



## قاعده بهره‌برداری از سد در خشکسالیها

**احمد ابریشم چی**

دانشیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران

**مسعود تجریشی**

استادیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران

**بهداد چهره نگار**

کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران

### چکیده:

یکی از موضوعهای مهم در مدیریت منابع آب، بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد است. این موضوع با افزایش تقاضا و به ویژه در سالهای خشک اهمیت بیشتری می‌یابد. یک قاعده بهره‌برداری بهینه که برای سالهای خشک محاسبه شده باشد به گونه چشمگیری می‌تواند خسارتها و تنشهای ناشی از کمبود آب را کاهش دهد. با پدیده خشکسالی به شیوه‌های گوناگونی می‌توان برخورد کرد که یکی از شیوه‌های برخورد با این پدیده محدودیت در خروج آب از مخزن سد در زمانهای بحرانی است؛ لکن باید توجه داشت که چگونگی برخورد با این مسأله اهمیت زیادی دارد. در این مقاله، مدل بهره‌برداری بهینه از یک مخزن تأمین آب در سالهای خشک ارائه شده است. با حل این مدل که مدلی خطی و mixed integer است، با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی، قاعده بهره‌برداری بهینه برای خشکترین سال به دست می‌آید. با بهره‌گیری از این قاعده به جای قاعده بهره‌برداری استاندارد (SOP) می‌توان محدودیت را در مرحله‌های گوناگون اعمال کرد. با توجه به میزان حجم آب موجود در مخزن و پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن، قاعده بهره‌برداری تعیین می‌کند که در هر مرحله، خروجی از مخزن به چه ميزانی نسبت به تقاضا کاهش یابد. با این شیوه، در زمانهایی که کمبود آب وجود داشته باشد، خروجی از مخزن کاهش می‌یابد. در این روش با پذیرفتن کمبودهای کوچکتر ولی با فراوانی بیشتر از بروز کمبودهای شدید پیشگیری می‌شود و بنابراین شدت کمبود بیشینه کاهش می‌یابد. با حل این مدل، حجمهای بهینه‌ای که در آنها مرحله‌های گوناگون محدودیت آغاز می‌شود به دست می‌آید. در واقع با بهره‌گیری از این حجمها می‌توان برای هر دوره، منحنی فرمان را رسم کرد و از آن بهره جست.

**واژه‌های کلیدی:** خشکسالی، قاعده محدودیت، جیره‌بندی، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

### مقدمه و مروری بر پژوهشهای گذشته:

آب، نخستین نیاز انسان برای زندگی و مهمترین عامل در پیدایش تمدنهاست. همواره تمدنهای بزرگ در کنار یک منبع آب همیشگی شکل گرفته‌اند. ایرانیان باستان از دورترین زمانها چهار عنصر آب، باد، خاک و آتش را گرامی می‌داشته‌اند. در کشوری چون

ایران که از آب فراوان برخوردار نیست، آب و تقدس آن از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده است [۱]. در اسطوره‌های ایرانی هم به نام آناهیتا یا فرشته نگهبان آب برمی‌خوریم که نام وی برای نخستین بار در کتیبه‌های اردشیر دوم در همدان و شوش دیده شده است که نشان از اهمیت ویژه‌ایرانیان به آب دارد [۲]. از دیرباز ایرانیان با مسأله آب و کمبود آب و خشکسالی روبرو بوده‌اند؛ چنانکه در کتیبه‌های باستانی تخت جمشید این جمله را می‌بینیم که "... اهورا مزدا این مرز و بوم را، از کینه، از دشمن، از دروغ، از خشکسالی بیایاد... [۳]. امروزه نیز با توجه به اینکه بیش از دو سوم مساحت ایران را منطقه‌هایی با اقلیم خشک و نیمه خشک در بر می‌گیرد و همچنین میانگین بارندگی در ایران کمتر از یک سوم میانگین بارش جهانی است، پدیده خشکسالی پدیده‌ای با اهمیت به شمار می‌رود و باید توجه ویژه‌ای به آن داشت. سدهای مخزنی به عنوان یک منبع تأمین آب در سالهای خشک بسیار تحت تأثیر قرار می‌گیرند و بهره‌برداری از آنها اهمیت بیشتری می‌یابد.

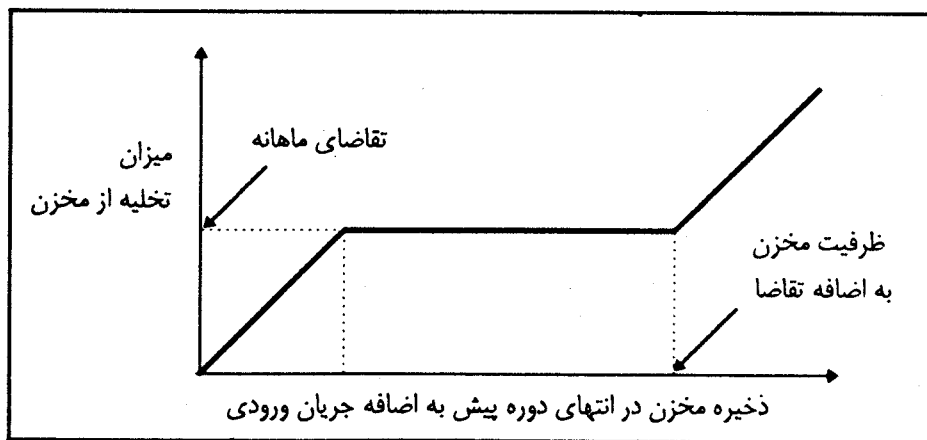
برای بهره‌برداری از مخزن روشهای بسیاری وجود دارد؛ لکن درباره روشهایی که ویژه سالهای خشک باشد بررسیهای اندکی انجام شده است. از آنجایی که رابطه خسارت و کمبود یک رابطه محدب است، کم کردن کمبود بیشینه یکی از هدفهای مهم در سالهای خشک می‌باشد. هدف از انجام این مقاله یافتن قاعده‌ای برای بهره‌برداری از مخزن در سالهای خشک می‌باشد که کمبود بیشینه و در نتیجه خسارت ناشی از خشکسالی را کاهش دهد.

