی‌شف است. این چندجمله‌ای از نوع متعامد بوده که توسط Judd (1989) استفاده‌شده است. این تقریب به‌صورت:

$$V(x) = \sum_i \alpha_i \emptyset_i(M(x)) \qquad (۲)$$

است که در آن α_i ضریب چندجمله‌ای i ام $\emptyset_i(M(x))$ است و به‌صورت فاصله بین نقشه‌برداری‌ها $\hat{x} = M(x)$ تعریف می‌شود که در چندجمله‌ای چی‌بی‌شف بین منفی یک و مثبت یک است. چندجمله‌ای چی‌بی‌شف به‌صورت سینوسی بوده و برای n امین جمله به‌صورت:

$$Q_n(\hat{x}) = \cos(n.\cos^{-1}(\hat{x})) \qquad (۳)$$

است، که به‌صورت رابطه عطفی شمارشی زیر تعریف می‌شود:

(۴)

$$\emptyset_1(\hat{x}) = 1$$

$$\emptyset_2(\hat{x}) = \hat{x}$$

$$\emptyset_3(\hat{x}) = 2\hat{x}\emptyset_2(\hat{x}) - \emptyset_1(\hat{x})$$

$$\emptyset_n(\hat{x}) = 2\hat{x}\emptyset_{n-1}(\hat{x}) - \emptyset_{n-2}(\hat{x})$$

بر اساس بررسی‌های Judd، الگوریتمی که برای به دست آوردن یک تقریب مناسب از تابع هدف V(x) به ازای $x \in [a\ \ b]$ ساخته می‌شود، می‌تواند به‌صورت فرآیند زیر باشد که درنهایت رگرسیون چی‌بی‌شف به دست می‌آید:

گره‌هایی که در تقریب تابع هدف استفاده می‌شوند از رابطه زیر به دست می‌آیند:

(۵)

$$\hat{x}_k = -\cos\left(\frac{2k-1}{m}.\pi\right) \ \epsilon[-1\ \ +1] \quad \text{for } k = 1, \dots, m \quad \text{where } m \geq n+1$$

با حل معادله بلمن به ازای هر گره m، مقدار حداکثر تابع هدف:

(۶)

$$V^{(j)}(x_k) = \max_{x_k^+}\{f(x_k, g^{-1}(x_k, x_k^+) + \beta.V^{j-1}(x_k^+)\}$$

به دست آورده می‌شود، که در آن x_k^+ ارزش متغیر وضعیت در دوره بعد است، به‌شرط اینکه در گره k به حداکثر مقدار خود رسیده باشد و V^{j-1} نیز تقریبی از تابع هدف است (تکرار صفر با یک مقدار فرضی صورت می‌گیرد). و رابطه تبدیل x به x_k نیز به‌صورت $x_k = (\hat{x}_k + 1)\left(\frac{b-a}{2}\right)$ است. مقدار ضریب چندجمله‌ای برای تکرار j در رگرسیون برابر با:

$$a_i^{(j)} = \frac{\sum_{k=1}^m V^{(j)}(x_k)\emptyset_i(\hat{x}_k)}{\sum_{k=1}^m \emptyset_i(\hat{x}_k)\emptyset_i(\hat{x}_k)} \qquad (۷)$$

بوده که با آن می‌توان تابع هدف جدید را به‌صورت:

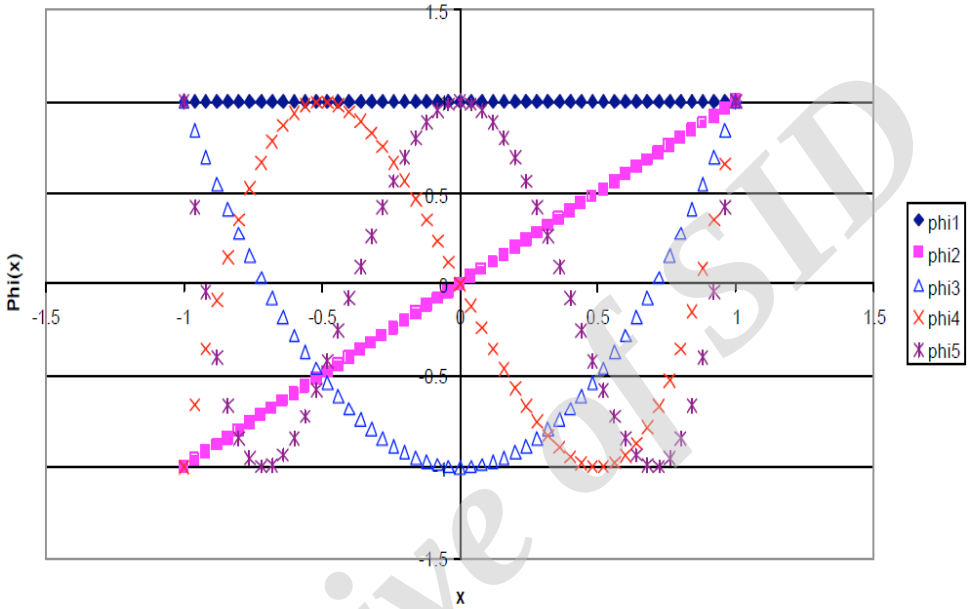
Archive of SID
www.SID.ir

$$V^{(j)}(x) = \sum a_i^{(j)} \emptyset_i \left(2.\frac{x-a}{x-b} - 1\right) \quad (۸)$$

به دست آورده و در تکرار بعدی معادله بلمن استفاده کرد (Veinott, 2008).

این فرآیند تا جایی تکرار می‌شود که ضریب چندجمله‌ای به یک عدد مشخصی همگرا شود، یعنی مجموع مربعات $\|(a^{(j)} - a^{(j-1)})\|^2$، که در هر تکرار محاسبه می‌شود از حد مجاز خطا (ε) کمتر باشد، $\|(a^{(j)} - a^{(j-1)})\|^2 \leq \varepsilon$.

