



ارزیابی مدل آبدهی و سیاست بهره‌برداری استاندارد در تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری (مطالعه موردی: سد مخزنی شهید رجایی)

علیرضا عمادی^۱، معصومه خادمی^۲ و * ساحله کاکویی^۲

^۱دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری،

^۲دانشجوی دکتری گروه سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۲

چکیده

سابقه و هدف: با توجه به خشکسالی‌های اخیر، مدیریت منابع آب و اولویت‌بندی تخصیص به مصارف مختلف از مسایل مهم و ضروری می‌باشند. مقدار تخصیص آب در سدهای مخزنی در ماه‌های مختلف با توجه به ذخیره مخزن تعیین می‌شود. بنابراین هدف از این پژوهش تعیین سیاست بهره‌برداری مناسب با توجه به مجموع مربعات کمبود آب می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش به‌منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، مدل‌های سیاست بهره‌برداری استاندارد و آبدهی تهیه شد. در این مدل‌ها مقدار برداشت آب از مخزن با توجه به حجم ذخیره آن در ابتدای دوره تعیین می‌شود. برای بررسی کارایی مدل‌ها در تهیه منحنی فرمان، سد مخزنی شهید رجایی مورد مطالعه قرار گرفت. در مدل‌های مذکور، آبدهی رودخانه در محل سد و حوضه میانی حد فاصل سد مخزنی شهید رجایی و سد انحرافی تجن مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این مدل‌ها، پنج گزینه بهره‌برداری شامل تامین ۱۰۰ درصد نیاز شرب، صنعت و زیست‌محیطی تلفیق با ۴۰ تا ۸۰ درصد نیاز کشاورزی از مخزن سد مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: در گزینه‌های اول، دوم و سوم بهره‌برداری مجموع مربعات خطا در مدل آبدهی نسبت به مدل SOP به‌ترتیب ۸۳/۷۲، ۶۳/۳۲ و ۳۴/۷۰ درصد کم‌تر می‌باشد. در گزینه‌های چهارم و پنجم بهره‌برداری این پارامتر در مدل آبدهی بیش‌تر از مدل SOP می‌باشد. در مدل‌های SOP و آبدهی، متوسط سالانه کمبود آب به‌ترتیب ۲۳/۶ و ۱۵/۱۶ میلیون مترمکعب به‌دست آمد. میانگین و حداقل اعتمادپذیری در مدل آبدهی نسبت به مدل SOP به‌ترتیب ۳/۸۱ و ۵۲/۲۹ درصد بیش‌تر بود، در حالی‌که، حداکثر آسیب‌پذیری در مدل آبدهی نسبت به مدل SOP، ۸۰ درصد کم‌تر بود.

نتیجه‌گیری: سیاست‌های اول، دوم و سوم بهره‌برداری با هدف تامین ۱۰۰ درصد نیاز شرب، صنعت و زیست‌محیطی و ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد نیاز کشاورزی و به‌ترتیب با مجموع مربعات خطای ۳/۹۷، ۲/۲۳ و ۰/۹۹ قابل پذیرش بودند. سیاست‌های چهارم و پنجم بهره‌برداری با هدف تامین ۱۰۰ درصد نیاز شرب، صنعت و زیست‌محیطی و ۴۰ و ۵۰ درصد نیاز کشاورزی و به‌ترتیب با مجموع مربعات خطای ۸/۹۳ و ۶/۲۰ غیرقابل اجرا می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: مدل آبدهی، منحنی فرمان، قابلیت تأمین، سد مخزنی شهید رجایی