یکی از نخستین روشهای طراحی مخزن توسط پژوهشگری به نام Rippl ارائه شده است [۴]. او در سال ۱۸۸۳ برای نخستین بار روش طراحی ترسیمی را برای طراحی یک مخزن تأمین آب پیشنهاد کرد. روش ریپل به صورت روش دیاگرام جرم (Mass Diagram) تکامل یافت که این روش امروزه هنوز هم توسط برنامه ریزان منابع آب بکار می‌رود [۵و۴]. یکی از محدودیتهای روش ریپل، بکار بردن تقاضای ثابت است. در اوایل سال ۱۹۶۰، Thomas یک روش ساده پیشنهاد کرد که آنرا روش Sequent Peak نامید. با این روش، طراحی مخزن با توجه به تقاضای متغیر انجام می‌گیرد [۶]. اولین پیشنهاد کاربرد برنامه ریزی خطی برای بهره‌برداری و طراحی یک مخزن تأمین آب توسط Dorfman در سال ۱۹۶۲ پیشنهاد شد [۵]. در سالهای اخیر به تحلیل سیستم‌های تأمین آب هم از دیدگاه روش کار و هم از نظر مدیریت تأمین آب، توجه بیشتری شده است [۷]. بیشتر روشهای پیشنهادی برای کمک به مدیران تأمین آب در زمینه تصمیم‌گیری برای تعدیل خشکسالی و برای انتخاب قاعده بهره‌برداری یا اقدامهای ضروری در زمان خشکسالیهای شدید و همچنین اقدامهایی که خسارت خشکسالی را کمینه می‌کنند، می‌باشد [۷و۵]. Russle و همکارانش در سال ۱۹۷۰، خسارت مورد انتظار خشکسالی را به عنوان تابعی از سطح تنظیم آب به صورت نسبت تقاضا به تأمین آب در قالب فرآیند تصمیم‌گیری، برآورد کردند. Hirsch در سال ۱۹۷۸ با در نظر گرفتن فرضیه‌های درباره تخلیه و اقدامهای اضطراری، احتمال بحران آب در بهره‌برداری مخزن تأمین آب را محاسبه کرده است [۵]. همچنین او در سال ۱۹۸۱ با بهره‌گیری از ۱۰۰ سری جریان ماهانه که به وسیله مدل ARMA (1,1) تولید شده بود و نیز با بهره‌گیری از ذخیره مخزن که بر پایه وضعیت کنونی مخزن و تخلیه ثابت محاسبه شده بود، احتمال اینکه در یک افق زمانی مشخص ذخیره مخزن کمتر از برخی ترازهای مشخص قرار گیرد را برآورد کرده است [۸]. Frick و همکارانش در سال ۱۹۹۰ کفایت یک سیستم تأمین آب برای غلبه بر شرایط خشکی را با شبیه‌سازی کارایی آن در زمان خشکسالیها تخمین زدند [۹]. Unal و Bayazit در سال ۱۹۹۰ بررسی کردند که با بکارگیری قاعده‌های محدودیت (Hedging Rule) گوناگون، اخص‌های عملکرد یک مخزن تأمین آب چگونه تغییر می‌کند. برای این منظور از یک مدل شبیه‌سازی و سری‌های جریان فصلی تولید شده استفاده کردند. آنها تعامل (Trade Off) بین شاخص‌های عملکرد قابلیت اعتماد (Reliability)، برگشت‌پذیری (Resiliency) و آسیب‌پذیری (Vulnerability)، برای پارامترهای گوناگون یک قاعده بهره‌برداری استاندارد (Standard Operating Policy, SOP) اصلاح شده را محاسبه کردند [۱۰]. Revelle و Shih در سال ۱۹۹۴ دو روش برنامه‌ریزی ریاضی را مقایسه کردند تا پارامترهای یک قاعده محدودیت خطی برای استفاده در یک مخزن در طول

یک مدت خشکی ۳۶ ماهه تاریخی را با هدف کمینه کردن بیشینه کمبود ماهانه تعیین کنند. در این حالت، جیره‌بندی هنگامی آغاز می‌شود که مجموع ذخیره کنونی به اضافه ورودی پیش بینی شده در دوره آینده کمتر از حجم مشخصی باشد [۵]. Cancellire و همکاران در سال ۱۹۹۸، حساسیت یک مخزن تأمین آب به خشکسالی را بررسی کردند. آنها جریان تنظیم نشده ورودی ماهانه را با بهره‌گیری از یک مدل PAR(1) تولید کردند تا اینکه شامل ۲۰۰ پدیده خشکی شود. آنها برای تشخیص خشکسالی از مفهوم 'Run' (Dracup) و همکاران (۱۹۸۰) بهره گرفتند. حساسیت (Susceptibility) یک مخزن تأمین آب به شرایط خشکی برای دو الگوی تقاضای مختلف یعنی تقاضای یکنواخت در طول سال و همچنین مجموع تقاضای یکنواخت و تقاضای فصلی را با استفاده از قاعده بهره‌برداری استاندارد و قانونهای محدودیت بررسی کردند [۷].

### خشکسالی و بهره‌برداری از مخزن در سالهای خشک:

از دیدگاه هیدرولوژیکی، خشکسالی به صورت کاهش آب موجود در منابع آب طبیعی (رودخانه، سفره آب زیرزمینی و غیره) تعریف می‌شود که بوسیله خشکی‌های هواشناسی بوجود می‌آید [۷]. کمبود آب، بر سیستم اجتماعی - اقتصادی تأثیر می‌گذارد و باعث خسارتهای اقتصادی و اثرهای اجتماعی محسوس و نامحسوس می‌شود. این خسارت به اقدامهایی که برای کاهش تأثیر خشکسالی انجام می‌گیرد نیز بستگی دارد. میزان کمبود نیز به تقاضای آب و اقدامهایی که برای تعدیل خشکسالی انجام می‌شود بستگی دارد. در شبیه‌سازی عملکرد مخزن تأمین آب و نیز در زمان بهره‌برداری واقعی از مخزن، اغلب از قاعده بهره‌برداری استاندارد استفاده می‌شود. این قاعده تنها هنگامی بهینه است که هدف کاهش دادن کل کمبود باشد [۱۱]. شکل ۱، قاعده بهره‌برداری استاندارد را نشان می‌دهد.

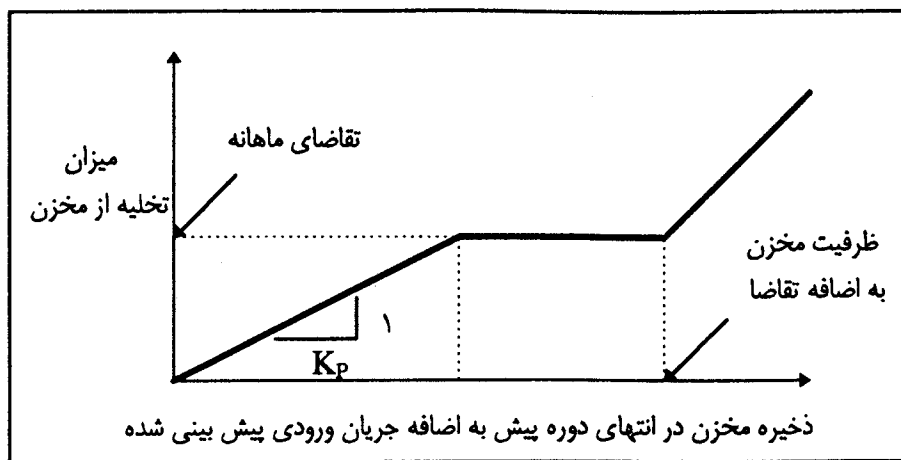


شکل (۱): قاعده بهره‌برداری استاندارد

با توجه به این قاعده، هنگامی که حجم ذخیره در مخزن به اضافه جریان پیش بینی شده کمتر از تقاضای ماهانه باشد، کل این حجم از مخزن خارج می‌شود و ذخیره مخزن به صفر می‌رسد، یعنی خروجی از مخزن با توجه به شیب یک به یک تعیین می‌شود. بنابراین در دوره بعدی تنها آب ورودی تأمین کننده خروجی خواهد بود. این حالت که بیشتر در سالهای خشک رخ می‌دهد مورد علاقه مدیران آب نیست. هنگامی که خشکی آغاز می‌شود، مدیران آب کوشش می‌کنند تا خسارتهای کلی ناشی از عدم توانایی تأمین تقاضای معمولی را تا حد اکثر مقدار ممکن کاهش دهند. در بیشتر وضعیتهای، مقدار واقعی خسارتهای اقتصادی در دسترس نیست و از آنجایی که تابع خسارت، محدب<sup>۱</sup> است، قانونهایی مورد نیاز است تا کمبود بیشینه یا کل کمبود مورد انتظار را کمینه کند [۵]. به طور کلی در یک خشکی

حقیقی یا در شرف وقوع دیده شده است که مدیران مسؤوّل تأمین آب ، کمبودهای کوچک با فراوانی بیشتر را به کمبودهای شدید ولی با فراوانی کمتر ترجیح می دهند .