شکل ۱، پنج جمله از چندجمله‌ای چی‌بی‌شف را در دامنه خودش نشان می‌دهد. این شکل ماهیت متعامد چندجمله‌ای چی‌بی‌شف را به‌وضوح نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار چندجمله‌ای چی‌بی‌شف در دامنه خودش

Fig. 1- Graph of the Chebychev Polynomial Terms over its Domain

لازم به ذکر است که تابع در دامنه (۱و۱-) تعریف‌شده است.

بر اساس مباحث Judd، الگوریتم به دست آوردن تقریب تابع ارزش V(x) (برای هر $x \in [a, b]$) به‌صورت زیر به دست می‌آید.

نقاطی که تقریب تابع ارزش در آن ارزیابی می‌شود عبارت است از:

$$\hat{x}_k = -\cos\left(\frac{2k-1}{2m}.\pi\right) \in (-1,1) \text{for } k = 1, \dots, m \quad \text{where } m \geq n+1 \quad (۹)$$

معادله بلمن برای هر یک از m نقطه تداخل حل می‌شود و مقادیر حداکثر شده توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V^{(j)}(x_k) = \max_{x_k^+}\{f(x_k, g^{-1}(x_k, x_k^+)) + \beta V^{(j-1)}(x_k^+)\} \quad (۱۰)$$

که در آن x_k^+ مقدار متغیر حالت در دوره بعدی است که از حداکثر سازی گره k به‌دست‌آمده، و $V^{(j-1)}$ تقریب تابع هدف از تکرار قبلی است (در تکرار صفر با یک حدس اولیه شروع‌شده است). مسیر $\hat{x}$ به x از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x_k = (\hat{x}_k + 1)\left[\frac{b-a}{2}\right] \quad (۱۱)$$

مقدار ضریب چندجمله‌ای برای تکرار j در رگرسیون برابر با:

Archive of SID
www.SID.ir

$$a_i^{(j)} = \frac{\sum_{k=1}^{m} V^{(j)}(x_k)\emptyset_i(\hat{x}_k)}{\sum^{m} \emptyset_i(\hat{x}_k)\emptyset_i(\hat{x}_k)} \qquad (۱۲)$$

بوده که با آن می‌توان تابع هدف جدید را به‌صورت $V^{(j)}(x) = \sum a_i^{(j)}\emptyset_i\left(2.\frac{x-a}{x-b} - 1\right)$ به دست آورده و در تکرار بعدی معادله بلمن استفاده کرد (Veinott, 2008).

این فرآیند تا جایی تکرار می‌شود که ضریب چندجمله‌ای به یک عدد مشخصی همگرا شود، و مجموع مربعات $\left\|(a^{(j)} - a^{(j-1)})\right\|^2$، که در هر تکرار محاسبه می‌شود از حد مجاز خطا (ε) کمتر باشد، $\left\|(a^{(j)} - a^{(j-1)})\right\|^2 \leq \varepsilon$.

فرمول کلی برنامه‌ریزی تصادفی پویا

X بردار متغیرهای حالت را نشان می‌دهد، u یک بردار از متغیرهای کنترل است و $\tilde{e}$ یک بردار از رویدادهای تصادفی است که بر متغیر حالت، تابع هدف و یا هر دو تأثیر می‌گذارد. به‌صورت پیش‌فرض، توزیع بردار تصادفی مشخص است. یک فرم کلی SDP متناهی به‌صورت زیر است:

$$\max_u V(u, X, \tilde{e}) \qquad (۱۳)$$

$$\text{s.t} \quad X_{t+1} = g(X_t, u_t, \tilde{e}_t)$$

$$u_t \in \psi(X_t, \tilde{e}_t), \quad X \in \Omega$$

تابع هدف تصمیم‌گیرنده این است که مجموعه‌ای از متغیرهای کنترل $\{u_1^*, \ldots\ldots, u_T^*\}$ را پیدا کند که تابع هدف فوق را تحت سایر محدودیت‌ها حداکثر کند. تابع هدف می‌تواند به‌صورت مجموع تنزیل شده سود یا مطلوبیت باشد.

معادله حرکت درواقع حالت پویای منبع را نشان می‌دهد. در هر زمان، سطح متغیر حالت، تابعی از سطح متغیر حالت در دوره قبل، متغیر کنترل و متغیر تصادفی است. مسئله با محدودیت‌های ممکن محدودشده است. مجموعه ψ محدودیت‌های ممکن برای متغیر کنترل را با توجه به سطح متغیرهای حالت و تصادفی نشان می‌دهد. این محدودیت‌ها ممکن است مربوط به محدودیت‌های فیزیکی یا فنی باشد. مجموعه Ω محدودیت‌های ممکن متغیر حالت را نشان می‌دهد.

این شکل از SDP بیشتر مسائل مربوط به منابع طبیعی را در برمی‌گیرد. مسائل مدیریت منابع طبیعی می‌تواند با مسائل مرسوم اقتصاد خردی در زمینه نواقص بازار کاملاً متفاوت باشد. نواقص بازار ریشه در معادله حرکت تصادفی برای منابع مربوطه دارد. عدم قطعیت در منابع اقتصادی می‌تواند ناشی از پویایی‌های زیستی یا خارجی مانند آب‌وهوا، قیمت‌ها یا نهادها باشد. درحالی‌که راه‌حل SDP تنها یک رویکرد تجربی برای حل مسائل منابع است که توسط معادله حرکت پویای گسسته مشخص‌شده‌اند. استفاده غالب از SDP در مورد مسائل تخصیص آب است.

در یک مثال ساده، پویایی سیستم توسط معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$X_{t+1} = X_t + \tilde{e}_{1t} - u_t \qquad (۱۴)$$

تغییر در ذخیره منبع طبیعی باید معادل با تغییرات تصادفی($\tilde{e}_{1t}$) و استفاده از منبع (u_t) باشد.

