

# روشهای کاهش ابعاد در مدل‌های برنامه‌ریزی پویای

## بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنی

علیرضا برهانی داریان<sup>i</sup>؛ محمدحسین احمدی<sup>ii</sup>

### چکیده

استفاده از مدل‌های ریاضی جایگاه ویژه‌ای را در تحلیل، مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب به خود اختصاص داده است. در بهره‌برداری از سیستم‌های دارای مخزن، مدیران بهره‌بردار می‌توانند به کمک این مدل‌ها سیاست‌های بهینه برداشت و ذخیره‌سازی را در دوره‌های مختلف اتخاذ نموده و موجب ارتقای این سیستم‌ها گردند.

برنامه‌ریزی پویا یکی از روش‌های مطرح و کارآمد در زمینه مدل نمودن بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنی چندمنظوره منابع آب می‌باشد. مدل‌هایی که براساس این روش ارائه گردیده‌اند در سیستم‌هایی با بیش از یک مخزن به دلیل بُعددار شدن مسئله با دو مشکل اساسی حافظه و زمان مورد نیاز در رایانه که محققین سیستم از آنها به بالای ابعادی تعبیر کرده‌اند، مواجه هستند. از جمله روش‌های ارائه شده برای شکست بُعد در برنامه‌ریزی پویا و کاهش حافظه و زمان مورد نیاز، روش برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی گسسته در مدل‌های معین و روش برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک مبتنی بر کریدور می‌باشد. در این مقاله توسعه و کاربرد این مدل‌ها در یک سیستم شش مخزنی بر روی رودخانه‌های کارون، بازفت و خرسان بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمان و حافظه مورد نیاز در این مدل‌ها با جریان‌های قطعی و یا استوکاستیک به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد. این بهبود در ارزیابی کارایی سیستم و بررسی معیارهای مختلف نیز خود را نشان داده است.

**کلمات کلیدی:** سیستم چندمخزنی، برنامه‌ریزی پویا، بالای ابعادی، برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی گسسته، روش کریدور، مدل استوکاستیک.

<sup>i</sup> دانشیار منابع آب دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی: dariania@gmail.com

<sup>ii</sup> کارشناس ارشد مدیریت منابع آب؛ مهندسین مشاور جویاب‌نو: Ahmadi\_m\_h@yahoo.com

### ۱- مقدمه

میلیارد نفر در جهان از امکانات آب سالم بی‌بهره هستند و با توجه به روند فعلی انتظار می‌رود این معضل در آینده تشدید نیز بشود. افزایش جمعیت و ارتقای سطح فرهنگ کشورها، بخصوص در کشورهای در حال توسعه از یک

کمبود آب مورد نیاز برای مصارف گوناگون یکی از مسائلی است که دنیا در زمان حال و بخصوص آینده با آن دست به گریبان خواهد بود. امروزه بیش از یک

طرف و کاهش منابع آب شیرین بر اثر خشکسالی و تغییرات اقلیمی، کشورها را مجاب کرده است که به بحث مدیریت منابع آب اهمیت بیشتری قائل شوند و با طرح برنامه‌های کوتاه و بلندمدت به استفاده بهینه از این منابع همت گمارند. بدیهی است اگرچه در این تحقیق تنها به مقوله مدیریت بهره‌برداری از منابع آب و به طور خاص مدیریت بهره‌برداری از مخازن پرداخته می‌شود، لکن مدیریت بهره‌برداری از منابع آب به همراه مدیریت انتقال و مصرف آب، اجزای مدیریت منابع آب می‌باشند که توجه توأم به آنها لازم است. در کشور ما عواملی همچون رشد جمعیت و صنایع از یک طرف و محدودیت منابع آب، پائین بودن راندمان آب آبیاری، بالا بودن تلفات فیزیکی در شبکه‌های انتقال آب و هدر رفتن حجم زیادی از آب قابل دسترس، و شرایط منطقه‌ای آب و نیز طرح‌های مطالعه و احداث مخازن جدید بخصوص در حوزه‌های غرب و جنوب‌غربی نظیر دز، کرخه، و کارون، توجه بیش از پیش مسئولین و کارشناسان علم نوپای مدیریت منابع آب را به خود معطوف نموده است.

مدل‌های ریاضی به عنوان ابزاری جهت تحقق اهداف مدیران و برنامه‌ریزان سیستم‌های مخازن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، مدل‌های شبیه‌سازی یکی از پرکاربردترین مدل‌ها است که به کمک قوانین فیزیکی و یکسری قوانین مربوط به بهره‌برداری از مخزن، واکنش سیستم را نسبت به سیاستی خاص پیش‌بینی می‌نماید [۲۰]. مدل‌های شبیه‌سازی بطورکلی از انعطاف‌پذیری خوبی از نظر ترکیبات مختلف مخازن، نیروگاه‌ها، ظرفیت ذخیره و نظایر آن برخوردار هستند ولی برای انتخاب بهترین سیاست ابزار مفیدی نمی‌باشند. برخلاف آنها، مدل‌های بهینه‌سازی قادر هستند به کمک روابط منطقی ریاضی با در نظر گرفتن هدفی خاص ضمن بیان یک پدیده فیزیکی، بهترین یا نزدیک‌ترین ترکیب ممکنه به ترکیب بهینه را تولید نمایند. مطالعات انجام شده بر روی بهینه‌سازی نشان داده است که نمی‌توان یک روش عمومی برای حل کلیه مسائل منابع آب نام برد. به [۲۰] روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در منابع آب را با توجه به سه عامل

متغیرها، دسترسی به داده‌ها، محدودیت‌ها و اهداف، به سه دسته روش عمده تقسیم می‌کند:

الف- برنامه‌ریزی خطی (Linear Programming) به اختصار (LP) شامل: برنامه‌ریزی خطی شانس محدود (Chance Constrained Linear Programming)، برنامه‌ریزی خطی استوکاستیک (Stochastic Linear Programming) و برنامه‌ریزی خطی استوکاستیک با برگشت (Stochastic Programming with Recourse).

ب- برنامه‌ریزی پویا (Dynamic Programming) و به اختصار (DP) شامل: برنامه‌ریزی پویای معین (Deterministic DP) و استوکاستیک (Stochastic DP)، برنامه‌ریزی پویای افزایشی (Incremental DP)، برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی گسسته (Discrete Differential DP)، برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی استوکاستیک (Stochastic Differential DP)، برنامه‌ریزی افزایشی و تقریب‌های متوالی (Incremental DP and Succesive Approximations)، برنامه‌ریزی پویا با اعتمادپذیری محدود (Reliability - Constrained DP) و برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی (Differential Dynamic Programming).

ج- برنامه‌ریزی غیرخطی (Nonlinear Programming) و به اختصار (NLP).

مدل LP یکی از ساده‌ترین مدل‌های بهینه‌سازی است که در آن تابع هدف و قیود برخلاف مسائل منابع آب که عمدتاً غیرخطی می‌باشند، هر دو خطی هستند. در این زمینه، روش‌های بهره‌برداری سیاست‌های تصمیم خطی (Linear Decision Rule) معروف به S-Rule توسط ریول و همکاران [۱۷] و متعاقب آن سیاست SQ-Rule توسط لاکس [۱۰] معرفی شدند که مدت‌ها کانون بحث و توجه محققین منابع آب بودند. این مجموعه در تقسیم‌بندی فوق جزو برنامه‌ریزی خطی شانس محدود قلمداد می‌شوند.