مقدمه

یکی از اولویت‌های اساسی طرح‌های تأمین آب، بهره‌برداری مناسب از مخازن ذخیره می‌باشد. بنابراین سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن از لحاظ اجتماعی و اقتصادی جایگاه ویژه‌ای دارد. برای طراحی این مخازن، باید جریان‌های ورودی و خروجی و رابطه بین آن‌ها تعیین گردد. روش‌های مختلفی برای بهره‌برداری آب از مخازن وجود دارد که با اعمال هر یک از آن‌ها منحنی فرمان بهره‌برداری از آن مخزن به دست می‌آید. در بیشتر مخازن دنیا، منحنی فرمان به‌عنوان الگوی اصلی بهره‌برداری شناخته شده است. این منحنی میزان رهاسازی از مخزن را در یک زمان مشخص تعیین می‌کند. بر اساس آن در صورتی که حجم ذخیره مخزن از حدی پایین‌تر باشد، برای جلوگیری از شرایط بحرانی، درصدی از نیاز آن ماه از مخزن رها می‌شود. روش‌هایی که برای تعیین منحنی‌های فرمان مطرح می‌باشند، به روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به پیچیدگی روش‌های بهینه‌سازی، از این روش‌ها بیشتر برای حالت‌های ساده شده‌ای از سیستم مخازن ذخیره استفاده می‌شود. مدل‌های آبدی^۱، جیره‌بندی و سیاست بهره‌برداری استاندارد^۲ از جمله روش‌های شبیه‌سازی هستند که برای تعیین الگوهای بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. باور و همکاران (1962) بسیاری از قواعد بهره‌برداری مخزن را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها خاطر نشان کردند که استفاده از قواعد بهره‌برداری در مواقع کمبود، باعث کاهش خسارت وارده به سیستم می‌شود (1). دندی و همکاران (1997) به‌منظور تعیین منحنی فرمان سیستم چندمخزنه از مدل شبیه‌سازی، مدل بهینه‌سازی و مدل آبدی استفاده نمودند. در این پژوهش مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی به‌عنوان بهترین مدل برای تخمین میزان آبدی

انتخاب شد (2). سینها و همکاران (1999) نیز از مدل آبدی و سیاست بهره‌برداری استاندارد برای سیستم مخازن چندهدفه زیرزمینی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل آبدی، کمبودها را به‌میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (10). نیلا کانتان و پوندی کانتان (1999) به برخی از قواعد بهره‌برداری مخازن از قبیل SOP، قاعده تصمیم‌گیری خطی و قاعده جیره‌بندی اشاره نمودند (7). نتایج پژوهش داهه و سریواستاوا (2002) برای یک سیستم چندمخزنه و در شرایط تک‌هدفه و چندهدفه نشان داد که مدل آبدی نسبت به مدل شبیه‌سازی می‌تواند آبدی قابل‌قبولی را از قبل تعیین نماید (3). همچنین رسول‌زاده غریب‌دوستی و بزرگ حداد (2009) در بررسی تأثیر تغییرات آبدی مخازن بر خروجی بهینه با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای سری‌های زمانی بلندمدت آبدی به مخزن کارون ۴، میزان خروجی مخزن را با استفاده از دو مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) و SOP استخراج کردند. نتایج به دست آمده از دو مدل NLP و SOP نشان داد کمبودها در مدل SOP دارای شدت بیش‌تری نسبت به مدل NLP است (8). عمادی و خادمی (2011) با مقایسه مدل‌های آبدی و سیاست بهره‌برداری استاندارد به این نتیجه رسیدند که مدل آبدی کارایی بهتری نسبت به مدل SOP دارد (4). همچنین در پژوهش دیگری عمادی و همکاران (2012) منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن سد درودزن را با استفاده از روش بهینه‌سازی SA، مدل آبدی و SOP تهیه کردند. نتایج نشان داد هر سه روش نیازهای شرب و صنعت را به‌صورت کامل تأمین می‌کنند. کارایی روش SA و مدل آبدی در بخش تأمین نیاز کشاورزی نسبت به SOP بهتر است. همچنین مدل آبدی نسبت به روش SA و SOP مقدار آب بیش‌تری را برای مصارف کشاورزی در اختیار مصرف‌کننده‌ها قرار می‌دهد (5). تقیان

- 1- Yield Model
- 2- Standard Operation Policy (SOP)

می‌شود که برای تعیین پارامترهای مورد نیاز بهره‌برداری در هر کدام روابط به صورت سالانه و ماهانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. معادله پیوستگی برای حجم ذخیره برونسالی در هر سال Y و حجم ذخیره درونسالی در هر ماه t به ترتیب به صورت روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند:

$$S_{y+1} = S_y + Q_y - Y_p - \alpha_{s,y} Y_s - E_y - Spill_y \quad (1)$$

$$S_{t+1} = S_t + \beta_t \left(\sum_{i=1}^{12} Y_p + \alpha_{s,y} Y_s \right) + \sum_{i=1}^{12} e_t - (Y_p + \alpha_{s,y} Y_s) - e_t \quad (2)$$