تقاضای نهایی از خدمات منبع توسط جریان X_t که با u_t مشخص‌شده است، به دست می‌آید.

زمان‌بندی اطلاعات و کنترل‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

ابتدا، تصمیم‌گیرنده مقدار واقعی تغییر در ذخیره تصادفی بیرونی $\tilde{e}_{1t}$ و درنتیجه X_t را مشاهده می‌کند.

دوماً، تصمیم‌گیرنده متغیر کنترل u_t ، سطح برداشت یا استخراج را انتخاب می‌کند.

مقدار میانی جریان منابع توسط تابع تقاضای معکوس P(u) به دست می‌آید. مازاد خالص، W(u)، از مصرف منبع منتج می‌شود که به‌صورت زیر است:

$$W(u) = \int P(u)du \qquad (۱۵)$$

مازاد خالص از مصرف منبع یک تابع افزایشی مقعر از q است.

Archive of SID
www.SID.ir

تصمیم‌گیرنده در پی حداکثر سازی مطلوبیت با توجه به معادله حرکت و سایر محدودیت‌ها است. معادله بلمن به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\max_{u} V_t = \{W_t(u_t) + \beta E_{e1}[V_{t+1}(X_{t+1})]\} \quad (۱۶)$$

s.t.

$$X_{t+1} = X_t + \tilde{e}_{1t} - u_t$$
$$X_{t+1} \geq \underline{X}$$
$$X_{t+1} \leq \overline{X}$$
$$u_t \geq 0$$

در اینجا تخصیص منابع به‌نحوی انجام می‌گیرد که تابع هدف فوق نسبت به محدودیت‌ها، حداکثر شود. در هر دوره‌ای مازاد خالص به میزان استخراج بستگی دارد و تابع هدف، تابعی انتظاری از مازاد خالص دوره جاری است. در افق برنامه‌ریزی، بردار تصمیم بهینه از یک وضعیت به وضعیت بعدی در همه دوره‌ها ثابت است. معادله عطفی پویای تصادفی به‌صورت زیر است:

$$V_t(X_t, \tilde{e}) = \max_{u} \left\{ W_t(u_t) + \beta \left[\int V_{t+1}(X_{t+1}, \tilde{e}).\, dF_1 \right] \right\} \quad (۱۷)$$

s.t.

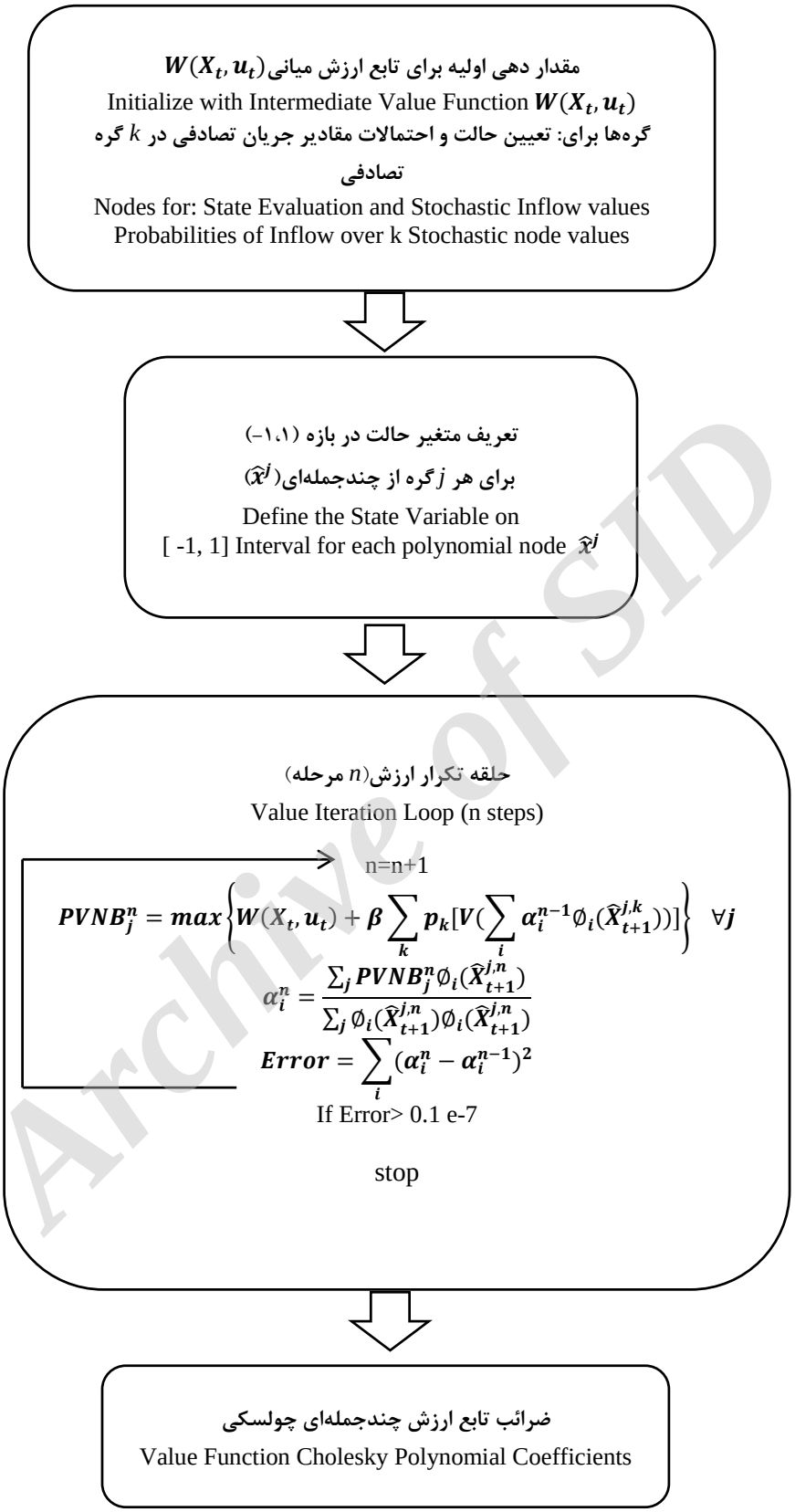
$$X_{t+1} = X_t + \tilde{e}_{1t} - u_t$$
$$X_{t+1} \geq \underline{X}$$
$$X_{t+1} \leq \overline{X}$$
$$u_t \geq 0$$