مدل‌های NLP برخلاف LP و DP به دلیل پیچیدگی ریاضیاتی در تحلیل سیستم‌های منابع آب از محبوبیت چندانی برخوردار نمی‌باشند. هرچند توانایی آنها در حل مسائلی با توابع هدف تفکیک‌پذیر و حدود غیرخطی زیادتیر می‌باشد [۲۰]. کوهن و مارکس (Chohon and Marks) در

۱۹۷۵ و هایمز (Haimes) در ۱۹۷۷ ادعا نمودند که در صورت پیشرفت تکنولوژی رایانه NLP می‌تواند در حل سیستم‌های بزرگ از مخازن و بهینه‌سازی‌های چندمنظوره، مورد استفاده قرار گیرد [۲۰]. تفاوت اصلی بین NLP و DP در حل مستقیم مسئله بدون گسسته‌سازی متغیرهای تصمیم توسط روش‌های NLP می‌باشد. بنابراین، در بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی، روش‌های NLP می‌تواند تا حدی مشکل بُعددار شدن را حل نماید. اما به دلیل اینکه این مدل‌ها قادر نیستند به سادگی خصوصیات استوکاستیک جریان را لحاظ نمایند و نیز به دلیل پیچیدگی‌های ریاضیاتی، این روش‌ها هرگز نتوانست به طور گسترده برای بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی جایگاهی بیابد [۱۴].

برنامه‌ریزی پویا یکی از قوی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب می‌باشد که اولین بار در ۱۹۵۷ توسط بلمن (Bellman) ارائه گردید. این روش قابلیت بهینه‌سازی پروسه‌های تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای، و حل مسائل استوکاستیک و غیرخطی را دارد. از طرفی، بزرگترین مشکل برنامه‌ریزی پویا بُعددار شدن آن در سیستم‌های چندمخزنی و افزایش حافظه و زمان لازم از رایانه، و به اصطلاح بلای ابعادی (curse of dimensionality) می‌باشد. از دهه ۶۰ میلادی به بعد تلاش و تحقیقات فراوانی جهت حل این مسئله انجام پذیرفته است.

در ۱۹۶۱ بلمن روشی را تحت عنوان تقریب متوالی (successive approximation) ارائه نمود که این روش در برنامه‌ریزی پویا به صورت تقریب در فضای تصمیم یا فضای تابع هدف می‌باشد و اساس آن تبدیل یک مسئله با متغیرهای حالت و تصمیم  $m$  بُعدی به  $m$  زیر مسئله با متغیر حالت ۱ بُعدی می‌باشد [۶]. در ۱۹۶۲ بلمن و دریفیوز (Dreyfuz) از روش تقریب متوالی در برنامه‌ریزی پویا تحت عنوان برنامه‌ریزی پویا با تقریب متوالی (Dynamic Programming with Successive Approximation) استفاده نمودند [۲۰]. لارسون [۹] ضمن بیان ساختار روش تقریب متوالی، روش جدیدی را با نام برنامه‌ریزی افزایشی حالت (State Incremental DP) و به اختصار

(SIDP) ارائه نمود. هال و همکاران در ۱۹۶۹ و نیز تروت و یه (Trott and Yeh) در ۱۹۷۱ از برنامه‌ریزی پویای افزایشی (IDP) استفاده نمودند. در این روش از همان مفهوم افزایش حالت SIDP استفاده گردیده و تنها تفاوت بین SIDP لارسون و نسخه جدیدتر، یعنی IDP، در فاصله زمانی استفاده شده برای محاسبات است که در اولی متغیر و در دومی ثابت می‌باشد [۲۰].

در ۱۹۶۶ مین (Mayne) روش برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی (DDP) را ارائه نمود که در ۱۹۷۰ توسط ژاکوبسن و مین (Jacobsen and Meyne) بهبود یافت و در ۱۹۷۸ موری (Murray) تغییراتی بر روی آن اعمال کرد. در این الگوریتم از بسط سریهای تیلور برای تولید تقریب مرتبه دوم از تابع هدف و بیان خطی انتقال‌های سیستم حول یک برآورد اولیه استفاده می‌گردد و آنگاه از یک روش حل تکرار شونده استفاده می‌شود [۲۰]. موری و یاکویتز [۱۲] با اصلاح برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی، روشی را در یک سیستم چندمخزنه به نام برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی محدود (Constrained DDP) پیشنهاد نمودند. این رویه با تقریب مرتبه دوم از تابع خسارت  $n$  مرحله‌ای آغاز می‌شود و حل بهینه‌ای را می‌یابد که مشروط به یکسری حدود خطی، تابع خسارت را حداقل می‌سازد. تورجن [۱۹] برای سیستم‌های چندمخزنه دو شیوه ابداع کرد که اولی در سیستم‌های منظم سری و موازی و دومی در سیستم‌های غیرمنظم کاربرد داشت که عبارتند از "یک به یک" (One-At-A-Time) و برنامه‌ریزی پویا-ترکیب/تجزیه (Aggregation/Decomposition DP) و به اختصار A/D-DP. توسط این روشها یک سیستم بزرگ با معادل سازی به سیستم یا سیستم‌هایی کوچکتر تبدیل گردیده و به این صورت بُعد مسئله شکسته می‌شد.

فوفولا و کیتانندیس [۴] نوعی روش با نام برنامه‌ریزی پویای گرادینانی (Gradient DP) و به اختصار (GDP) را ابداع کردند که در آن شیب تابع هدف در تمام نقاط حالت باید مشخص گردد. پانامبالام و آدامز [۱۶] مدل جدیدی را به نام (Multilevel Approximation DP) و به اختصار

مدلهای DDDP و (Corridor based SDP) یا به اختصار CSDP در این تحقیق پرداخته شده و کاربرد آنها برای تعیین سیاست بهینه بهره‌برداری در یک سیستم چندمخزنی، چندمنظوره حوزه آبریز کارون بررسی و تحلیل خواهد شد

## ۲- مدل قطعی (DP)

ساختار کلی برنامه‌ریزی پویای قطعی DP چند مخزنی از چهار جزء اصلی شامل متغیرها، روابط برگشتی، تابع هدف و قیود تشکیل شده است. متغیرها به نوبه خود سه گونه می‌باشند: متغیر مرحله، متغیر حالت و متغیر تصمیم. تابع هدف نیز عموماً حداکثر نمودن سود یا حداقل‌سازی خسارت ناشی از عملکرد سیستم می‌باشد. روش حل مسئله و روابط برگشتی به دو صورت پیش‌رو یا پس‌رو در زمان مطرح می‌گردد که عموماً الگوریتم پس‌رو رایج است. قیود مسئله در DP بر روی متغیرهای حالت و تصمیم تعریف می‌شود که بر روند حل DP تأثیرگذار می‌باشند. از تقسیم‌بندی کل دامنه زمانی به  $N$  قسمت مساوی،  $N$  دوره زمانی به دست می‌آید که با  $t = 1, 2, \dots, N$  نشان داده می‌شود. از گسسته‌سازی فضای حجم ذخیره فعال مخزن به  $K$  کلاس به روش موران متغیرهای حالت و تصمیم تولید می‌گردند. به این صورت که اگر  $S_{kt}^x$  مقدار حجم ذخیره مخزن  $x$  متناظر با کلاس  $k$  و در ابتدای دوره  $t$  و  $S_{\ell,t+1}^x$  مقدار حجم ذخیره مخزن  $x$  متناظر با کلاس  $\ell$  در انتهای دوره  $t$  (یا ابتدای دوره  $t+1$ ) باشد، آنگاه به ترتیب  $S_{kt}^x$  متغیر حالت و  $S_{\ell,t+1}^x$  متغیر تصمیم خواهند بود. جریان ورودی مخزن  $x$  در طول دوره  $t$  نیز معلوم و با  $Q_t^x$  نشان داده می‌شود. بدین ترتیب، رابطه پیوستگی عبارت است از:

$$R_{k\ell t}^x = S_{kt}^x + Q_t^x - S_{\ell,t+1}^x - E_{k\ell t}^x + \sum_{x'} D_t^{xx'} \quad (1)$$