که در آن‌ها، S_{y+1} مقدار حجم ذخیره مخزن در سال $y+1$ ، S_y مقدار حجم ذخیره مخزن در سال y ، Q_y حجم جریان ورودی به مخزن در سال y ، Y_p آبدهی یا نیاز قطعی سالانه با احتمال p ، $\alpha_{s,y}$ ضریب آبدهی یا نیاز ثانویه سالانه با احتمال p (برای سال‌های شکست $\alpha_{s,y} = 0$ و برای سال‌های موفقیت $\alpha_{s,y} = 1$ انتخاب می‌شود. سال شکست سالی است که مجموع نیازهای ماهانه در آن سال بیش‌تر از جریان ورودی به مخزن در همان سال باشد در غیر این صورت آن سال به‌عنوان سال موفقیت محسوب می‌شود). Y_s آبدهی یا نیاز ثانویه سالانه با احتمال p ، E_y حجم تلفات تبخیر در سال y ، $Spill_y$ سرریز سالانه در سال y ، S_{t+1} مقدار حجم ذخیره مخزن در ابتدای ماه $t+1$ ، S_t مقدار حجم ذخیره مخزن در ابتدای ماه t ، β_t کسری از حجم جریان ورودی به مخزن در دوره t خشک‌ترین سال (خشک‌ترین سال در آمار گذشته، سالی است که جریان ورودی به مخزن در آن سال کم‌تر و بحرانی‌تر از سایر سال‌ها باشد). e_t حجم تلفات تبخیر در دوره t می‌باشد. نیاز قطعی مقدار نیاز آبی است که رهاسازی آن از مخزن سد ضروری می‌باشد در غیر

(2014) منحنی فرمان بهره‌برداری سد مخزنی بالارود در استان خوزستان و شمال شهرستان اندیمشک را با استفاده از مدل آبدهی و تکنیک بهینه‌سازی خطی به‌دست آورد. نتایج نشان داد که استفاده از مدل آبدهی به خوبی توانسته است شدت کمبودها را کنترل نموده و آن‌ها را به‌طور یکنواخت و متعادل توزیع نماید اما در مقایسه با SOP، متوسط درازمدت کمبودها را افزایش و اعتمادپذیری تأمین نیاز را کاهش می‌دهد (11).

با توجه به خشکسالی‌های اخیر و لزوم مدیریت منابع آب در فصول کم‌آبی، مدیریت منابع موجود و همچنین الویت‌بندی تخصیص به مصارف مختلف یکی از مسایل مهم و ضروری می‌باشد. مدل آبدهی یکی از مدل‌هایی می‌باشد که می‌توان اولویت و درصد تخصیص در آن را مشخص نمود، بنابراین در این پژوهش از مدل آبدهی با سیاست‌های متفاوت بهره‌برداری در سد شهید رجایی واقع در استان مازندران استفاده شده است و نتایج آن با مدل SOP مقایسه و در نهایت با توجه به مجموع مربعات کمبود آب مناسب‌ترین سیاست تعیین شد.

مواد و روش‌ها

مدل آبدهی: آبدهی به جریانی اطلاق می‌شود که در دوره‌های آینده با اعتبار نسبتاً بالا (با احتمال برابر یا بزرگ‌تر)، جهت تأمین نیازها از مخزن قابل رهاسازی باشد. آبدهی مطمئن یا قابل اطمینان، مقداری است که مخزن همواره قادر به تأمین کردن آن است و آبدهی‌های بالاتر از آن نامطمئن هستند. در مدل آبدهی دو سری رابطه برای برقراری تعادل حجمی در حجم ذخیره برونسالی و درونسالی وجود دارد (شریفی و شهیدی‌پور، 2001). میزان حجم آبی که در انتهای هر سال و هر ماه در مخزن سد ذخیره می‌شود به‌ترتیب حجم ذخیره برونسالی و درونسالی نامیده

$$e_t = \gamma_t E_0 + \left(\frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right) \gamma_t E \quad (۸)$$

مدل آبدهی به تناسب حجم مخزن، مقدار نیاز و آبدهی رودخانه وابسته است. در برخی پروژه‌ها به‌علت نوسانات زیاد در آبدهی و عدم تناسب نیازها، مدل نیاز به حجم ذخیره مخزنی بیش از حجم موجود دارد که در این صورت مدل با مشکل مواجه می‌شود. بر اساس مبانی ارایه شده برنامه کامپیوتری به زبان فرترن برای مدل آبدهی تهیه شد.