مدیران برای کاهش مصرف و حفظ ذخیره آب برای استفاده در آینده ، به طور موقت از جیره‌بندی استفاده می‌کنند [۱۲] . اگر مخزن تأمین آب وارد یک دوره خشکی شود ، مدیران آب به مقدارهای کمی نیاز دارند تا آغاز محدودیت و جیره‌بندی و نیز مقدار محدودیت در خروج آب از مخزن را مشخص کنند که این مقادیر از قاعده های محدودیت بدست می آیند . یکی از راههای اعمال محدودیت ، بهره‌گیری از قاعده محدودیت پیوسته است . در این حالت ، هنگامی که در شرایط خشکی قرار داشته باشیم مقدار خروجی از مخزن کاهش می‌یابد (شکل ۲) .



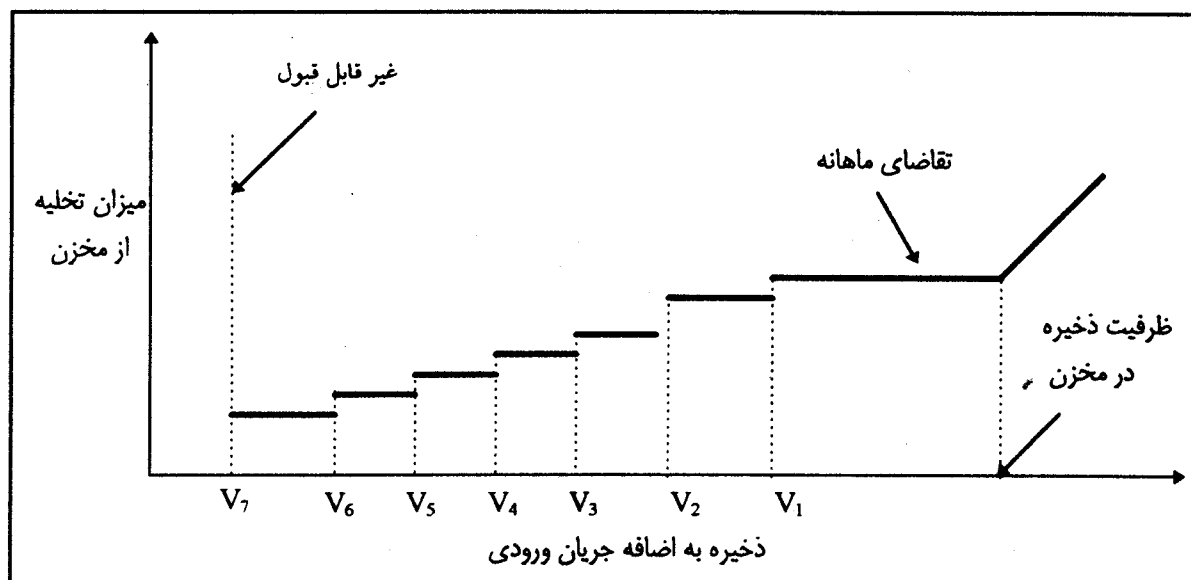
شکل (۲): قاعده محدودیت پیوسته

طبق این قاعده ، میزان خروجی با توجه به حجم ذخیره آب در مخزن به اضافه حجم جریان پیش بینی شده یا جریان ورودی برای هر دوره مشخص می‌شود . این منحنی فرمان برای هر دوره به طور جداگانه محاسبه می‌شود . همانگونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، شیب خطی که مقدار خروجی از مخزن را مشخص می‌کند کمتر از یک می‌باشد ، چون در حالتی که  $K_p=1$  باشد ، همان قاعده بهره‌برداری استاندارد به دست می‌آید . به همین دلیل ممکن است مقدار حجم ذخیره در مخزن به اضافه حجم جریان ورودی در دوره ای برای تأمین کامل تقاضا کافی باشد ؛ لکن با توجه به این قاعده ، میزان خروجی از مخزن نسبت به تقاضا کاهش می‌یابد تا در دوره های بعد که احتمال کمبود آب وجود دارد ، کمبود شدید رخ ندهد . در حالتی که تقاضا به طور کامل برآورده نمی‌شود ، مقدار خروجی از مخزن از رابطه زیر بدست می‌آید که مقدار  $K_p$  را با بهره‌گیری از برنامه های بهینه‌سازی می‌توان محاسبه کرد :

$$( \text{ورودی پیش بینی شده} + \text{ذخیره} ) ( 1 / K_p ) = \text{میزان خروجی}$$

از دیگر روشهای اعمال محدودیت ، بهره‌گیری از قاعده محدودیت مرحله‌ای است که در این مقاله به آن پرداخته شده است . در این روش در حقیقت جیره‌بندی به صورت مرحله‌ای انجام می‌شود . برای مثال در مرحله اول خروجی  $a_1\%$  کاهش می‌یابد ، در مرحله بعد  $a_2\%$  و به همین ترتیب شدت محدودیت افزایش می‌یابد . یکی از برتریهای این روش این است که از آنجایی که درصدهای کاهش میزان تخلیه از مخزن در هر مرحله ، از پیش تعیین می‌شود می‌توان برای هر مرحله از محدودیت برنامه‌ریزی ویژه‌ای داشت و از پیش تعیین کرد که برای هر مرحله کاهش در میزان تخلیه چه اقدامهایی باید انجام گیرد . شکل ۳ نمونه ای از قاعده محدودیت شش مرحله‌ای را نشان می‌دهد . در این شکل ، محدودیت در شش مرحله به کار برده شده که به تدریج میزان محدودیت افزایش می‌یابد . برای مثال در موردی که در این مقاله در نظر گرفته شده در مرحله اول از اعمال محدودیت  $20\%$  از خروجی نسبت به تقاضا کاسته می‌شود ، در مرحله دوم  $30\%$  ، در مرحله سوم  $40\%$  ، در مرحله چهارم  $50\%$  ، در مرحله پنجم  $60\%$  و در مرحله ششم  $70\%$  از خروجی نسبت به تقاضا کاسته می‌شود . باید

یادآور شد که در اینجا به گونه‌های برنامه‌ریزی شده که همواره دست کم ۳۰٪ از تقاضا تأمین شود. برای تعیین این قاعده بهره‌برداری نیاز است که حجم‌های  $V_1$  تا  $V_7$  برای همه ماه‌های سال تعیین شوند و برای اینکه این حجم‌ها به صورت بهینه تعیین شوند باید از یک برنامه‌ریزی ریاضی بهره گرفت.



شکل (۳): قاعده محدودیت مرحله‌ای

برای حل مدل‌های بهینه‌سازی نرم‌افزارهای گوناگونی وجود دارد اما در حل این مدل از نرم‌افزار GAMS که به وسیله بانک جهانی تهیه شده بهره گرفته شده است. با اجرای مدل بهینه‌سازی، حجم‌های  $V_1t, V_2t, V_3t, V_4t, V_5t, V_6t, V_7t$  با توجه به تقاضای هر ماه  $t$  و میزان آب موجود در مخزن به اضافه آب ورودی به مخزن بدست می‌آید. در این مدل برای هر مرحله از محدودیت یک متغیر صفر یا یک اختصاص یافته است. این متغیرها برای مرحله‌های یک تا شش از ماه  $t$  ام به صورت  $y_1t, y_2t, y_3t, y_4t, y_5t, y_6t$  نامگذاری شده‌اند. به این گونه که برای مثال اگر در ماه اول  $y_1 = 1$  باشد، یعنی در آن ماه محدودیت نداشته ایم. اگر  $y_1 = 0$  و  $y_2$  تا  $y_6$  برابر یک باشند، یعنی در این ماه تنها مرحله نخست از محدودیت وجود دارد. اگر  $y_1 = 0$  و  $y_2 = 0$  و  $y_3$  تا  $y_6$  برابر یک باشند، یعنی در این ماه مرحله دوم از محدودیت اجرا می‌شود. به همین ترتیب اگر  $y_1$  تا  $y_6$  همگی برابر صفر باشند، یعنی در این ماه مرحله ششم محدودیت بکار می‌رود و تنها ۳۰٪ از تقاضا برآورده می‌شود که این مقدار هم به عنوان یک قید در مدل بهینه‌سازی بکار رفته است. با توجه به نوع مسأله و وجود متغیرهای صفر یا یک، برای مدل‌سازی از برنامه ریزی عدد صحیح مختلط بهره گرفته شده است. در ضمن در این مدل برخلاف بیشتر مطالعه‌های انجام شده، به جای یک تقاضای ثابت در طول سال از تقاضای متغیر ماهانه استفاده شده است.