برخلاف تئوری‌های مرسوم در مورد ارزش‌گذاری تابع هدف در شرایط احتمالی و پویا، در اینجا دو نوع تقریب وجود دارد، اولی در مورد تابع هدف است و دومی اطلاعاتی است که توسط تصمیم‌گیرنده انباشته می‌شود. تقریب در مورد تابع هدف انتظاری با فرض پیوستگی آن انجام‌شده و تقریب در مورد اطلاعات تصمیم گیران با این فرض انجام می‌شود که ایشان در هر زمان مسئله کنترل تصادفی را مانند یک مسئله حلقه بسته در نظر می‌گیرند که بر اساس اطلاعات گذشته استوار است. اطلاعات راجع به متغیر وضعیت در هر دوره با توجه به تغییرات شرایط تصادفی به‌روز می‌شود. همچنین فرض می‌شود که مدل‌سازی متغیر وضعیت در مواقعی که یک مسئله تصادفی در افق زمانی محدود هست توسط یک متغیر وضعیت دوره جاری در افق زمانی نامحدود انجام می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر، در این تقریب فرض می‌شود که توانایی تصمیم‌گیرندگان در پیش‌بینی متغیر وضعیت، متغیر کنترل در دوره جاری را تغییر نمی‌دهد. این دو فرض ما را قادر می‌سازد که مسائل SDP را خیلی سریع و در یک فرایند دومرحله‌ای حل کنیم.

مرحله اول، تابع ارزش انتظاری را به‌عنوان تابعی پیوسته از متغیر حالت در بازه زمانی بی‌نهایت حل می‌کند. ما از روش تکرار ارزش برای حل جمله برگشتی دوم (تابع ارزش متغیر حالت) در معادله (۱۷) برای یک مجموعه از مقادیر انتخاب‌شده از متغیر حالت، استفاده کردیم. روش تکرار ارزش شامل در نظر گرفتن یک مقدار اولیه دلخواه برای تابع ارزش و سپس حل برگشتی مسئله حداکثر سازی تا زمان رسیدن به یک تابع ثابت که در طول زمان تغییر نمی‌کند، است. در رویکرد ما، همچنین یک تقریب چندجمله‌ای پیوسته بر روی تابع ارزش در مجموعه مقادیر متغیر حالت، در هر تکرار در نظر گرفته‌شده است. این تقریب، همگرایی تابع ارزش را تضمین می‌کند.

Bellman پیشنهاد می‌کند که می‌توان با تقریب تابع ارزش به‌صورت یک چندجمله‌ای در بازه مربوطه بر مشقت ابعاد فائق آمد. این رویکرد برای محققانی که مسائل برنامه‌ریزی پویای گسسته را حل می‌کنند، مفید است، زیرا چالش‌های عددی انتگرال‌های چندبعدی و تقریب تابع ارزش را به همراه خواهد داشت (Keane and Wolpin, 2004).

Archive of SID
www.SID.ir

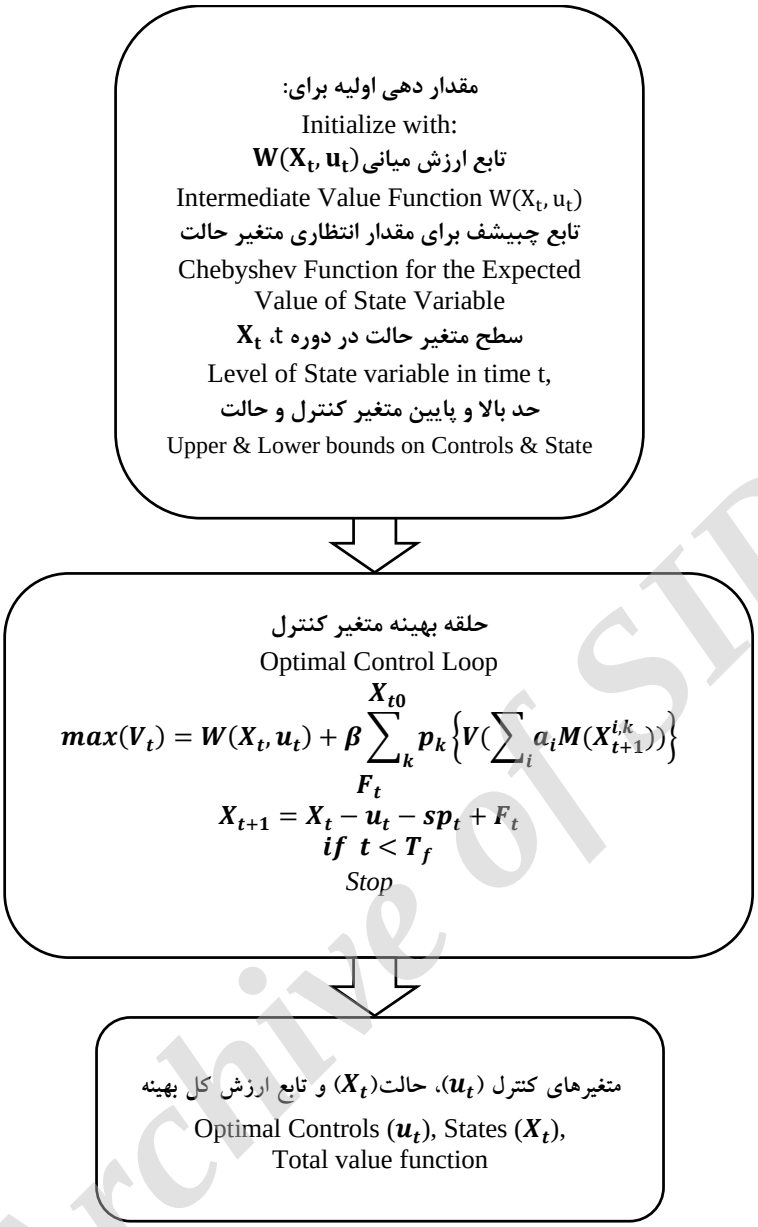


شکل ۲- حل تابع ارزش انتظاری (مرحله اول)