مدل SOP: در این مدل از رابطه پیوستگی بین مقادیر ورودی به مخزن، مقادیر خروجی از آن و میزان ذخیره در مخزن در دوره‌های زمانی مشخص مطابق با رابطه ۹ استفاده می‌شود و تأمین نیاز پایین‌دست متناسب با مقدار آب در دسترس خواهد بود. به‌عبارت دیگر در این روش صرف‌نظر از شرایط گذشته و آینده، در هر دوره زمانی نیاز موجود بر اساس تمام آب در دسترس تأمین می‌شود. در صورتی که مخزن خالی از آب باشد، رهاسازی صورت نمی‌گیرد، علاوه بر آن در صورت زیاد بودن آب در مخزن نسبت به نیاز در یک دوره، حجم رهاسازی برابر با مقدار نیاز آن دوره در نظر گرفته می‌شود و مازاد در مخزن ذخیره خواهد شد. در این سیاست زمانی که مخزن توانایی تأمین نیاز را به‌طور کامل نداشته باشد، درصدی از آن تأمین می‌شود.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + P_t - R_t - Ev_t - Spill_t \quad (۹)$$

که در آن، S_t حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره t ، S_{t+1} حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره $t+1$ ، Q_t حجم جریان ورودی به مخزن در دوره t ، P_t حجم بارش بر سطح دریاچه در دوره t ، R_t حجم برداشت

این صورت زیان‌های جبران‌ناپذیری به بخش‌های مصرف‌کننده آب وارد خواهد شد ولی تأمین نشدن نیازهای ثانویه مشکل چندانی ایجاد نخواهد کرد. حجم تلفات تبخیر در سال l با رابطه ۳ بیان می‌شود.

$$E_y = E_0 + \left[S_y + \sum_{t=1}^{12} \left(\frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right) \gamma_t \right] E \quad (۳)$$

که در آن، E_0 ثابت حجم تلفات تبخیر سالانه (متوسط حجم تلفات تبخیر ماهانه)، γ_t کسری از حجم تلفات تبخیر در ماه t و E نرخ متوسط حجم تلفات تبخیر سالانه در واحد حجم ذخیره فعال مخزن می‌باشد. پارامترهای E_0 ، γ_t و E به‌ترتیب با روابط ۴ تا ۶ بیان می‌شوند:

$$E_0 = \frac{\sum_{t=1}^{12} E_t}{12} \quad (۴)$$

که در آن، E_t حجم تلفات تبخیر در ماه t .

$$\gamma_t = \frac{E_t}{\sum_{t=1}^{12} E_t} \quad (۵)$$

$$E = \frac{\sum_{t=1}^{12} E_t}{(S_{\max} - S_{\min})} \quad (۶)$$

پارامترهای β_t و e_t به‌ترتیب با روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند:

$$\beta_t = \frac{Q_t}{\sum_{t=1}^{12} Q_t} \quad (۷)$$

که در آن، Q_t حجم جریان ورودی به مخزن در ماه t در خشک‌ترین سال می‌باشد:

که در آن، $Deficit$ میزان کمبود سیستم در دوره‌هایی که مقدار رهاسازی کم‌تر از نیاز پایین دست می‌باشد.

سد مخزنی شهید رجایی: سد مخزنی شهید رجایی که از آن با عنوان سد سلیمان تنگه نیز یاد می‌شود، در استان مازندران و در ۴۰ کیلومتری جنوب شهر ساری روی رودخانه دودانگه یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه تجن احداث شده و در سال ۱۳۷۷ به بهره‌برداری رسیده است. اهداف عمده طرح تأمین و تنظیم آب کشاورزی اراضی دشت تجن، تأمین آب آشامیدنی، تأمین آب صنعتی، تولید برق و کنترل طغیان و جلوگیری از خسارات ناشی از سیل می‌باشد. در شکل ۱ وضعیت سیستم منابع و مصارف سد مخزنی شهید رجایی نشان داده شده است.