قاعده‌های محدودیت می‌تواند براساس یک مقدار از ذخیره یا یک مقدار از ذخیره به اضافه جریان پیش‌بینی شده آغاز شود. اگرچه در برخی از بررسی‌های مربوط به قاعده‌های بهره‌برداری برای مخزن‌های چندمنظوره از حجم ذخیره استفاده شده، در این پژوهش برای تعیین حجم‌های آغاز مرحله‌های گوناگون محدودیت از ذخیره کنونی به اضافه جریان ورودی پیش‌بینی شده استفاده شده است. البته از آنجایی که در این پژوهش از داده‌های تاریخی بهره گرفته شده، فرض بر این است که پیش‌بینی جریان آینده کاملاً درست می‌باشد. بنابراین مرحله‌های محدودیت بر پایه ذخیره موجود در مخزن به اضافه جریان ورودی در هر ماه تعیین می‌شود.

هر مدل بهینه‌سازی به تابع هدف نیاز دارد تا با توجه به قیدها و ویژگی‌های مسأله بهینه شود. برای این مدل بهینه‌سازی نیز هدف‌های گوناگونی می‌توان در نظر گرفت. در این پروژه چند تابع هدف در نظر گرفته شده اما تابع هدفی که بهترین پاسخ را به دست داد

عبارت است از بیشینه کردن مجموع  $y_{1t}, y_{2t}, y_{3t}, y_{4t}, y_{5t}, y_{6t}$  با فرض اینکه برای حجم آب موجود در مخزن در پایان دوره قیدی مشخص نشده باشد که در اینجا دوره بهره‌برداری برابر یک سال در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن این هدف، حجم های  $V_{1t}, V_{2t}, V_{3t}, V_{4t}, V_{5t}, V_{6t}, V_{7t}$  که در آنها مرحله های گوناگون محدودیت آغاز می‌شود بدست می‌آید. در ضمن برای اینکه از پاسخ های مشابه جلوگیری شود یک بخش به این هدف افزوده شده که مجموع  $V_{1t}, V_{2t}, V_{3t}, V_{4t}, V_{5t}, V_{6t}, V_{7t}$  را کمینه کند. البته برای اینکه از هر اثری روی هدف اصلی جلوگیری شود، یک وزن کوچک به مجموع  $V$  ها داده شده است. حجم های کوچکتر به گونه کلی یعنی فراوانی کمتر محدودیت؛ بنابراین منطقی است که حجمها تا حد امکان کوچک باشد. تابع هدف مورد استفاده در زیر آمده است:

$$\text{maximize} \left( \sum_{t=1}^{12} (y_{1t} + y_{2t} + y_{3t} + y_{4t} + y_{5t} + y_{6t}) - 0.0001 \sum_{t=1}^{12} (V_{1t} + V_{2t} + V_{3t} + V_{4t} + V_{5t} + V_{6t} + V_{7t}) \right) \quad (1)$$

### مطالعه موردی - سد درودزن:

در این پژوهش سد مخزنی درودزن بر روی رودخانه کُر در استان فارس به عنوان مطالعه موردی برگزیده شده است. سد درودزن حدود ۱۰۰ کیلومتری شمال باختری شیراز در محلی که رودخانه کُر از تنگه ای در نزدیکی روستای درودزن می گذرد ساخته شده است. این سد از گونه خاکی همگن به ارتفاع ۶۰ متر و طول تاج ۷۱۰ متر ساخته شده و آبیگری آن در تابستان ۱۳۵۰ آغاز و در تیرماه ۱۳۵۱ پر گردیده است [۱۳].

هدفهای ساخت سد درودزن شامل موردهای زیر است:

- تنظیم آب مورد نیاز کشاورزی زمینهای پایاب سد

- تولید انرژی برقایی

- تأمین بخشی از آب شهر شیراز

- تأمین آب صنایع

حجم مخزن سد در تراز نرمال بهره‌برداری برابر ۹۹۳ میلیون متر مکعب و حجم آن در تراز کمینه بهره‌برداری برابر ۱۳۳ میلیون متر مکعب می‌باشد بنابراین حجم مفید مخزن سد برابر ۸۶۰ میلیون متر مکعب می‌باشد [۱۳]. توزیع ماهانه مجموع نیازهای شهری و صنعتی و کشاورزی به صورت جدول ۱ می‌باشد. در این مطالعه از ۳۵ سال داده موجود آورد رودخانه در محل سد بهره گرفته شده است. این داده ها دربرگیرنده سال آبی ۱۳۴۳-۴۴ تا ۱۳۷۷-۷۸ هستند. در میان داده‌های موجود، سال آبی ۴۵-۱۳۴۴ دارای کمترین آورد می‌باشد و به همین دلیل برای برنامه‌ریزی و تعیین حجمهای  $V_1$  تا  $V_7$  برگزیده شد. در سال یاد شده کل حجم آب ورودی برابر با ۳۴۷/۹۶ میلیون متر مکعب بوده است.

جدول (۱): توزیع ماهانه نیاز کل (MCM)

مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۲۹/۳	۳/۹	۳/۹	۳/۹	۳/۹	۳/۸	۱۰۸/۱	۱۷۱/۹	۱۵۹/۳	۱۴۰/۲	۱۴۸/۴	۱۴۵/۴

جدول ۲ توزیع ماهانه آبدی رودخانه کر را در این سال نشان می‌دهد. پس از اجرای مدل بهینه‌سازی حجمهای  $V_1$  تا  $V_7$  برای ماههای مختلف سال آبی ۴۵-۱۳۴۴ بدست می‌آید و بنابراین با داشتن این حجمها می‌توان قاعده بهره‌برداری از مخزن را رسم کرد. با داشتن قاعده بهره‌برداری از مخزن می‌توان رفتار سیستم را با استفاده از قاعده بهره‌برداری بدست آمده (قاعده محدودیت) شبیه‌سازی کرد و نتیجه‌ها را با نتیجه شبیه‌سازی بدست آمده از قاعده استاندارد مقایسه کرد. برای این منظور در محیط نرم‌افزار EXCEL برنامه‌ای برای شبیه‌سازی عملکرد سیستم با توجه به قاعده محدودیت و استاندارد نوشته شده است. پس از شبیه‌سازی عملکرد مخزن در سال آبی

۱۳۴۴-۴۵ نتیجه‌های زیر به صورت جدول ۳ بدست آمد. با توجه به این جدول دیده می‌شود که مقدار کل کمبود با بهره‌گیری از قاعده استاندارد و قاعده محدودیت عدد یکسانی را به دست داده است؛ اما مقدار کمبود بیشینه ماهانه با توجه به قاعده محدودیت مقدار کمتری شده است. البته همانطور که انتظار می‌رفت تعداد ماههای کمبود با توجه به قاعده محدودیت بیشتر از قاعده استاندارد شده است؛ اما مقدار کمبود متوسط با توجه به قاعده محدودیت عدد کمتری را نشان می‌دهد. در جدول ۳ کل کمبود به اینگونه محاسبه شده که کمبود در هر ماه محاسبه شده و با هم جمع شده اند. کمبود بیشینه هم نشان‌دهنده بیشترین کمبود ماهانه می‌باشد. کمبود متوسط نیز از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$AD = \frac{1}{m} \sum_{y=1}^n \frac{[D-R]}{D}$$

(۲)

که در این رابطه،  $m$  تعداد ماههای کمبود،  $n$  تعداد سالها،  $D$  تقاضا و  $R$  خروجی می‌باشد.