در این رابطه  $R_{k\ell t}^x$  خروجی مخزن  $x$  در طول دوره  $t$  و  $E_{k\ell t}^x$  حجم تبخیر از سطح مخزن  $x$  در طول دوره  $t$  می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

MAM-DP معرفی کردند که حالت عمومی‌تر A/D-DP بود و باز اساس آن بر DP استوار بود. حیدری [۷] روش برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی گسسته (DDDP) را طرح نمود. این روش که جهت رفع مسئله بلای ابعادی طرح می‌شد و از DDP و SIDP الهام می‌گرفت، پایه و اساس بسیاری از تحقیقات بعدی، از جمله جمشیدی و حیدری [۸] که روش مذکور را بر روی سیستمی فرضی در جنوب ایران بکار بستند، قرار گرفت. DDDP یک روش تکراری است که در آن از رابطه برگشتی DP معین برای تولید مسیری بهینه بین حالت‌های گسسته شده در مجاورت و همسایگی یک مسیر آزمایشی استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر، روشهای نوینی در عرصه تحقیقات مدیریت منابع آب معرفی شده‌اند که خارج از تقسیم‌بندی به [۲۰] قرار می‌گیرند. این مجموعه از روشها با کمک پیشرفتهایی که در علوم سخت و نرم‌افزاری کامپیوتری شده است به بهره‌برداری از این قابلیتها پرداخته و بعضاً توانسته بر برخی از معایب روشهای سنتی غالب آید. در این زمینه می‌توان به الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithms) و به اختصار (GA)، شبیه‌سازی آنیلینگ (Simulated Annealing) و به اختصار (SA) روش جستجوی ممنوعه (Tabu Search) (TS)، و سیستم مورچگان (Ant System) (AS) اشاره نمود که اغلب با الهام از طبیعت بنا شده و به الگوریتمهای تکاملی معرف هستند. در این زمینه میتوان به کارهای شریف و واردلا [۱۸]، ایسات و هال [۳]، و اولیوریا و لاکس [۱۳] اشاره نمود.

علیرغم توسعه روشهای جدید، قابلیت‌های فراوان مدل‌های DP از جمله توان حل مسائل خطی و غیرخطی، انعطاف‌پذیری در مقابل جریان‌های قطعی و استوکاستیک، عدم پیچیدگی ریاضیاتی و روش‌های مختلف شکست بُعد، قابلیت بکارگیری سناریوهای پیش‌بینی، و استفاده تلفیقی از آن در روشهای جدید، سبب گردیده که این روش همواره یکی از پرکاربردترین روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن باقی بماند. در ادامه به تشریح ساختار مدل‌های تهیه شده مبتنی بر DP و به طور خاص

$$S \min_{t+1}^x \leq S_{\ell,t+1}^x \leq S \max_{t+1}^x \quad (6)$$

$$R \min_t^x \leq R_{k,lt}^x \leq R \max_t^x$$

### ۳- مدل استوکاستیک (SDP)

تفاوت اصلی SDP و DP در ماهیت استوکاستیک جریان ورودی به مخازن می‌باشد. فرض احتمالاتی بودن جریان باعث نزدیک‌تر شدن SDP به واقعیت می‌شود. در SDP برخلاف DP که مقادیر جریان معلوم هستند، جریان ورودی معلوم نبوده ولی با توجه به تبعیت جریان از زنجیره مارکف، بصورت احتمالی قابل بیان است. در این روش دامنه جریان ورودی مخزن گسسته‌سازی شده و فرض می‌گردد  $Q_{it}^x$  جریان ورودی به مخزن  $x$  در دوره  $t$  باشد که در کلاس  $i$  قرار دارد. همچنین احتمال انتقالی جریان  $P_{ij}^t$  یعنی احتمال اینکه جریان در دوره  $t$  در کلاس  $i$  و در دوره  $t+1$  در کلاس  $j$  تعریف می‌گردد به گونه‌ای که:

$$\sum_{j=1}^I P_{ij}^t = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, I \quad (7)$$

که  $I$  تعداد کل کلاس‌های جریان است. بر این اساس رابطه برگشتی در SDP عبارت خواهد بود با:

$$f_t^n(k_1, k_2, \dots, k_M, i_1, i_2, \dots, i_M) = \min \left[ \sum_{k_x, \ell_x, i_x, t} Loss_{k_x, \ell_x, i_x, t}^x + \sum_j (P_{ij}^t f_{t+1}^{n-1}(\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_M, j_1, j_2, \dots, j_M)) \right] \quad (8)$$

که:

$$i, j = 1, 2, 3, \dots, I \quad k_x, \ell_x = 1, 2, 3, \dots, K \quad (9)$$

برخلاف حجم ذخیره، می‌توان برای سادگی و با برخی پیش فرضها کلاس جریان مخازن مختلف را در یک دوره یکسان فرض نمود [۱۱]. لذا رابطه برگشتی به فرم ذیل درمی‌آید:

$$f_t^n(k_1, k_2, \dots, k_M, i) = \min \left[ \sum_{k_x, \ell_x, i_x, t} Loss_{k_x, \ell_x, i_x, t}^x + \sum_j P_{ij}^t f_{t+1}^{n-1}(\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_M, j) \right] \quad (10)$$

$$E_{k,lt}^x = \frac{a_{kt}^x + a_{\ell,t+1}^x}{2} (e_t^x - r_t^n) \quad (2)$$

که در آن  $e_t^x$  و  $r_t^x$  به ترتیب ارتفاع تبخیر و بارش در مخزن  $x$  طی دوره  $t$  بوده و  $a_{kt}^x$  و  $a_{\ell,t+1}^x$  نیز سطح متناظر با تفاضل ارتفاع تبخیر و بارش مخزن  $x$  در ابتدای دوره  $t$  و  $t+1$  می‌باشد که از رابطه سطح-ارتفاع هر مخزن قابل برآورد می‌باشند.  $\sum_{x'} D_t^{xx'}$  مجموع جریان‌هایی است که از مخازن  $x'$  در بالادست مخزن  $x$  به این مخزن انتقال می‌یابد. لازم به ذکر است که جریان‌های بین راهی و برگشتی را نیز می‌توان به رابطه پیوستگی افزود.