Fig. 2- Solving expected value function (first step)

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳- حل مدل (مرحله دوم)

Fig. 3- Solving the model (second stage)

مزیت دوم تقریب چندجمله‌ای این است که از تقریب‌های گسسته موردنیاز فرآیند مارکوف اجتناب می‌کند. اما، مزیت عملیاتی مهم داشتن یک تابع پیوسته برای تابع ارزش انتظاری این است که این راه‌حل به‌راحتی به یک برنامه‌ریزی غیرخطی بدل می‌شود. با فرض اینکه تابع هدف (رابطه ۱۷) در متغیر کنترل مقعر است، مسئله NLP به‌طور پی‌درپی در فضای پیوسته، اما محدود، متغیر کنترل و حالت حل می‌شود. به‌وضوح، تابع ارزش انتظاری در یک مجموعه نقاط گسسته در فضای حالت تقریب می‌خورد. ما از تقریب چی‌بی‌شف تابع ارزش برای این کار استفاده می‌کنیم.

در مرحله دوم، ما با مقادیر پایدار متغیر حالت برای پارامترهای چی‌بی‌شف که در مقیاس بازه مربوطه در فضای حالت در قسمت اول قرار دارند، شروع می‌کنیم. این راه‌حل با مقداردهی اولیه برای متغیر حالت و هر اختلال که در طول دوره زمانی اول مشاهده‌شده، شروع

Archive of SID
www.SID.ir

می‌شود. متغیر کنترل بهینه دوره اول از مسئله بهینه‌سازی غیرخطی دوره تکی به‌دست‌آمده است. راه‌حل‌ها تبادلی بین بازده کوتاه‌مدت جاری و تغییرات در مقادیر بلندمدت ذخیره انتظاری که از متغیر کنترل و معادله حرکت منتج شده، انجام می‌دهند. در پایان هر دوره زمانی، فرض می‌کنیم که تصمیم‌گیرنده مقادیر آزادسازی تصادفی برای هر دوره زمانی را مشاهده می‌کند، و مقادیر حالت انتظاری را با مقادیر واقعی به‌روزرسانی می‌کند. این به‌روزرسانی مقادیر متغیر حالت، شرایط اولیه برای NLP در دوره دوم را فراهم می‌کند.

این مسئله با استفاده از Gams و روش Conopt2 حل می‌شود ولی هر فرآیند دیگر NLP قادر به حل آن است.

نتایج و بحث

کاربرد تجربی برای مدیریت مخزن سد تبارک‌آباد قوچان

برای حل مدل مربوط به سد تبارک‌آباد، فرض می‌کنیم، X_t ذخیره آب در مخزن سد، $\tilde{F}_{1t}$ سطوح تصادفی جریان ورودی به مخزن و w_t جریان خروجی آب از مخزن است.

تغییر در ذخیره مخزن به‌علاوه جریان ورودی تصادفی بایستی برابر با جریان خروجی آب w_t و نشتی‌ها از مخزن، sp_t، باشد. نشتی‌ها، سیستم را در زمان جریان‌های زیاد متعادل می‌کنند ولی ارزش اقتصادی در مدل ندارد.

فرض می‌کنیم که جریان‌های سالانه $\tilde{F}_{1t}$ دارای توزیع log-normal هستند:

$$\tilde{F}_{1t} \quad \text{iid} \quad LN(\mu, \sigma^2) \qquad (۱۸)$$

تابع معکوس تقاضا، در یک فرم درجه‌دو ساده برای آب کشاورزی در سد تبارک به‌صورت زیر است:

$$p(w) = 39365 + 7689.8w - 526.66w^2 \qquad (۱۹)$$

تابع تقاضای آب کشاورزی با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی و تحلیل حساسیت قیمت آب استخراج‌شده است.

در الگوی به‌کاررفته در پژوهش حاضر، ۱۲ فعالیت زراعی (کشت محصولات مختلف) در نظر گرفته‌شده است. در الگو محدودیت‌هایی که در نظر گرفته‌شده و به‌صورت حداکثر و حداقل هستند، شامل قیود عمده‌ای است که در رابطه با کشت محصولات در منطقه وجود دارد. این محدودیت‌ها عبارت‌اند از : آب، کود، سم، زمین، نیروی کار و تناوب. برای تعیین الگو، ابتدا بهره‌بردار نماینده انتخاب و پس از تعیین بهره‌بردار نماینده، از بسته نرم‌افزاری LINDO استفاده شد. پس از تعیین الگو در دو حالت کالیبره و بهینه، با تغییر قیمت هر مترمکعب آب در تابع هدف، مقدار تقاضای آب در قیمت‌های مختلف در فصول مختلف برآورد شد. همچنین، فرم استفاده‌شده برای تابع تقاضا به دلیل کاهش مراحل محاسباتی، به‌صورت درجه‌دو در نظر گرفته شد (Berbel, 2010). تا بتوان از این طریق مزیت‌های روش اصلی پژوهش را به‌وضوح نشان داد.

بنابراین، تابع سود خالص برای مصرف آب به‌صورت زیر است:

$$W(w) = 39365w + 3844.9w^2 - 175.55w^3 \qquad (۲۰)$$

تابع سود خالص، یک تابع مقعر افزایشی نسبت به مصرف آب است.