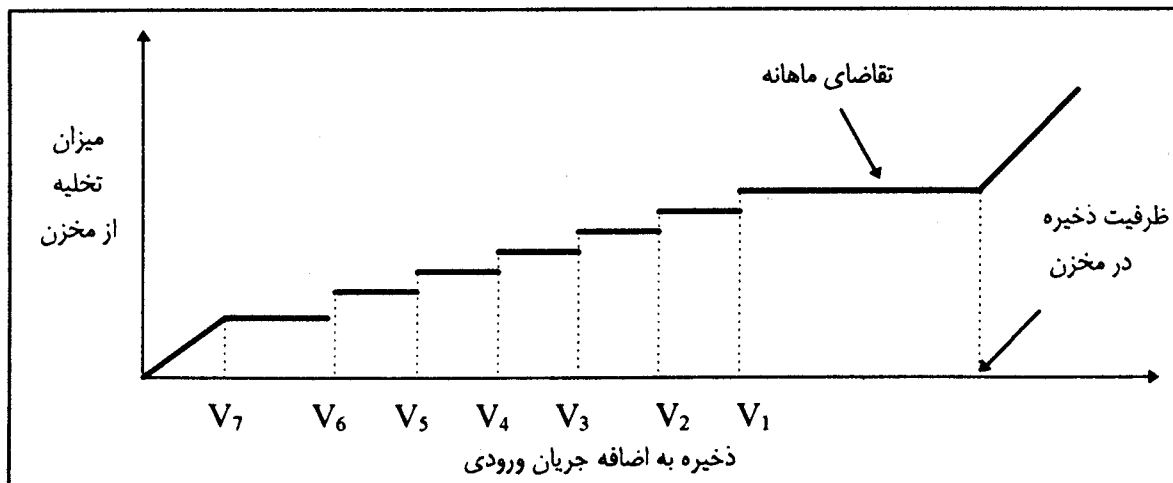
جدول (۲): توزیع ماهانه آبدهی رودخانه کر در سال آبی ۱۳۴۴-۴۵ (MCM)

شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر
۱۷/۰	۱۸/۹	۱۹/۲	۲۰/۴	۲۸/۳	۴۶/۸	۴۱/۲	۴۲/۳	۳۴/۱	۳۰/۰	۲۷/۹	۲۱/۸

جدول (۳): نتیجه‌های بدست آمده از شبیه سازی برای سال آبی ۱۳۴۴-۴۵

کل کمبود (MCM)		کمبود بیشینه (MCM)		فراوانی ماههای کمبود		کمبود متوسط	
قاعده	محدودیت	قاعده	محدودیت	قاعده	محدودیت	قاعده	محدودیت
۲۷۰	۲۷۰	۱۲۹/۵	۱۰۱/۰	۳	۶	۰/۶	۰/۳

با توجه به جدول ۳ دیده می‌شود با اینکه قاعده محدودیت فراوانی کمبودها را افزایش داده است اما کمبود بیشینه و کمبود متوسط کاهش یافته است و این در حالی است که مقدار کل کمبود برای قاعده استاندارد و محدودیت عددی یکسان است. این جدول برتری قاعده محدودیت بر استاندارد را نشان می‌دهد. قاعده محدودیت با این فرض محاسبه شده که میزان ورودی به مخزن کاملاً مشخص باشد و به عبارتی دیگر پیش‌بینی جریان ورودی کاملاً درست باشد؛ ولی از آنجایی که در عمل نمی‌توان با اطمینان ۱۰۰٪ جریان آینده را پیش‌بینی کرد، قاعده محدودیت بدست آمده بر پایه سال آبی ۱۳۴۴-۴۵ یعنی خشکترین سال در میان آمار موجود را برای سالهای دیگر نیز بکار برده می‌شود. البته باید توجه داشت هنگامی که از قاعده بدست آمده برای سال ۱۳۴۴-۴۵ برای سالهای دیگر استفاده می‌شود شکل این قاعده به صورت شکل ۴ تغییر می‌یابد.



شکل (۴): قاعده محدودیت مرحله‌ای در هنگام بهره‌برداری

تفاوت این قاعده تنها در این است که اگر خشکی شدیدتر از سال ۴۵-۱۳۴۴ رخ دهد یا توزیع ماهانه جریان ورودی با سال ۴۵-۱۳۴۴ متفاوت باشد و مقدار جریان ورودی به اضافه ذخیره در مخزن در ماهی کمتر از حجم ۷۷ شود خروجی از مخزن با یک شیب یک به یک انجام می‌گیرد. نتیجه مقایسه بین قاعده استاندارد و محدودیت برای سالهایی که عملکرد این دو قاعده متفاوت بوده‌اند در جدول ۴ آمده است. با توجه به جدول ۴ دیده می‌شود که در ۵ سال قاعده محدودیت باعث کاهش در مقدار کمبود بیشینه ماهانه شده است و باید یادآور شد که در این سالها مقدار کل کمبود برای قاعده استاندارد و قاعده محدودیت باهم برابر بوده است. در بقیه سالهایی که آمار موجود بوده است رفتار قاعده استاندارد و محدودیت کاملا یکسان بوده و در هیچ سالی قاعده محدودیت نتیجه‌ای بدتر از قاعده استاندارد را در پی نداشته است.

**جدول (۴): سالهایی که قاعده محدودیت برتر از قاعده استاندارد می‌باشد**

سال آبی	ورودی (MCM)	کمبود بیشینه ماهانه (MCM)		فراوانی ماههای کمبود	
		قاعده استاندارد	قاعده محدودیت	قاعده استاندارد	قاعده محدودیت
۱۳۴۳-۴۴	۵۴۴/۴	۷۳/۶	۴۴/۷	۱	۳
۱۳۴۵-۴۶	۵۳۲/۸	۸۵/۲	۴۲/۳	۱	۳
۱۳۴۸-۴۹	۳۹۲/۸	۱۲۵/۲	۶۶/۳	۱	۴
۱۳۴۹-۵۰	۳۵۳/۹	۱۳۲/۲	۹۵/۰	۳	۶
۱۳۶۲-۶۳	۵۱۱/۶	۱۰۶/۴	۶۳/۵	۱	۳

برای اینکه مقایسه دقیقتری بین قاعده محدودیت و قاعده استاندارد انجام گیرد، قاعده محدودیت و استاندارد برای طولانی ترین دوره ای که جریان ورودی به گونه متوالی کمتر از میانگین درازمدت جریان است شبیه سازی شد. در سالهای آبی ۴۷-۱۳۴۳ و ۶۴-۱۳۶۱ مقدار جریان ورودی به مخزن سد به طور متوالی کمتر از میانگین درازمدت جریان می‌باشد. پس از شبیه‌سازی مقدار کمبود بیشینه ماهانه و میانگین کمبود بیشینه ماهانه در طول چهار سال در جدول ۵ آمده است. با توجه به جدول ۵ دیده می‌شود که در هر دو مورد که به مدت چهار سال جریان کمتر از میانگین درازمدت جریان بوده کمبود بیشینه ماهانه با استفاده از قاعده محدودیت کاهش یافته است. همچنین میانگین کمبود بیشینه ماهانه نیز عدد کمتری را نشان می‌دهد. این پارامتر به اینگونه محاسبه می‌شود که کمبود بیشینه ماهانه برای هر سال آبی محاسبه شده و سپس از عددهای بدست آمده میانگین گرفته می‌شود.