رایج‌ترین شکل تابع هدف از نوع تابع خسارت درجه دو می‌باشد. منظور از خسارت، انحراف خروجی‌ها از مقادیر مطلوب برای شرب، کشاورزی و یا نیروگاه و یا انحراف حجم ذخیره از مقادیر مطلوب می‌باشد.

$$Loss_{k,lt}^x = (R_{k,lt}^x - TR_{k,lt}^x)^2 + (S_{kt}^x - TS_{kt}^x)^2 \quad (3)$$

که در آن  $TR_{k,lt}^x$  و  $TS_{kt}^x$  به ترتیب خروجی و حجم ذخیره مطلوب می‌باشد. با استفاده از الگوریتم پس‌رو، رابطه برگشتی به صورت زیر خواهد بود:

$$f_t^n(\bar{K}) = \min \left[ \sum_x Loss_{k,lt}^x + f_{t+1}^{n-1}(\bar{L}) \right] \quad (4)$$

که در آن  $f_t^n(\bar{K})$  مقدار بهینه خسارت از دوره  $t$  تا آخرین دوره می‌باشد.  $Loss_{k,lt}^x$  نیز خسارت مخزن  $x$  در طول دوره  $t$  و  $f_{t+1}^{n-1}(\bar{L})$  کل خسارت از دوره  $t+1$  تا آخرین دوره می‌باشد.  $\bar{K}$  و  $\bar{L}$  بردار حالت و تصمیم بوده و عبارتند از:

$$\bar{K} = (k_1, k_2, k_3, \dots, k_M)^T \quad (5)$$

$$\bar{L} = (\ell_1, \ell_2, \ell_3, \dots, \ell_M)^T$$

که  $k_1, k_2, \dots, k_M$  کلاس حجم ذخیره اولیه مخازن ۱، ۲، ... و  $\ell_1, \ell_2, \ell_3, \dots, \ell_M$  نیز تراز کلاس حجم ذخیره نهایی مخازن ۱، ۲، ... و  $M$  می‌باشد.  $M$  معرف تعداد کل مخازن بوده و  $T$  در اینجا علامت ترانسپوز می‌باشد.

حدود ظرفیت و برداشت به صورت زیر خلاصه می‌گردند:

معادله پیوستگی برای SDP بصورت زیر خواهد بود:

$$R_{ki\ell t}^x = S_{ki}^x + Q_{it}^x - S_{\ell,t+1}^x - E_{ki\ell t}^x + \sum_{n'} D_t^{xx'} \quad (11)$$

خواهد شد.

#### ع- کریدور در DP

حیدری [۶] روش DDDP را جهت کاهش ابعاد و حجم محاسبات در مدل قطعی DP ارائه نمود. اساس این روش که بر اعمال کریدور در فضای حالت استوار است به شرح ذیل می‌باشد:

- فرض یک رشته از بردارهای حالت مجاز که به آن مسیر آزمایشی (Trial trajectory) یا مسیر اسمی گویند.
- انتخاب یک گام در فضای حالت و تشکیل کریدور.
- بهینه‌سازی به روش DP.
- انتخاب مسیر بهینه از بین مسیرهای بهینه‌ای که در شروط موجود صدق کند و محاسبه مقدار خسارت  $F^*$ .
- مقایسه خسارت بهینه بدست آمده از تکرار  $k$  یعنی  $F_k^*$  با بهینه تکرار قبل  $F_{k-1}^*$ . اگر تفاضل آنها کمتر از مقدار معلوم  $\varepsilon$  باشد تکرار متوقف می‌شود و در غیر این صورت تکرار بعدی آغاز می‌گردد.
- روند فوق آنقدر ادامه می‌یابد تا مقدار بهینه از تکراری به تکرار دیگر تغییر ننموده و یا تغییرات آن اندک باشد (جهت اطلاعات بیشتر مراجعه شود به [۱]).

#### د- کریدور در SDP

روش DDDP به دلیل ماهیت احتمالاتی جریان در مدل‌های استوکاستیک غیرقابل استفاده می‌باشد. لکن می‌توان با الهام از مفهوم کریدور روشی را ارائه نمود که ضمن سادگی و پرهیز از روابط پیچیده قادر باشد تا حدی به شکست بُعد و کاهش محاسبات در SDP بپردازد. در این روش کریدور در فضای تصمیم و حول یک مسیر تصمیم صورت می‌گیرد که می‌توان آنرا SDP مبتنی بر کریدور یا CSDP نامید.

در CSDP برای هر حالت ابتدا یک مسیر تصمیم اولیه فرض شده، سپس کریدوری در فضای تصمیم حول آن

مشکل بُعددار شدن: در یک سیستم با  $M$  مخزن اگر تعداد کلاس‌های حجم ذخیره برابر  $K$  و تعداد کلاس‌های جریان (برای مدل SDP)  $I$  باشد در آن صورت در DP برای هر مخزن  $K$  حالت و  $K$  تصمیم وجود خواهد داشت. و برای  $M$  مخزن  $K^M$  ترکیب حالت و به همین تعداد ترکیب تصمیم بوده و جمعا  $K^{2M}$  حالت وجود خواهد داشت. در SDP به دلیل احتمالاتی بودن ماهیت جریان و گسسته‌سازی آن برای هر مخزن به تعداد  $K \times I$  حالت و  $K$  تصمیم وجود خواهد داشت. و برای یک سیستم با  $M$  مخزن،  $(K \times I)^M$  ترکیب حالت و  $K^M$  تصمیم بوده و جمعا  $(K^2 \times I)^M$  حالت وجود خواهد داشت. با فرض برابری کلاس جریان مخازن، تعداد کل حالات به  $K^{2M} \times I$  کاهش می‌یابد.

همانگونه که مشاهده می‌شود در سیستم‌های چندمخزنی با افزایش تعداد کلاس‌های حجم ذخیره، حالات و تصمیم‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در یک سیستم ۴ مخزنی با ۲۰ کلاس حجم ذخیره جهت حل در DP،  $160000$  حالت و تصمیم (جمعا  $10^{13} \times 2/56$  حالت) به وجود می‌آید. در SDP با تنها ۵ کلاس جریان، تعداد متغیرهای حالت برابر با ۱۰۸، و تعداد متغیرهای تصمیم  $160000$  (جمعا  $10^{13} \times 1/6$  حالت) خواهد بود. و در صورتیکه کلاس جریان را برای همه مخازن برابر فرض کنیم تعداد متغیرهای حالت به ۸۰۰۰۰۰ کاهش خواهد یافت اما تعداد متغیرهای تصمیم تغییری نخواهد کرد (و جمعا به  $10^{11} \times 1/28$  کاهش خواهد یافت). این چنین مدلی با ابعاد وسیع و این حجم از محاسبات به چند روز وقت برای حل توسط رایانه نیاز دارد. به همین علت در عمده مقالات مطالعه شده برای تشریح روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا از سیستمی با ابعاد کوچک، با تعداد کلاس جریان و حجم ذخیره اندک (در حدود ۵ کلاس)، استفاده شده است.

بروز این مشکل که به بالای ابعادی در برنامه‌ریزی پویا مشهور گردیده است شرایطی را ایجاد نموده است تا گزینه‌هایی برای شکست بُعد ارائه گردد، که روش‌های مبتنی بر اعمال کریدور در فضای حالت یا تصمیم از آن دسته‌اند. در ادامه به بیان کریدور در DP و SDP پرداخته

تشکیل می‌شود و بهینه‌سازی درون آن انجام می‌گیرد. چنانچه تصمیم بهینه با تصمیم اولیه یکسان باشد مدل برای حالت بعدی ادامه می‌یابد، در غیر این صورت تکرارها آنقدر ادامه می‌یابد تا تصمیم اولیه و بهینه برابر گردند. در CSDP تغییرات عرض کریدور همانند DDDP نمی‌تواند مفید باشد و باعث افزایش حجم محاسبات، زمان و حافظه مورد نیاز خواهد شد [۱۵].