حداکثر و حداقل ظرفیت سد تبارک ۶۴/۹ و

Archive of SID
www.SID.ir

۱۰/۵۴ میلیون مترمکعب است. داده‌های واقعی مربوط به رهاسازی و حجم مخزن برای دوره ۱۳۹۵-۱۳۸۶ موجود است. یک توزیع لوگ-نرمال بر روی‌داده‌ها تطبیق داده‌شده و برای تولید ۸ دسته احتمال گسسته برای مقادیر جریان آب کشاورزی، استفاده‌شده است. تصمیم‌گیرنده حداکثر کننده مجموع ارزش حال خالص انتظاری در این دوره زمانی است. تابع هدف بر اساس معادله حرکت و سایر محدودیت‌ها حداکثر می‌شود. مسئله با استفاده از فرایند NLP در نرم‌افزار Gams حل می‌شود. برنامه بهینه‌سازی تصادفی به‌صورت زیر است:

$$\max_{u} V_t = \{W_t(w_t) + \beta E_{e1}[V_{t+1}(X_{t+1})]\} \quad (۲۱)$$

s.t.

$$X_{t+1} = X_t + \tilde{F}_{1t} - w_t - sp_t$$
$$X_{t+1} \geq 10.54$$
$$X_{t+1} \leq 64.9$$
$$w_t \geq 0$$

حل مدل

متغیر حالت (ذخیره مخزن) در هفت نقطه گسسته بین ۱۰/۵۴ تا ۶۴/۹ محاسبه می‌شود.

$$V_c(X) = \sum_{i=0}^{7} a_i T_i(\hat{X}) \quad \text{where } \hat{X} = M(X) \quad (۲۲)$$

هفت درجه از تقریب چندجمله‌ای چی‌بی‌شف برای تابع ارزش به دست آمده است. این ضرایب چندجمله‌ای مکرراً توسط الگوریتم رگرسیون چی‌بی‌شف محاسبه می‌شوند.

معیار همگرایی این است که مجموع مربعات خطا بین ضرایب چندجمله‌ای در دو تکرار متوالی باید کمتر از 10^{-7} باشد. برای به‌دست آوردن بهترین تقریب، ۷ ضریب برای چندجمله‌ای چی‌بی‌شف به‌دست آورده شده تا در نهایت به بهنرین رگرسیون چی‌بی‌شف دست یابیم. این معادله با نرم-افزار Gams حل شده و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

برای ارزیابی کیفیت تطبیق مدل SDP، مقادیر بهینه مخزن و رهاسازی پیش‌بینی‌شده برای مخزن سد تبارک‌آباد در دوره تاریخی موردبررسی، با استفاده از جریان واقعی در شرایط اولیه برای هرسال بهینه‌سازی، شبیه‌سازی‌شده است. شکل ۴ و ۵، شبیه‌سازی SDP را در برابر مقادیر واقعی مخزن سد (متغیر حالت) و رهاسازی آب (متغیر کنترل) نشان می‌دهد.

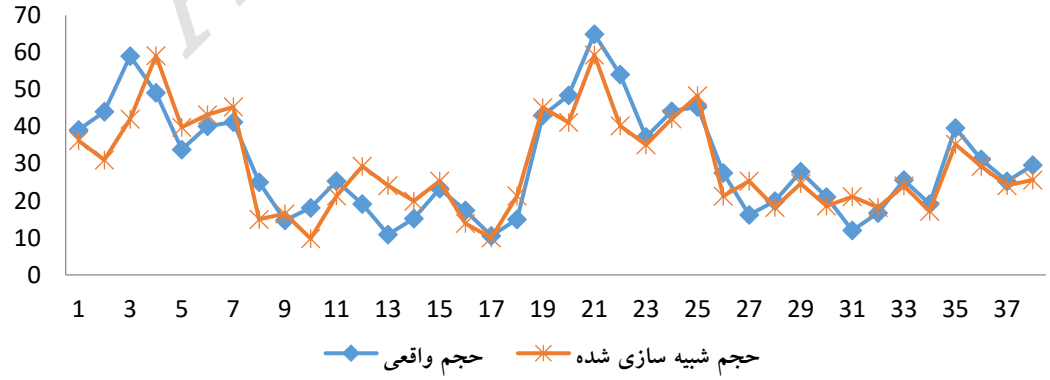
جدول۱- ضرایب چندجمله‌ای چی‌بی‌شف

Table 1. Chebyshev polynomial coefficients

1	2	3	4	5	6	7
2090.3675	53.155	-3.1195	0.17897	-0.1456	-0.01425	0.006614

Source: Research Computing

منبع: محاسبات تحقیق

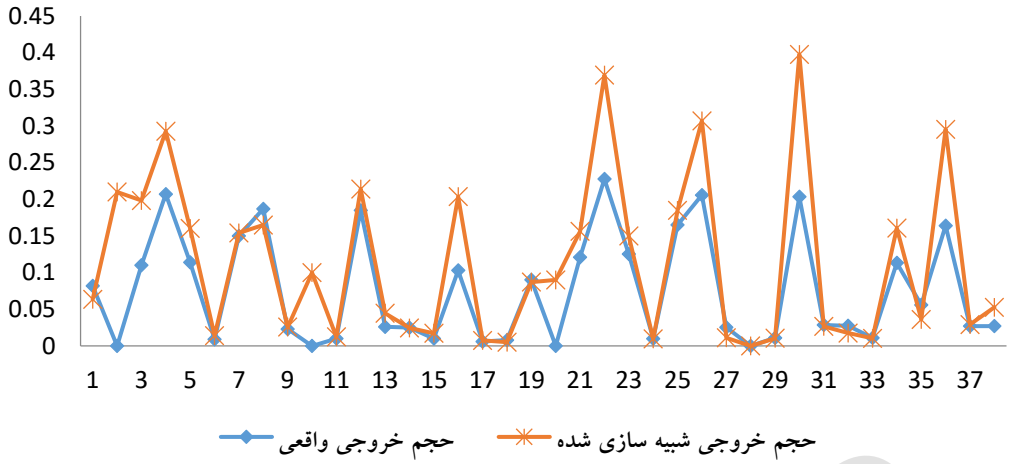


شکل ۴- مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده حجم مخزن برای ۳۸ دوره (فصل)