**جدول (۵): شبیه سازی در سالهایی که به طور متوالی جریان کمتر از میانگین درازمدت جریان می‌باشد**

سال آبی	کمبود بیشینه ماهانه (MCM)		میانگین کمبود بیشینه ماهانه (MCM)	
	قاعده استاندارد	قاعده محدودیت	قاعده استاندارد	قاعده محدودیت
۱۳۴۳-۴۷	۱۳۰/۷۴	۷۹/۶۷	۹۳/۸۴	۵۲/۷۳
۱۳۶۱-۶۴	۱۳۸/۹۸	۱۲۹/۵	۱۱۲/۱۵	۸۹/۳۹

**مقایسه قاعده محدودیت و استاندارد برای سربهای زمانی تولید شده:**

برای اینکه بتوان بررسیهای گسترده‌تری روی قاعده محدودیت انجام داد، با داشتن داده‌های تاریخی رودخانه کر ۲۵ سری زمانی ماهانه با بهره‌گیری از مدل AR(2) به طول ۵۰ سال (۶۰۰ ماه) تولید شد. با استفاده از نرم افزار EXCEL یک برنامه شبیه‌سازی به طول ۵۰ سال تهیه شد تا بتوان رفتار سیستم را با بکار بردن قاعده محدودیت و قاعده استاندارد مقایسه کرد. نتیجه‌های این شبیه‌سازی در جدول ۶ آمده است. در جدول ۶ پارامترهای کل کمبود، کمبود بیشینه، میانگین کمبود بیشینه و کمبود متوسط برای قاعده محدودیت و قاعده استاندارد محاسبه و مقایسه شده‌اند. در این جدول پارامتر کل کمبود به اینگونه محاسبه شده که در طول ۵۰ سال داده تولید شده



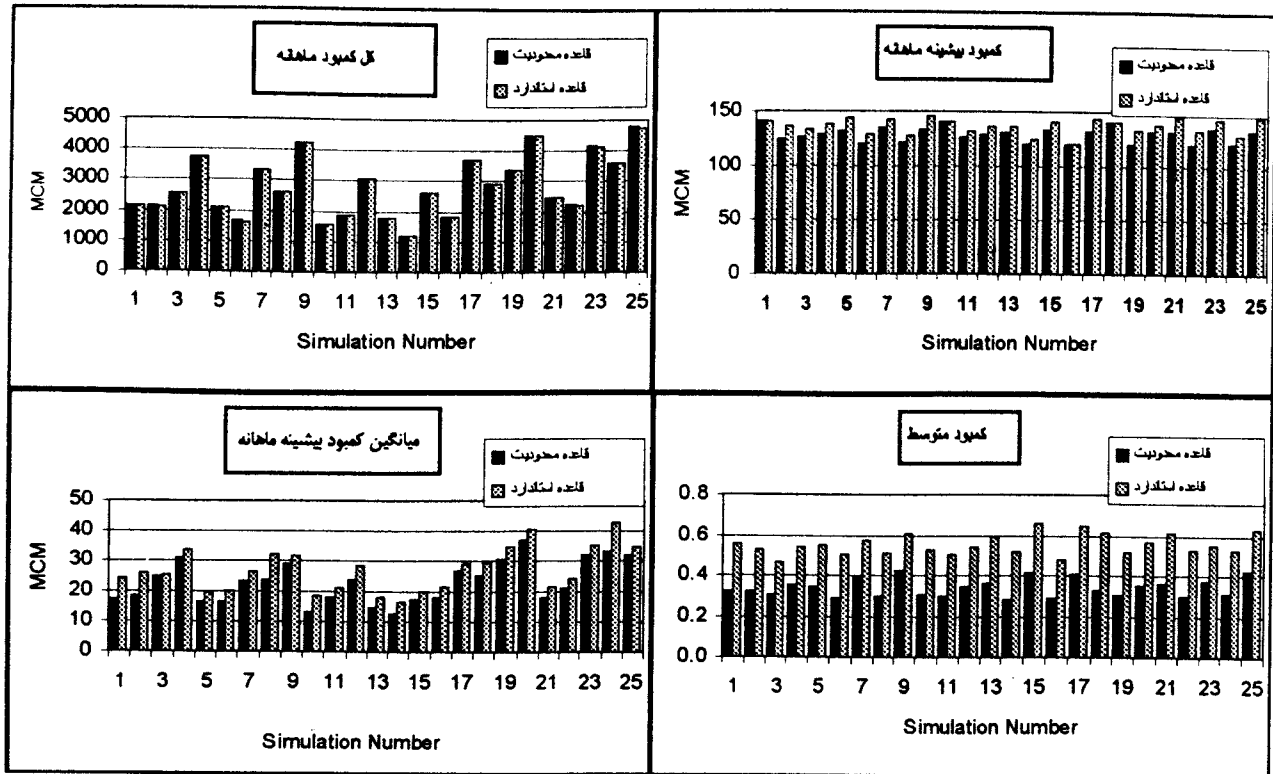
برای هر سری، پس از اعمال قاعده محدودیت و استاندارد، ماههایی که کمبود در آنها رخ داده یعنی تقاضا تأمین نشده محاسبه شده و مقدار کمبودها با هم جمع شده است. پارامتر کمبود بیشینه نشان‌دهنده بیشترین کمبود ماهانه در طول ۵۰ سال یا ۶۰۰ ماه می‌باشد. میانگین کمبود بیشینه به این شکل محاسبه شده که برای هر سال کمبود بیشینه محاسبه شده و سپس از عددهای بدست آمده میانگین گرفته شده است. همچنین کمبود متوسط با استفاده از رابطه ۲ بدست آمده است.

با توجه به جدول ۶ دیده می‌شود که در بیشتر موردها مقدار کل کمبود برای قاعده استاندارد و محدودیت برابر و یا نزدیک به هم هستند. در مورد کمبود بیشینه دیده می‌شود که در بیشتر موردها عددهای قاعده محدودیت کوچکتر هستند که دلیل بر برتر بودن این قاعده می‌باشد. در مورد میانگین کمبود بیشینه و کمبود متوسط دیده می‌شود که در همه موردها قاعده محدودیت پاسخ مناسبتری نسبت به قاعده استاندارد دارد. برای اینکه بتوان دید بهتری از عددهای جدول داشت این عددها به صورت نمودار در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول (۶): مقایسه قاعده محدودیت و استاندارد در ۲۵ سری تولید شده