در این روش برای بردار حالت  $sk'(t), t=1,2,\dots,N$  یک رشته از بردارهای تصمیم مجاز بصورت  $s'(t), t=1,2,\dots,N$  فرض می‌گردد که به آن سیاست آزمایشی یا مسیر سیاست اسمی گویند. این مسیر آزمایشی باید شروط موجود را برقرار سازد. با استفاده از معادله پیوستگی و با توجه به مشخص بودن مسیر و سیاست آزمایشی و تخصیص خروجی‌ها، خواهیم داشت:

$$F'[sk'(t), t] = \sum_{t=1}^N [L(sk'(t), s'(t), t)] \quad (12)$$

برای ادامه کار یک افزایش در فضای تصمیم را در نظر می‌گیریم. بدین منظور،  $\Delta s$  افزایش واحد حجم ذخیره فرض می‌شود که در دوره‌های مختلف ثابت است. اگر سیستم  $M$  بعدی باشد ( $M$  متغیر حالت و یا تصمیم) و برای هر متغیر تصمیم، اجازه انتخاب تعداد  $Y$  افزایش در فضای تصمیم وجود داشته باشد، آنگاه در هر دوره،  $Y$  تصمیم وجود دارد که در کل ترکیب‌های تصمیم در هر دوره  $Y^M$  خواهد بود. بردار افزایش تصمیم از این ترکیب‌ها شکل می‌گیرد که به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\Delta s \ell_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, Y^M \quad (13)$$

جزء  $i$  ام این بردار عبارت است از:

$$\Delta s \ell_i(t) = \begin{bmatrix} \delta s_{i1}(t) \\ \delta s_{i2}(t) \\ \vdots \\ \delta s_{ij}(t) \\ \vdots \\ \delta s_{im}(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

که در آن  $\delta s_{ij}(t)$  مقدار افزایش  $i$  ام مربوط به متغیر تصمیم  $j$  ام می‌باشد. این جزء می‌تواند  $Y$  مقدار داشته باشد که عبارتند از:  $\sigma_y$  که  $y=1,2,\dots,Y$ . مقادیر  $\sigma_y$  همواره ضربی از  $\Delta s$  می‌باشند یعنی:  $\sigma_y = z \times \Delta s, z \in Z$ . با

افزودن هر یک از بردارهای افزایشی  $\Delta s \ell_i(t)$  به مسیر سیاست اسمی یک منطقه از فضای تصمیم در دوره  $t$  بوجود می‌آید که آن را با  $D(t)$  نشان می‌دهیم و برقرار کننده حدود موجود می‌باشد. بردار تصمیم جدید عبارت است از:

$$D(t) = s'(t) + \Delta s \ell_i(t), \quad \forall i = 1, 2, \dots, Y^M \quad (15)$$

مقادیر  $D(t)$  با هم تشکیل یک کریدور می‌دهند. برای مثال اگر  $Y=3$  باشد حالت‌های جدید عبارتند از:

$$\begin{aligned} s'(t) + \sigma_1, \quad \sigma_1 = -\Delta s \quad s'(t) + \sigma_2, \quad \sigma_2 = 0 \\ s'(t) + \sigma_3, \quad \sigma_3 = +\Delta s \end{aligned} \quad (16)$$

در تعیین مقادیر  $\sigma_y$  همیشه یکی از آنها باید صفر باشد تا خود مسیر سیاست اسمی همواره در داخل کریدور قرار گیرد. مابقی  $\sigma_y$ ها به صورت ضرایبی مثبت و منفی در بالا و پائین آن قرار می‌گیرند.

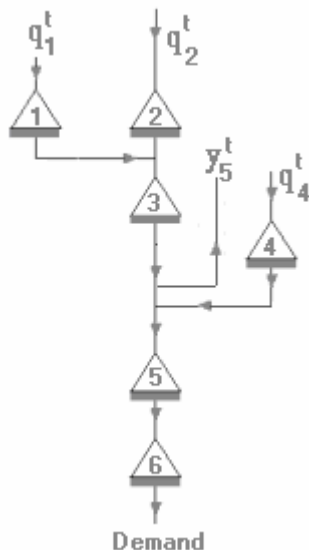
پس از تشکیل کریدور، بهینه‌سازی در درون آن صورت می‌گیرد. با بدست آمدن مسیر بهینه، اولین تکرار CSDP خاتمه یافته و تکرار بعدی آغاز می‌گردد. مطابق رابطه (۱۶) مسیر تصمیم بهینه در تکرار  $k-1$  به عنوان مسیرتصمیم اولیه در تکرار  $k$  در نظر گرفته می‌شود. یعنی:

$$[s'(t)]_k = [s^*(t)]_{k-1} \quad (17)$$

به طور کلی در تکرار  $k$  ام گام‌های زیر برداشته می‌شود:

- انتخاب  $\sigma_y$ ها و تشکیل کریدور  $k$  ام
- بهینه‌سازی به روش DP
- انتخاب مسیر بهینه از بین مسیرهای بهینه‌ای که در شروط موجود صدق کند و محاسبه مقدار خسارت  $F^*$
- مقایسه خسارت بهینه بدست آمده از تکرار  $k$  یعنی  $F_k^*$  با بهینه تکرار قبل  $F_{k-1}^*$ . اگر تفاضل آنها کمتر از مقدار معلوم  $\varepsilon$  باشد تکرار متوقف می‌شود و در غیر این صورت تکرار بعدی آغاز می‌گردد.

تکرارها آنقدر ادامه می‌یابد تا تغییرات تابع هدف یا جواب



شکل (۱)- سیستم شش مخزنی مورد استفاده

## ۶- اطلاعات اولیه

حداقل و حداکثر حجم فعال مخازن به عنوان محدودیت حجم ذخیره آنها به شرح جدول ۱ می‌باشد. میانگین ماهانه آبدهی رودخانه‌های آب ونک و کارون در محل کارون ۵،  $q_2^t$ ، رودخانه بازفت،  $q_1^t$ ، و خرسان،  $q_4^t$ ، به ترتیب در محل مخازن بازفت و خرسان ۱ و نیز میانگین ماهانه آبدهی رودخانه لردگان،  $y_5^t$ ، در محل اتصال به کارون به شرح جدول ۲ است. حجم ذخیره مطلوب (فرض شده) و نیاز پایین دست نیز بترتیب در جداول ۳ و ۴ ارایه شده است.

جدول (۱)- حداقل و حداکثر حجم ذخیره مخازن سیستم (میلیون مترمکعب-م.م.م)

شماره	مخزن	ظرفیت حداکثر	ظرفیت حداقل
۱	بازفت	۴۵۰	۱۴۲
۲	کارون ۵	۲۰۱۳	۱۲۳۰
۳	کارون ۴	۲۱۹۰	۱۴۱
۴	خرسان ۱	۲۹۱	۲۴۵
۵	کارون ۳	۲۷۵۰	۱۲۵۰
۶	کارون ۱	۳۱۴۰	۱۷۰۰

در کلیه مدل‌ها، دوره بهره‌برداری شامل ۱۲ دوره ماهانه می‌باشد که مطابق سال آبی از مهر شروع و به شهریور

بهینه از تکراری به تکرار دیگر ناچیز بوده و یا اصلا تغییر پیدا نکند. گام تصمیم می‌تواند برای مخازن مختلف مقادیر متفاوت داشته باشد. پس از حصول تصمیم بهینه مانند روش DP معمولی سایر حالات نیز بررسی می‌گردد و برای آنها نیز مراحل فوق‌الذکر تکرار می‌گردد. باید توجه داشت که در CSDP جواب حاصله ممکن است یک بهینه موضعی باشد و لزوماً جواب واقعی و بهینه مطلق حاصل نشود.