Fig. 4- Actual and simulated volume of the reservoir for 38 periods (season)

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۵- مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده آب رهاشده از مخزن برای ۳۸ دوره (فصل)

Fig. 5- Actual values and simulated water released from the reservoir for 38 periods (season)

جدول۲- تخصیص بهینه آب و ارزش تابع هدف

Table 2. Optimal allocation of water and the value of the objective function

حالات گسسته Discrete states	جریان آب تصادفی Stochastic Water flow	ارزش حال خالص (۱۰ ریال) Net Present Value (10 Rials)	احتمال P-Value	ارزش تابع هدف (۱۰ ریال) The value of the objective function (10 Rials)	آب تخصیصی سالانه Annual allocation water
1	0.5787	147130.5	0.3245	134592.4	24.745
2	0.6709		0.2280	139775.7	
3	0.7779		0.1666	146658.1	
4	0.9020		0.1403	159241.25	
5	1.0458		0.0614	187365.1	
6	1.2120		0.0175	212568.2	
7	1.4060		0.0087	225489.2	
8	1.6302		0.0526	341584.7	

منبع: محاسبات تحقیق

Source: Research Computing

با مقایسه مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده برای متغیر حالت و کنترل، مشخص می‌شود که شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با روش چندجمله‌ای متعامد چی‌بی‌شف، با تقریب مناسبی انجام‌شده است. بنابراین، از مقادیر شبیه‌سازی‌شده برای حل مدل SDP استفاده می‌شود که نتایج آن در جدول ۲ ارائه‌شده است.

نتیجه‌گیری

در مدیریت منابع آب، عدم قطعیت می‌تواند جنگ تخصیص آب بین بخش‌های شهری، کشاورزی و صنعتی را تشدید کند. از این‌رو، در این پژوهش، تخصیص بهینه آب برای بخش کشاورزی با استفاده از مدل SDP در سد تبارک‌آباد در دوره ۱۳۹۵-۱۳۸۶ موردبررسی قرار گرفت. SDP یک روش غالب برای حل مسائل تصادفی گسسته است. بر اساس نتایج مدل SDP با استفاده از روش چندجمله‌ای متعامد چی‌بی‌شف، ارزش حال خالص آب تخصیصی به کشاورزی در سد تبارک‌آباد قوچان در دوره موردبررسی برابر با ۱۴۷۱۲۰۵ ریال بوده که بر این اساس آب تخصیصی نیز معادل ۲۴/۷۴۵ میلیون مترمکعب در سال اندازه‌گیری شده است. بنابراین پیشنهاد می‌گردد با استفاده از این مقدار آب تخصیصی سالانه، و با توجه به سایر محدودیت‌های زراعی منطقه، الگوی کشت مناسبی برای استفاده پایدار از آب کشاورزی برای سال‌های آتی در زمین‌های تحت پوشش سد تبارک‌آباد ارائه شود.

Archive of SID
www.SID.ir

منابع

Anonymous, 2011. Ministry of Energy Release, Ministry of Energy publications, Iran. (in Persian). Available online at http://news.moe.gov.ir/

Anonymous, 2012. Agricultural Jihad Report of Quchan City, General Directorate of Agriculture Jihad in Quchan, Iran. (in Persian). Available online at http://koaj.ir/RContent/1IE7D7A.

Anonymous, 2013. Annual Report of Regional Water Company of Khorasan Razavi Province, Regional Water Company of Khorasan Razavi Province, Iran. (in Persian). Available online at http://www.khrw.ir/SC.php?type=static&id=157

Anonymous, 2016. Iran Water Resources, Iran Water Resources Management Co, Iran. (in Persian). Available online at https://www.linkedin.com/pulse.

Anyata, B.U., 2014. Application of dynamic programming in water resource management: A case of university of Benin water supply system. International Journal of Research in Engineering and Technology: 123-134.

Bellman, R., 1961. "Adaptive Control Processes: A Guided Tour", Princeton University Press, Princeton, USA.

Bertsekas, D.P., 1976. "Dynamic Programming and Stochastic Control" Academic Press, New York, USA.

Berbel, J., and Gomez-Limon, J. A., 2010. The impact of water- pricing policy in Spain: An analysis of three irrigated areas, Agricultural Water Management, 43: 22-41.

Burt, O. and Allison, J.R., 1963. "Farm Management Decisions with Dynamic Programming," Journal of Farm Economics, 45(1): 1-22.

Chizari, A. and Keramatzadeh, A., 2006. Determining Economic Value of Water with Ideal Planning Approach (Case Study: Barzoo Shirvan Dam). Economic research, 71 (2): 39-66. (in Persian).

Ertunga, C and hzelkan, G., 1997. Linear quadratic dynamic programming for water reservoir management. Systems and Industrial Engineering: 591-598.

Gakpo, J. T., 2005. Application of stochastic dynamic programming (SDP) for the optimal allocation of irrigation water under capacity sharing arrangements. Agrekon, 44(4): 436-451.

Ghahreman, B. and Sepaskhah, A., 2006. Management of dams' reservoirs. Iran Water Resources Research, 1 (2): 1-15. (in Persian).

Howitt, R.E., Reynaud, S. Msangi, and K. Knapp., 2002. Calibrated Stochastic Dynamic Models For Resource Management . Working Paper, Department of Agricultural & Resource Economics, University of California, Davis.

Huang, R. and Sargent, T.J., 2010. "Exercises in Dynamic Macroeconomic Theory," Cambridge, Mass; Harvard University Press.