سری تولید شده	کل کمبود (MCM)		کمبود بیشینه ماهانه (MCM)		میانگین کمبود بیشینه ماهانه (MCM)		کمبود متوسط
	استاندارد	محدودیت	استاندارد	محدودیت	استاندارد	محدودیت	
۱	۲۱۴۹	۲۱۴۹	۱۴۱	۱۴۱	۲۴	۱۸	۰/۱۳۲
۲	۲۱۰۲	۲۱۱۵	۱۳۶	۱۲۴	۲۶	۱۸	۰/۱۳۳
۳	۲۵۳۸	۲۵۳۸	۱۳۴	۱۲۷	۲۵	۲۵	۰/۱۳۱
۴	۳۷۵۵	۳۷۵۵	۱۳۸	۱۳۰	۳۴	۳۱	۰/۱۳۶
۵	۲۱۰۰	۲۱۰۰	۱۴۴	۱۳۲	۲۰	۱۶	۰/۱۳۴
۶	۱۶۱۷	۱۶۶۶	۱۲۹	۱۲۰	۲۰	۱۶	۰/۱۲۹
۷	۳۳۲۰	۳۳۲۰	۱۴۲	۱۳۵	۲۶	۲۳	۰/۱۳۹
۸	۲۵۹۵	۲۶۲۰	۱۲۹	۱۲۱	۳۲	۲۴	۰/۱۳۰
۹	۴۲۰۰	۴۲۳۲	۱۴۵	۱۳۳	۳۲	۲۹	۰/۱۴۲
۱۰	۱۵۷۸	۱۵۷۸	۱۴۱	۱۴۱	۱۸	۱۳	۰/۱۳۰
۱۱	۱۸۷۲	۱۸۷۲	۱۳۳	۱۲۶	۲۱	۱۸	۰/۱۳۰
۱۲	۳۰۵۵	۳۰۵۷	۱۳۷	۱۲۹	۲۹	۲۴	۰/۱۳۴
۱۳	۱۷۶۵	۱۷۶۵	۱۳۷	۱۳۱	۱۸	۱۵	۰/۱۳۶
۱۴	۱۱۸۲	۱۲۱۷	۱۲۵	۱۲۰	۱۶	۱۲	۰/۱۲۸
۱۵	۲۶۱۳	۲۶۱۳	۱۴۱	۱۳۴	۲۰	۱۷	۰/۱۴۲
۱۶	۱۸۱۱	۱۸۱۱	۱۲۱	۱۲۰	۲۲	۱۸	۰/۱۲۹
۱۷	۳۶۹۵	۳۶۹۹	۱۴۴	۱۳۲	۲۹	۲۷	۰/۱۴۱
۱۸	۲۸۹۷	۲۹۳۲	۱۴۲	۱۴۲	۳۰	۲۵	۰/۱۳۳
۱۹	۳۳۸۷	۳۳۸۷	۱۳۴	۱۲۰	۳۵	۳۱	۰/۱۳۰
۲۰	۴۴۸۵	۴۴۹۹	۱۳۸	۱۳۲	۴۱	۳۷	۰/۱۳۵
۲۱	۲۴۲۸	۲۴۲۸	۱۴۵	۱۳۳	۲۲	۱۸	۰/۱۳۶
۲۲	۲۲۰۸	۲۲۳۲	۱۳۳	۱۲۰	۲۴	۲۱	۰/۱۳۰
۲۳	۴۰۹۵	۴۱۸۱	۱۴۵	۱۳۶	۳۵	۳۲	۰/۱۲۸
۲۴	۳۵۹۰	۳۵۹۰	۱۲۹	۱۲۳	۴۲	۳۳	۰/۱۳۲
۲۵	۴۷۵۸	۴۷۸۱	۱۴۶	۱۳۴	۳۵	۳۲	۰/۱۴۳

برای بررسی بیشتر چهار پارامتر دیگر را نیز مورد بررسی قرار می‌دهیم. این چهار پارامتر عبارتند از فراوانی شکست تأمین تقاضا، فراوانی شکست تأمین ۸۰٪ از تقاضا، فراوانی شکست تأمین ۵۰٪ از تقاضا و فراوانی شکست تأمین ۳۰٪ از تقاضا. این عددها در جدول ۷ آمده است. همانگونه که در جدول دیده می‌شود در همه موردها فراوانی شکست قاعده محدودیت بیشتر از قاعده استاندارد می‌باشد یعنی با بهره‌گیری از قاعده محدودیت تعداد ماههای کمبود بیشتر می‌شود که البته این موضوع خود یکی از هدفهای قاعده محدودیت می‌باشد. باید یادآور شد که عددهای جدول ۷ نمایانگر تعداد ماه می‌باشند برای مثال در سری اول، فراوانی شکست در تأمین تقاضا برای قاعده استاندارد ۳۰ می‌باشد که به این معنی است که در کل طول دوره که ۵۰ سال یا ۶۰۰ ماه است در ۳۰ ماه تقاضا به طور کامل برآورده

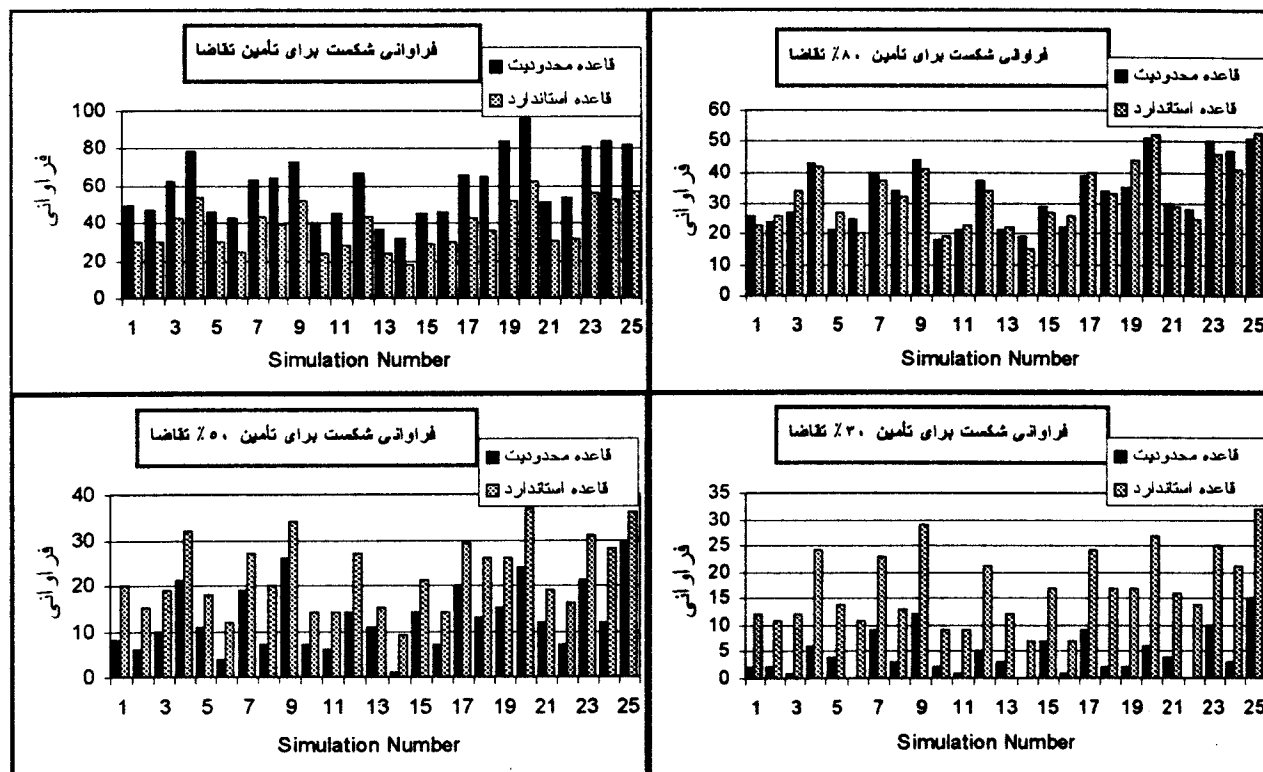


شکل (۵): مقایسه قاعده استاندارد و محدودیت

جدول (۷): مقایسه قاعده محدودیت و استاندارد در ۲۵ سری تولید شده برای تأمین تقاضا در سطحهای مختلف