## مطالعه موردی:

به منظور بررسی و مقایسه روش‌های مختلف بهینه‌سازی چهار مدل تهیه شد که هر کدام به یکی از روش‌های DP، SDP، DDDP و CSDP به بهینه‌سازی سیستمی شش مخزنی می‌پردازد. نتایج حاصل از مدل‌های بهینه‌سازی توسط برنامه‌های جداگانه‌ای شبیه‌سازی شده و نحوه بهره‌برداری و معیارهای طراحی به دست می‌آید. سیستم مدنظر بخشی از مجموعه مخازن حوزه آبریز کارون می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲) دیده می‌شود مخازن شماره ۱-بازفت بر روی رودخانه بازفت، ۲-کارون ۵، ۳-کارون ۴، ۴-خرسان بر روی رودخانه خرسان، ۵-کارون ۳ و ۶-کارون ۱، مجموعه مخازن سیستم انتخاب شده را تشکیل می‌دهند. ذخیره هرکدام از آنها به لحاظ تولید انرژی برقابی مهم می‌باشد و در پائین‌دست کل سیستم، بعد از مخزن کارون ۱، بخشی از جریان خروجی به مصارف مختلف کشاورزی و شرب تخصیص داده می‌شود. در حد فاصل مخازن کارون ۳ و ۴، جریان رودخانه لردگان (منج) به عنوان ورودی به کارون ۳ به سیستم افزوده می‌شود. سایر جریان‌های ورودی به سیستم نیز توسط رودخانه‌های کارون و آب ونک (ورودی به کارون ۵)، بازفت (ورودی به مخزن بازفت) و خرسان (ورودی به مخزن خرسان ۱) می‌باشد. هدف در کلیه مدل‌ها به حداقل رساندن خسارت ناشی از انحراف حجم ذخیره هر یک از مخازن از ذخیره مطلوب و نیز انحراف خروجی کارون ۱ از خروجی مطلوب برای تامین نیاز آبی پایین دست می‌باشد.



اجرا گردیده تا مقایسه‌های بهتری انجام پذیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تعداد کل حالات مدل DP تنها با ۵ کلاس حجم ذخیره حدود ۶۶۰ برابر تعداد حالات مدل DDDP می‌باشد. لکن بدلیل تعداد تکرارها (۱۴ تکرار) در هر گام تعداد کل محاسبات حدوداً ۳۳ برابر آن است. همین امر سبب گردیده است که زمان کل محاسبات مدل DP بیش از ۱۷ برابر مدل DDDP باشد.

جدول (۳)- حجم ذخیره مورد نیاز در هر مخزن به منظور تولید انرژی برق‌آبی مطلوب (م.م.م)

شماره مخزن	مهر	آب‌ان	آذر	دی	تهرن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱	۳۰۷	۲۵۰	۲۱۲	۲۰۲	۲۱۷	۲۷۰	۳۵۰	۴۲۹	۴۴۹	۴۴۰	۴۱۲	۳۶۸
۲	۱۶۶۹	۱۵۰۴	۱۴۰۷	۱۳۸۳	۱۴۲۰	۱۵۵۳	۱۷۷۱	۱۹۵۸	۲۰۱۰	۱۹۸۸	۱۹۱۶	۱۸۰۵
۳	۱۲۳۸	۸۵۹	۶۰۳	۵۴۲	۶۳۷	۹۸۷	۱۵۵۷	۲۰۴۵	۲۱۸۲	۲۱۲۵	۱۹۳۶	۱۶۴۶
۴	۲۷۰	۲۶۱	۲۵۵	۲۵۴	۲۵۶	۲۶۴	۲۷۷	۲۸۸	۲۹۱	۲۹۰	۲۸۵	۲۷۹
۵	۲۰۵۳	۱۷۷۵	۱۵۸۸	۱۵۴۳	۱۶۱۴	۱۸۷۰	۲۲۸۷	۲۶۴۴	۲۷۴۴	۲۷۰۲	۲۵۶۴	۲۳۵۱
۶	۲۴۷۱	۲۲۰۴	۲۰۲۵	۱۹۸۱	۲۰۵۰	۲۲۹۵	۲۶۹۵	۳۰۳۸	۳۱۳۴	۳۰۹۴	۲۹۶۱	۲۷۵۷

جدول (۴)- نیاز ماهانه در پائین‌دست کارون ۱ (م.م.م)

ماه	مهر	آب‌ان	آذر	دی	تهرن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
نیاز	۵۹۲	۴۸۳	۳۲۰	۳۴۳	۳۴۸	۴۲۹	۶۲۷	۴۵۰	۹۷۰	۹۰۱	۷۷۶	۷۱۹

از سوی دیگر بر خلاف انتظار، مشاهده می‌شود که بعلت کم بودن تعداد کلاس‌های حجم ذخیره در DP، نتایج حاصل از مدل DDDP بسیار بهتر از DP است. در واقع اگر مدل DDDP را مبنا قرار دهیم، DP با ۳، ۴، و

ختم می‌شود. متغیر حالت، حجم ذخیره در ابتدای هر دوره،  $sk_t^x$ ، و متغیر تصمیم، حجم ذخیره در انتهای دوره،  $s_t^l$ ، می‌باشد. محدوده حجم فعال هر مخزن به روش موران گسسته‌سازی گردید.

جدول (۲)- جریان میانگین ماهانه ورودی به مخازن شماره ۱، ۲ و ۴ و آبدهی ماهانه رودخانه لردگان (م.م.م)

مخزن	مهر	آب‌ان	آذر	دی	تهرن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱	۵۳/۶	۷۷/۳	۱۲۴/۷	۱۱۳/۴	۱۵۷/۰	۳۰۶/۲	۴۱۴/۱	۳۲۶/۹	۱۸۸/۹	۱۱۱/۵	۷۷/۴	۵۸/۴
۲	۹۰/۹	۳۱۰/۸	۱۳۱/۳	۱۴۲/۹	۱۸۳/۷	۲۹۷/۱	۴۶۰/۸	۴۲۹/۸	۲۵۹/۲	۱۴۸/۹	۱۱۱/۳	۹۶/۹
۴	۱۱۸/۰	۱۳۰/۴	۱۸۸/۹	۲۰۰/۹	۳۲۲/۵	۴۷۱/۰	۵۷۶/۸	۴۳۰/۱	۲۹۲/۷	۲۰۹/۹	۱۵۲/۱	۱۲۳/۹
لردگان	۱۵/۲	۱۳/۹	۲۰/۳	۱۹/۸	۲۶/۲	۳۹/۷	۶۳/۴	۶۱/۹	۳۷/۴	۲۵/۰	۱۷/۶	۱۵/۲

تابع هدف در این پروژه بشرح زیر تعریف شده است:

$$\min \left[ \sum_{t=1}^{12} W_1 \sum_{x=1}^6 (sk_t^x - TS_t^x)^2 + W_2 (R_t^6 - TR_t^6)^2 \right] \quad (18)$$

که در آن  $TS_t^x$  ذخیره مطلوب مخزن X در طول دوره t و  $TR_t^6$  خروجی مطلوب مخزن ۶ در طول دوره t می‌باشد. همچنین، بطوریکه مشاهده می‌شود مربع انحرافات حجم ذخیره از مقدار مطلوب برای تمام مخازن محاسبه می‌گردد ولی مربع انحراف خروجی از مقدار مطلوب فقط برای مخزن ۶ که بلافاصله در بالا دست محل مصرف است در نظر گرفته می‌شود. لذا جهت هم وزن سازی این دو هدف ضرایب آنها در تابع هدف بترتیب برابر  $W_1 = 1/6$  و  $W_2 = 1$  فرض می‌شود. بدیهی است این ضرایب قابل تعدیل بوده و در عمل با کمک کارشناسان و مدیران بهره‌بردار مشخص می‌شود.

## ۷- نتایج بهینه‌سازی در حالت قطعی

برخی از نتایج اجرای مدل‌های DP و DDDP به شرح جدول ۵ است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد مدل DP با فرض ۳، ۴ و ۵ کلاس حجم ذخیره

کلاس جریان همزمان را در همه مخازن یکسان در نظر می‌گیرد.