Judd K L. 1998. "Numerical Methods in Economics," M.I.T Press. Cambridge.

KEANE, M.P. and WOLPIN, K.I., 1994. "The Solution and Estimation of Discrete Choice

Archive of SID

www.SID.ir

Dynamic Programming Models by Simulation and Interpolation: Monte Carlo Evidence," The Review of Economics and Statistics, 76(Nov.): 648-672.

Karbasi, A. and Rastegaripour, F., 2015. Optimal operation of Lar dam reservoir. Five-stage non-precision randomized design. Agricultural Economics Research, 6 (4): 21-37. (in Persian).

Knapp, C.K. and Olson, L.J., 1995. "The Economics of Conjunctive Groundwater management with Stochastic Surface Supplies," Journal of Environmental Economics and Management, 28(May), 340-356.

Miranda, M.J. and Fackler P.L., 2009. "Hybrid methods for Continuous State Dynamic Programming" paper # 1332 in Computing in Economics and Finance '99 from Society for Computational Economics

Momeni, M. and Rezaei, N., 2009. Operation model from Aras Dam reservoir using dynamic programming. Industrial Management Journal, 1 (1): 139-152. (in Persian).

Provencher, B., 1994. "Structural Estimation of the Stochastic Dynamic Decision Problems of Resource Users: An Application to the Timber Harvest Decision," Journal of Environmental Economics and Management, 29(Nov): 321-338. 25

Provencher, B. and Burt, O., 1994. "Approximating the optimal groundwater pumping policy in a multiaquifer stochastic conjunctive use setting," Water Resources Research, 30(Mar): 833-843.

Sastri, R.C., 2007. An Estimable Dynamic Model of recreation Behavior with an Application to Great Lakes Angling" Journal of Environmental Economics and Management, 33(2), 107-127.

Rezaei, M. and Momeni, A., 2009. Operation model of Aras Dam reservoir using dynamic planning. Journal of Industrial Management, 1 (1): 139-152. (in Persian).

Sabouhi, M., Soltani, Gh. And Zibaei, M., 2008. Evaluation of groundwater resources management practices: A case study of Narimani plain in Khorasan province. Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources), 11 (1): 475-484. (in Persian).

Sattari, M., Eslamian, S. and Abrishamchi, A., 2003. Optimization of water distribution in the multi-reservoir system of the Kilamarz Meyaneh basin. Independence, 21 (2): 197-201. (in Persian).

Varaiya, P. and. Wets R.J.B., 2013. "Stochastic Dynamic Optimization: Approaches and Computation," In Mathematical Programming: Recent Developments and Applications, (Iri & K. Tanabe, eds.), Kluwer Academic Publishers, pp.309-332.

Velayati, A., 2013. Water Resources Management in Khorasan Province. Water Management, 6 (2): 25-36. (in Persian).

Veinott, A. F., 2008. Lectures in Dynamic Programming and Stochastic Control. Department of Management Science and Engineering Stanford University Stanford, California 94305.

Velazquez, P. H., 2016. Hydro-economic optimization under inflow uncertainty using the SDP_GAMS generalized optimization tool. Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing. Water-Society Interactions: 410-416.

Archive of SID

www.SID.ir

Environmental Sciences Vol.15 / No.2 / Summer 2017

199-216

Water resource management at Tabarkabad dam in Quchan city: Using orthogonal polynomials to solve stochastic dynamic programming problems

Saeid Azimifard,* Hamid Mohammadi, Mahmoud Sabouhi Sabouni and Saman Ziaee

Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

Received: 2017.06.07 **Accepted:** 2017.09.13

Azimifard, S., Mohammadi, H. and Sabouhi Sabouni, M., 2017. Water resource management at Tabarakabad dam in Quchan city: Using orthogonal polynomials to solve stochastic dynamic programming problems. Environmental Sciences. 15(2): 201-220**.**

Introduction: The lack of efficient use of water as a production input has led to wastage of a significant amount of this input, which is financed at a great cost. Most provinces of the country have been facing water crisis for decades. Symptoms of this water crisis have been observed in some plains of Khorasan Province since the early 1970s, and this crisis has intensified in the last decade due to the lack of proper management of water resources. Therefore the present study, using a dynamic approach, studies the management of water resources in the Tabarkabad Dam in Quchan.

Materials and methods: In this paper we put forward an easy-to-implement methodology for solving deterministic or stochastic dynamic programming problems within a standard optimization package such as GAMS. We found that the use of orthogonal polynomials was especially helpful in implementing approximation methods for the iterative computation of the infinite-horizon value function, due to their superior convergence properties over standard polynomials. This method is described using the case study of Tabarkabad Dam in Quchan city. For this purpose, data related to the Tabarkabad Dam were collected through the National Dams Information System for the years 2008-2016. Also, data relating to the estimation of the agricultural water demand function in Quchan city were obtained through a questionnaire prepared by the Ministry of Jihad-e-Agriculture.

Results and discussion: Based on the results, comparing the actual and simulated values for the dam reservoir (state variable) and water release (control variable), it is determined that the simulations performed with orthogonal polynomial Chebyshev approximation were appropriate. Finally, based on the results, the net

* Corresponding Author. *E-mail Address*: s.azimifard65@gmail.com

Archive of SID

www.SID.ir

present value of water allocated to agriculture at Tabarkabad Dam in the studied period is 1471205 Rials and the allocation of water is equal to 24.745 million cubic meters per year.

Conclusion: Considering the results obtained and the proper approximation of simulated values, we can use the proposed method of this study to solve stochastic dynamic programming problems, especially in the field of water resource management. Also, by using the annual allocation of water and taking account of other regional constraints, we can provide a suitable cropping pattern for the sustainable use of agricultural water for the coming years in the fields covered by the Tabarkabad Dam.

Keywords: Dynamic programming, Computational saving, Approximation theory, Water resource management.

Archive of SID

www.SID.ir