سری تولید شده	فراوانی شکست در تأمین تقاضا		فراوانی شکست در تأمین تقاضا		فراوانی شکست در تأمین تقاضا		فراوانی شکست در تأمین تقاضا	
	محدودیت	استاندارد	محدودیت	استاندارد	محدودیت	استاندارد	محدودیت	استاندارد
۱	۲	۱۲	۸	۲۰	۲۶	۲۳	۵۰	۳۰
۲	۲	۱۱	۶	۱۵	۲۴	۲۶	۴۷	۳۰
۳	۱	۱۲	۱۰	۱۹	۲۷	۳۴	۶۲	۴۳
۴	۶	۲۴	۲۱	۳۲	۴۳	۴۲	۷۹	۵۴
۵	۴	۱۴	۱۱	۱۸	۲۱	۲۷	۴۶	۳۰
۶	۰	۱۱	۴	۱۲	۲۵	۲۰	۴۳	۲۵
۷	۹	۲۳	۱۹	۲۷	۴۰	۳۷	۶۳	۴۴
۸	۳	۱۳	۷	۲۰	۳۴	۳۲	۶۴	۳۹
۹	۱۲	۲۹	۲۶	۳۴	۴۴	۴۱	۷۳	۵۲
۱۰	۲	۹	۷	۱۴	۱۸	۱۹	۴۰	۲۴
۱۱	۱	۹	۶	۱۴	۲۱	۲۳	۴۵	۲۸
۱۲	۵	۲۱	۱۴	۲۷	۳۷	۳۴	۶۷	۴۴
۱۳	۳	۱۲	۱۱	۱۵	۲۱	۲۲	۳۷	۲۴
۱۴	۰	۷	۱	۹	۱۹	۱۵	۳۲	۱۸
۱۵	۷	۱۷	۱۴	۲۱	۲۹	۲۷	۴۵	۲۹
۱۶	۱	۷	۷	۱۴	۲۲	۲۶	۴۶	۳۰
۱۷	۹	۲۴	۲۰	۲۹	۳۹	۴۰	۶۶	۴۳
۱۸	۲	۱۷	۱۳	۲۶	۳۴	۳۳	۶۵	۳۶
۱۹	۲	۱۷	۱۵	۲۶	۳۵	۴۴	۸۴	۵۲
۲۰	۶	۲۷	۲۴	۳۷	۵۱	۵۲	۹۶	۶۲
۲۱	۴	۱۶	۱۲	۱۹	۳۰	۲۹	۵۱	۳۱
۲۲	۰	۱۴	۷	۱۶	۲۸	۲۵	۵۴	۳۲
۲۳	۱۰	۲۵	۲۱	۳۱	۵۰	۴۶	۸۱	۵۶
۲۴	۳	۲۱	۱۲	۲۸	۴۷	۴۱	۸۴	۵۳
۲۵	۱۵	۳۲	۲۹	۳۶	۵۱	۵۳	۸۲	۵۷

نمی‌شود. اگر به عددهای فراوانی شکست در تأمین ۸۰٪ از تقاضا دقت شود، دیده می‌شود که اختلاف بین قاعده محدودیت و استاندارد کم می‌شود به گونه‌ای که در چندین مورد قاعده محدودیت پاسخ بهتری می‌دهد. اما در مورد فراوانی شکست در تأمین ۵۰٪ و ۳۰٪ از تقاضا دیده می‌شود که همواره قاعده محدودیت نسبت به قاعده استاندارد پاسخ بهتری می‌دهد. برای اینکه بتوان عددهای جدول ۷ را بهتر مقایسه کرد، این عددها به صورت نمودار در شکل ۶ آورده شده‌است.



شکل (۶): مقایسه قاعده استاندارد و محدودیت برای تأمین تقاضا در سطوح مختلف

### جمع بندی و نتیجه گیری :

در این مقاله قاعده محدودیت مرحله‌ای با قاعده استاندارد در سالهای گوناگون، در در دوره های متوالی خشکسالی و همچنین در ۲۵ سری زمانی تولید شده واسنجی شده اند. قاعده محدودیت بیشتر در سالهای خشک اهمیت و کاربرد خود را نشان می دهد که در اینگونه سالها نتیجه ای بهتر از قاعده استاندارد به دست می دهد اما برای رسیدن به بهترین نتیجه باید از یک مدل پیش بینی جریان بسیار دقیق بهره برد که این امر بسیار دشوار و پیچیده است. بنابراین با بهره‌گیری از یک مدل بهینه‌سازی، یک قاعده محدودیت برای خشکترین سال از میان آمار موجود تدوین شد و کاربرد این قاعده برای همه سالهایی که آمار آنها موجود بود با قاعده استاندارد مقایسه شدند. پس از مقایسه دیده شد که قاعده محدودیت در سالهای خشک نتیجه ای بهتر از قاعده استاندارد دارد و در هیچ سالی نتیجه‌ای بدتر از قاعده استاندارد به دست نمی‌دهد.

برای اینکه مقایسه دقیقتر و جامعتر باشد قاعده استاندارد و محدودیت برای ۲۵ سری زمانی تولید شده نیز مقایسه شده‌اند. پس از مقایسه دیده می‌شود با اینکه کل کمبود برای قاعده محدودیت و استاندارد تقریباً برابر می‌باشد اما استفاده از قاعده محدودیت باعث می‌شود که کمبود بیشینه و همچنین کمبود متوسط کاهش یابد. در ضمن با بهره‌گیری از قاعده محدودیت فراوانی شکست در تأمین ۵۰٪ و ۳۰٪ از تقاضا نسبت به قاعده استاندارد کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان همواره این قاعده را به جای قاعده استاندارد به کار برد.

## قدردانی :

از معاونت محترم پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب و نیز مرکز تحقیقات آب به خاطر حمایت از طرح تحقیقاتی حاضر که حاصل آن مقاله حاضر است سپاسگزاری می‌شود. همچنین از کلیه همکاران طرح و نیز محققان محترم که با بررسی و ارزیابی طرح و ارائه نظرهای مفید و سازنده موجب غنای هرچه بیشتر طرح شده‌اند تشکر می‌شود. امید است که نتیجه‌های این طرح گامی هرچند کوچک در جهت بهره‌برداری کارآمدتر از منابع آب کشور باشد.

## مرجع ها

- ۱- جنیدی، فریدون، (۸ و ۹ مهرماه ۱۳۷۶)، 'آگاهی های ایرانیان باستان از آب و بهره وری از نیروی آن در ایران' مجموعه مقالات نخستین همایش سد خاکی.
- ۲- گویری، سوزان، (۱۳۷۲)، 'آناهیتا در اسطوره های ایرانی'، انتشارات جمال الحق.
- ۳- مشکوتی، نصرت اله، (۱۳۴۹)، 'فهرست بناهای تاریخی و اماکن باستانی ایران'، انتشارات وزارت فرهنگ و هنر.
- 4- Loucks, D.P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981), "Water resource systems planning and analysis", Prentice-Hall Inc., Engelwood Cliffs, N. J.
- 5- Shih, J.S., ReVelle, C. (1994), "Water supply operations during drought continuous hedging rule." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 120(5), 613-629.
- 6- Thomas, H. A., and Burden, R. P. (1963), "Operations research in water quality management.", Havard University, Cambridge, MA.
- 7- Cancelliere, A., Ancarani, A., and Rossi, G. (1998), "Susceptibility of water supply reservoirs to drought condition." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 3(2), 140-148.
- 8- Hirsch, R. M. (1981), "Stochastic hydrologic model for drought management." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 107(2), 303-313.
- 9- Frick, D. M., Bode, D., and Salas, J. D. (1990), "Effects of drought on urban water supplies. II : water supply analysis." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 116(6), 754-764.
- 10- Bayazit, M., and Unal, N. E. (1990), "Effects of hedging on reservoir performances." *Water Resour. Res.*, 26(4), 713-719.
- 11- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982), "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance", *Water Resour. Res.*, 18(1), 14 - 20.
- 12- National Research Council, (1986), "Drought management and its impact on public water system" Colloquium Report, National Academy Press, Washington, D.C.
- ۱۳- مطالعات پایداری سدهای کشور، (۱۳۷۰)، سد سنگریزه‌ای درودزن، گزارش برنامه‌ریزی منابع آب، امور آب، وزارت نیرو.