جدول (۵)- نتایج حاصل از اجرای مدل‌های DP و DDDP در سیستم ۶ مخزنی کارون

شرح	DP با K=3	DP با K=4	DP با K=5	DDDP با انتخاب مجاز
تعداد حالت	۳ <sup>۶</sup>	۴ <sup>۶</sup>	۵ <sup>۶</sup>	۳ <sup>۶</sup>
تعداد تصمیم	۳ <sup>۶</sup>	۴ <sup>۶</sup>	۵ <sup>۶</sup>	۳ <sup>۶</sup>
تعداد دوره تا حصول بهینه	۴۸	۳۶	۳۶	۳۶
تعداد محاسبات	۳ <sup>۱۲</sup> ×۴۸	۴ <sup>۱۲</sup> ×۳۶	۵ <sup>۱۲</sup> ×۳۶	۳ <sup>۱۲</sup> ×۳۶*۱۴
زمان کل (محاسبات(ثانیه))	۲۵۹	۱۴۷۴	۲۲۱۹۶	۱۳۰۱
تابع هدف بهینه	۵۵۴۱۸۵۷	۳۰۰۹۰۳۵	۲۵۲۸۹۵۳	۱۵۹۹۶۰۱

\*مدل رایانه مورد استفاده: P2.4GHZ و 512MB Ram

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود در CSDP نیز، به همان دلیل، افزایش زمان و به تبع آن حافظه مورد نیاز نسبت به رشد کلاس حجم ذخیره بسیار چشمگیرتر از افزایش آن نسبت به رشد کلاس جریان بوده است. لازم به ذکر است کریدور اعمال شده در فضای تصمیم دارای ۳ مقدار فرض شده است.

جدول (۶)- مقایسه ابعاد و زمان اجراهای مختلف مدل

#### SDP

شرح	1: K=3, I=3	2: K=3, I=4	3: K=4, I=3	4: K=4, I=4
تعداد حالت	۳ <sup>۶</sup> ×۳	۳ <sup>۶</sup> ×۴	۴ <sup>۶</sup> ×۳	۴ <sup>۶</sup> ×۴
تعداد تصمیم	۳ <sup>۶</sup>	۳ <sup>۶</sup>	۳ <sup>۶</sup>	۳ <sup>۶</sup>
تعداد دوره تا حصول بهینه	۶۰	۶۰	۴۸	۴۸
تعداد محاسبات	۳*۳ <sup>۱۲</sup> *۶۰	۴*۳ <sup>۱۲</sup> *۶۰	۳*۴ <sup>۱۲</sup> *۴۸	۴*۴ <sup>۱۲</sup> *۴۸
زمان کل (محاسبات(ثانیه))	۱۱۴۸	۱۵۱۶	۱۵۰۷۵	۲۶۸۱۵

ه کلاس حجم ذخیره دارای تابع هدفی بترتیب در حدود ۳/۵، ۱/۹، و ۱/۶ برابر تابع هدف مدل DDDP است. در حالیکه، زمان اجرای DDDP نسبت به DP با بهترین جواب (با ۵ کلاس ذخیره) تنها حدود ۰/۰۶ است. مقایسه مدل DP با ۳ کلاس حجم ذخیره و مدل DP با ۴ کلاس حجم ذخیره حکایت از بهبود جواب بهینه با افزایش تعداد کلاس، دارد. وجود شش مخزن در سیستم سبب افزایش ابعاد و زمان حل مسئله گردیده است به گونه‌ای که افزایش تعداد کلاس‌ها به بیش از ۵ کلاس باعث افزایش بیش از حد زمان اجرا می‌شود و به چند روز زمان نیاز دارد. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که مدل DP عملاً در سیستم‌های ۶ مخزنی کارآیی لازم را ندارد. از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد که مدل DDDP با کاهش ابعاد و زمان محاسبه بخوبی قادر به مدلسازی چنین سیستمی بوده و می‌تواند به نتایج قابل قبولی برسد.

#### ۸- نتایج بهینه‌سازی در حالت استوکاستیک

در مدل‌های SDP و CSDP آبدهی رودخانه‌ها به روش فراوانی یکسان کلاسه‌بندی گردیده و فرض بر این است که کلاس جریان ورودی به کلیه مخازن در هر زمان یکسان باشد. این فرض با توجه به مجاورت مخازن و همبستگی بالا بین جریان رودخانه کارون در نقاط مختلف دور از واقعیت نبوده و منطقی است.

اجرای مدل SDP در حالت‌های مختلفی از تعداد کلاس جریان و حجم ذخیره در جدول ۶ خلاصه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مدل SDP با ۳ کلاس حجم ذخیره و نیز ۳ کلاس جریان، پس از ۶۰ تکرار (۵ سال) و طی زمانی در حدود ۱۱۴۸ ثانیه به سیاست ایستا رسیده است درحالی‌که تعداد حالت‌ها ۲۱۸۷ بوده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد به نسبت افزایش تعداد کلاس‌های جریان ورودی، زمان به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد ولی با افزایش کلاس حجم ذخیره زمان محاسبات به صورت نمایی تغییر می‌کند و به تبع آن حافظه مورد نیاز نیز افزایش می‌یابد. علت این امر علاوه بر اینکه جریان، بر خلاف ذخیره، فقط بعنوان متغیر حالت مورد استفاده قرار می‌گیرد، مربوط به فرضی می‌شود که

جدول (۷) - مقایسه ابعاد و زمان اجراهای مختلف مدل

CSDP

شرح	1: K=3, I=3	2: K=3, I=4	3: K=4, I=3	4: K=4, I=4
تعداد حالت	۳ <sup>۶</sup> ×۳	۳ <sup>۶</sup> ×۴	۴ <sup>۶</sup> ×۳	۴ <sup>۶</sup> ×۴
تعداد تصمیم در هر کریدور	۳ <sup>۶</sup>	۳ <sup>۶</sup>	۳ <sup>۶</sup>	۳ <sup>۶</sup>
تعداد دوره تا حصول بهینه	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
زمان کل محاسبات(ثانیه)	۶۶۷	۸۷۵	۱۲۸۵۴	۱۷۰۹۳

در مقایسه‌ای بین SDP و CSDP که در جدول ۸ خلاصه گردیده است، زمان اجرا در مدل CSDP همواره کمتر از مدل SDP بوده است. ناگفته پیداست همان‌گونه که CSDP توانسته زمان را نسبت به SDP کاهش دهد، حافظه مورد نیاز نیز کمتر خواهد بود چراکه تعداد تصمیماتی که در هر حالت مدل CSDP بررسی می‌گردد، ۳<sup>۶</sup> تصمیم ولی در SDP برابر با K<sup>۶</sup> می‌باشد. با توجه به محدودیت ابعاد و حجم محاسبات امکان اجرای SDP با بیش از ۴ کلاس ذخیره میسر نگردد. در نتیجه با توجه با اینکه در CSDP کریدور حول متغیر تصمیم با ۳ تعداد بسته شده است، اختلاف بین دو مدل CSDP و SDP و برتریهای اولی کاملاً روشن نگردد. لکن همین نتایج نیز حاکی از موثر بودن مدل CSDP در شکست بعد و کاهش ابعاد است.

جدول (۸) - مقایسه زمان اجرای مدلها مدل SDP و

CSDP (ثانیه)

شرح	1: K=3, I=3	2: K=3, I=4	3: K=4, I=3	4: K=4, I=4
تعداد دوره	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
زمان اجرا در مدل SDP	۱۱۴۸	۱۵۱۶	۱۸۸۴۴	۳۳۵۱۸
زمان اجرا در مدل CSDP	۶۶۷	۸۷۵	۱۲۸۵۲	۱۷۰۹۳
درصد کاهش زمان در CSDP	۴۱/۹	۴۲/۳	۳۱/۸	۴۹

جهت بررسی تأثیر ضرایب تابع هدف  $(W_1, W_2)$ ، مدل‌های DP و DDDP در شرایط یکسان یک بار دیگر با فرض برابر بودن ضرایب مذکور،  $(W_1=W_2=1)$ ، حل گردیدند. در این حالت طبیعی است که مقادیر تابع هدف با فرض برابری ضرایب تابع هدف بیشتر باشد. با استفاده از آمار دراز مدت ۳۴ ساله (۳۷-۱۳۳۶ تا ۷۰-۱۳۶۹) سیستم بر اساس روشهای مختلف شبیه‌سازی گردید. بطوریکه در جدول ۹ مشاهده می‌شود بررسی معیارهای کارایی سیستم، طی این شبیه‌سازی نشان میدهد در حالتی که ضرایب تابع هدف مساوی فرض گردیدند، مطابق آنچه انتظار می‌رفت مقادیر اعتمادپذیری و اعتمادپذیری کمی تامین نیاز آبی کمتر و مقدار آسیب‌پذیری میانگین آن بیشتر شده است (جهت اطلاع بیشتر از این معیارها مراجعه شود به [۵]). در واقع، عملکرد سیستم در تامین نیاز آبی، در حالتی که ضرایب تابع هدف متغیر بوده و وزن بخش حجم ذخیره تابع هدف تعدیل گردیده است، بهبود نشان می‌دهد (جهت اطلاع بیشتر از شبیه‌سازی دراز مدت سیستم مراجعه شود به [۲]).

### ۹- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله توسعه و کاربرد مدل‌های DDDP و CSDP جهت شکست ابعاد و کاهش محاسبات بعنوان جایگزینی بترتیب برای مدل‌های DP و SDP بررسی گردید. این مدلها در یک سیستم شش مخزنی بر روی رودخانه‌های کارون، بازفت و خرسان بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های DP و SDP در سیستم شش مخزنی کارایی خود را از دست داده و علاوه بر طولانی شدن زمان محاسبات، از حل بهینه نیز دور می‌شوند. این در حالیست که اگر تعداد گسسته‌سازیهای حجم ذخیره در مدل‌های DP و SDP از مقدار فرض شده، یعنی بترتیب ۵ و ۴ کلاس، فراتر رفته و بسمت مقادیر واقعی (در حدود ۳۰ کلاس) افزایش یابد، عملاً در چنین سیستمی با شش مخزن، امکان استفاده از این روشها غیرممکن خواهد شد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که زمان و حافظه مورد نیاز

Foufoula – Georgiou, Efi and P.K. Kitandis, (1988), "Gradient Dynamic Programming for Stochastic Optimal Control of Multidimension Water Resources Systems", Water Resources Research, 24(8):1345-1359.

Hashimoto T., J.R. Stedinger, and D.P. Loucks (1982), "Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation", Water Resources Research, 18(1):14-20..

Heidari, M., (1970), "A Differential Dynamic Programming Approach To Water Resources System Analysis", PhD Thesis, Urbana, Illinois.

Heidari, M., Ven Te Chow, P.V. Kokotovic and D.D. Meredith, (1971), "Discrete Differential Dynamic Programming Approach to Water Resources Systems Optimization", Water Resources Research, 7(2):273-282.

Jamshidi M. and M. Heidari (1977), "Application of Dynamic Programming to Control Khuzestan Water resources System", Automatica 13:287-293

Larson, Robert E. , (1968), "State Incremental Dynamic Programming", Stanford Research Institute, Menlo Park, California.

Loucks, D.P., (1970), "Some Comments on Linear Decision Rules and Chance Constraints", Water Resources Research, 6(2).

Loucks D.P., J.R. Stedinger and D.A. Haith, (1981), "Water Resources Systems Planning and Analysis", Printice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 559 pp.

Murray, D.M. and S.J. Yakowitz, (1979), "Constrained Differential Dynamic Programming and Its Application to Multireservoir Control", Water Resources Research, 15(5):1017-1027.

Oliveira R. and D. P. Loucks, 1997, "Operating Rules for Multireservoir Systems", Water Resources Research, 33(4), 839-852

Peng C.S. and N. Buras (2000), "Dynamic Operation of Surface Water Resources System", Water Resources Research, 36(9):2701-2709

[۴] در مدل‌های DDDP و CSDP نسبت به مدل‌های اولیه DP و SDP به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

جدول (۹) - مقایسه معیارهای کارایی سیستم در دو نوع

ضریب فرضی برای تابع هدف

مدل	ضرایب	آسیب‌پذیری میانگین	اعتمادپذیری کمی	اعتمادپذیری
DP	مساوی	۰/۱۸	۰/۹۷	۰/۸۳
	متغیر	۰/۱۲	۰/۹۸	۰/۸۷
DDDP	مساوی	۰/۲۶	۰/۹۰	۰/۶۹
	متغیر	۰/۲۰	۰/۹۶	۰/۷۶
SDP	مساوی	۰/۲۳	۰/۹۷	۰/۸۲
	متغیر	۰/۱۷	۰/۹۷	۰/۸۲
CSDP	مساوی	۰/۲۲	۰/۹۷	۰/۸۳
	متغیر	۰/۱۸	۰/۹۷	۰/۸۲

[۵]

[۶]

[۷]

[۸]

[۹]

[۱۰]

[۱۱]

[۱۲]

[۱۳]

[۱۴]

## ۱- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از سازمان مدیریت منابع ایران (وابسته به وزارت نیرو) که پشتیبانی مالی این تحقیق را بعهده داشت تشکر و قدردانی می‌شود.

## ۱۱- مراجع

- [۱] برهانی داریان ع. و احمدی، م.ح.، ۱۳۸۳، "تدوین مدل بهینه بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی با استفاده از روش کریدور در DP"، مجله بین‌المللی علوم مهندسی، جلد ۱۵، شماره ۴ (پاییز)، صفحه ۲۰۳-۲۲۷.
- [۲] برهانی داریان ع. و احمدی، م.ح.، ۱۳۸۴، مدل ریاضی بهره‌برداری بهینه از سیستم چندمخزنی چند منظوره، پروژه شماره ۸۱۰۶۲-۲ WRE سازمان مدیریت منابع آب ایران، معاونت پژوهشی.
- [۳] Esat V. and M.J.Hall, (1994), "Water Resources System Optimisation Using Genetic Algorithms", Mydroinformatics' 94, 225-231

- Sharif M. and R. Wardlaw, 2000, "Multireservoir Systems Optimization Using Genetic Algorithms: Case Study", J. of Computing in Civil Engineering, ASCE, 14(4):255-263.
- Turgeon, A., (1980), "Optimal Opration of Multireservoir Power Systems with Stochastic Inflows", Water Resources Research, 16(20):275-283.
- Yeh W. W-G. (1985), "Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review", Water Resources Research, 21(12): 1797-1818
- [۱۸] Perera B.J.C. and G.P. Codner, (1996), "Reservoir Targets for Urban Water Supply Systems", J. of Water Resources Planning and Management, ASCE, 122(4):270-279
- [۱۹] Ponnambalam, K. and B.J. Adams, (1996), "Stochastic Optimization Of Multireservoir System Using a Hearistic Algorithm: Case Study From India", Water Resources Research, 32(3):733-741.
- [۲۰] ReVelle, C., Joeres, E., and Kirby W., 1969, "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design. 1. Development of the Stochastic Model", Water Resources Research, 5(4)
- [۱۵]
- [۱۶]
- [۱۷]

Archive of SID