سد مخزنی شهید رجایی از نوع بتنی دو قوسی با سرریز آزاد و به ارتفاع ۱۱۲ متر از بستر رودخانه و با طول تاج ۴۲۷ متر و حجم مفید ۱۵۸/۳ میلیون مترمکعب می‌باشد. برای یک دوره ۳۱ ساله از سال ۱۳۵۸ لغایت ۱۳۸۹، متوسط آبدهی رودخانه در محل سد در حدود ۲۰۳ میلیون مترمکعب در سال و آبدهی حوضه میانی حد فاصل سد مخزنی شهید رجایی و بند انحرافی تجن در حدود ۳۲۵ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. بر اساس مطالعات هواشناسی میزان تبخیر سالانه از سطح آزاد آب در محل سد ۹۷۳ میلی‌متر است. در جدول ۱ توزیع ماهانه نیاز آبی پایین دست به تفکیک شرب، صنعت، زیست محیطی و کشاورزی ارائه شده است.

یا رهاسازی از مخزن سد در دوره t ، Ev_t حجم تبخیر از سطح دریاچه در دوره t و $Spill_t$ حجم سرریز در دوره t می‌باشد.

بر این اساس برنامه کامپیوتری به زبان فرترن تهیه شد که فرآیند فوق را شبیه‌سازی می‌نماید.

شاخص‌های ارزیابی کارایی سیستم: عملکرد سیستم منابع آب اغلب توسط شاخص‌های ساده‌ای از قبیل میانگین، واریانس منافع و با متغیرهای بهره‌برداری بیان می‌شوند که مفید هستند ولی اغلب کافی نمی‌باشند. در این پژوهش از شاخص‌های اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری و کمبود برای ارزیابی کارایی سیستم استفاده شده است (فرهنگی و بزرگ حداد، ۲۰۰۹).

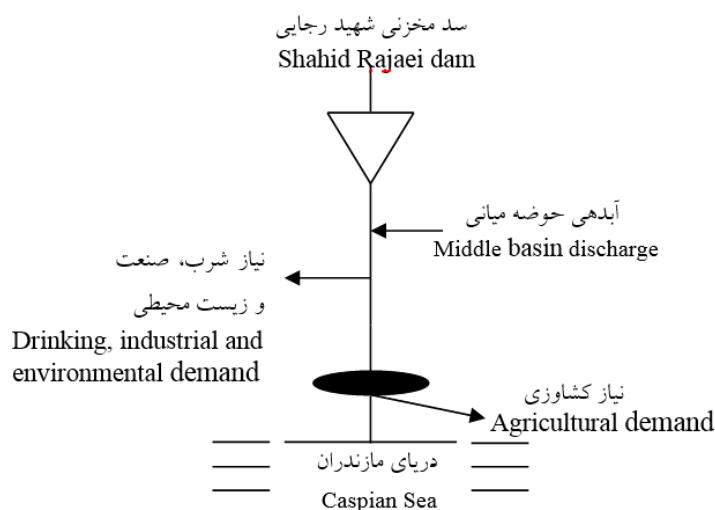
$$\alpha = \frac{\sum_{t=1}^{12} R_t}{\sum_{t=1}^{12} TD_t} \times 100 \quad (10)$$

که در آن α اعتمادپذیری سیستم در یک سال آماری در طول دوره بهره‌برداری، TD_t مقدار حجم مورد نیاز در دوره t می‌باشد.

$$\beta = \text{MAX}_{t=1}^{12} \left(\frac{TD_t - R_t}{TD_t} \right) \quad (11)$$

که در آن، β آسیب‌پذیری سیستم در یک سال آماری در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد.

$$Deficit = \sum_{t=1}^{12} (R_t - TD_t) \quad (12)$$



شکل ۱- وضعیت سیستم منابع و مصارف سد مخزنی شهید رجایی.

Figure 1. The status of resources and demands of Shahid Rajaei dam.

جدول ۱- توزیع نیاز ماهانه پایین دست سد شهید رجایی (میلیون مترمکعب).

Table 1. Distribution of monthly demand of Shahid Rajaei dam downstream (MCM).

شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	ماه	نیاز Demand
Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan	Dec	Nov	Oct	Month	
2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	شرب Drinking
2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	صنعت Industrial
2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	زیست محیطی Environmental
10.220	24.42	66.51	66.03	59.69	9.49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	کشاورزی Agriculture
18.23	32.43	74.52	74.04	67.70	17.50	7.5	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	مجموع Sum

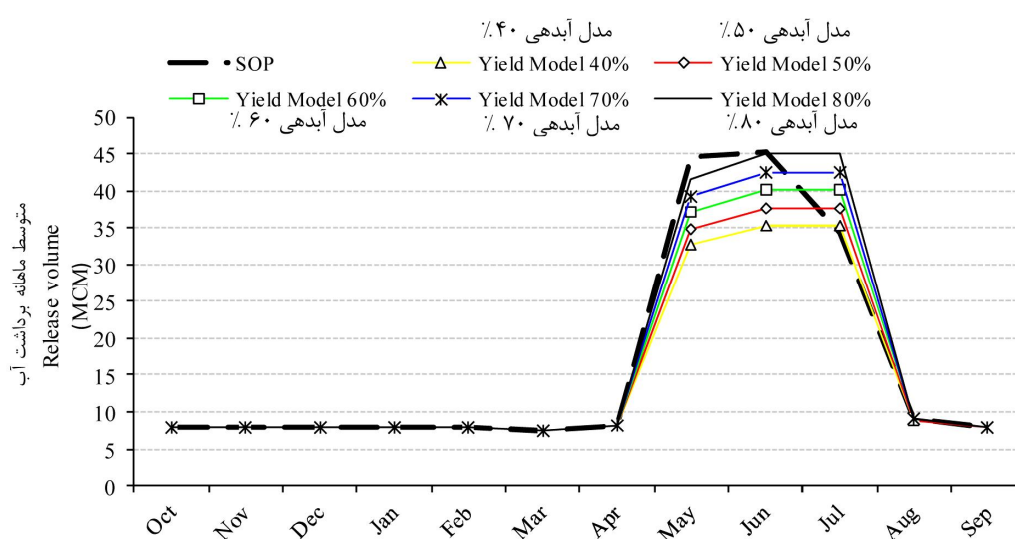
توانایی تنظیم سالانه ۲۱۷/۷۳ میلیون مترمکعب از نیاز آبی پایین دست را دارد. بر اساس مدل SOP، در ماه‌هایی که مخزن توانایی تأمین ۱۰۰ درصد نیاز را دارد، کل نیاز آن ماه تأمین می‌شود در غیر این صورت، درصدی از نیاز آن ماه تأمین و مخزن از آب خالی می‌شود. این مدل متوسط سالانه تنظیم آب را در طول دوره آماری ۱۹۵/۹۶ میلیون مترمکعب به دست آورده است.

نتایج و بحث

با توجه به این که در سیستم حوضه سد شهید رجایی از آبدهی حوضه میانی استفاده می‌شود، بنابراین از جریان تنظیمی سد به منظور تأمین نیازهای شرب، صنعت، زیست محیطی و جبران کمبودهای حاصله در تأمین نیازهای کشاورزی استفاده خواهد شد. این امر سبب می‌گردد تا ضمن استفاده حداکثر از حوضه میانی، از آب ذخیره شده در مخزن استفاده مناسب‌تری به عمل آید. مخزن سد شهید رجایی

مدل SOP و سیاست‌های متفاوت مدل آبدهی در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به کم‌تر بودن مجموع مربعات کمبود آب در سیاست‌های اول تا سوم مدل آبدهی نسبت به مدل SOP، این سیاست‌ها قابل پذیرش و سیاست‌های چهارم و پنجم غیرقابل پذیرش می‌باشند که در نهایت اولویت با سیاست اول بهره‌برداری با حداقل مجموع مربعات کمبود آب می‌باشد.

برای تهیه منحنی فرمان بر اساس مدل آبدهی، پنج سیاست متفاوت در نظر گرفته شد که در تمامی آن‌ها، نیازهای شرب، صنعت و زیست‌محیطی به‌طور کامل و درصدهای متفاوتی از نیاز کشاورزی منظور شده است. در شکل ۲ منحنی‌های فرمان مدل آبدهی با ۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۴۰ درصد تأمین نیازهای کشاورزی که به‌ترتیب سیاست‌های اول تا پنجم نامگذاری شده‌اند، نشان داده شده است. مجموع مربعات کمبود آب در



شکل ۲- متوسط ماهانه برداشت آب در درصدهای مختلف نیاز کشاورزی در مدل آبدهی.

Figure 2. Monthly average of release in different percentages of agricultural demand in Yield model.

جدول ۲- مجموع مربعات کمبود آب در مدل SOP و سیاست‌های متفاوت مدل آبدهی.

Table 2. Sum Squares of water deficit in the SOP and different scenarios of Yield models.

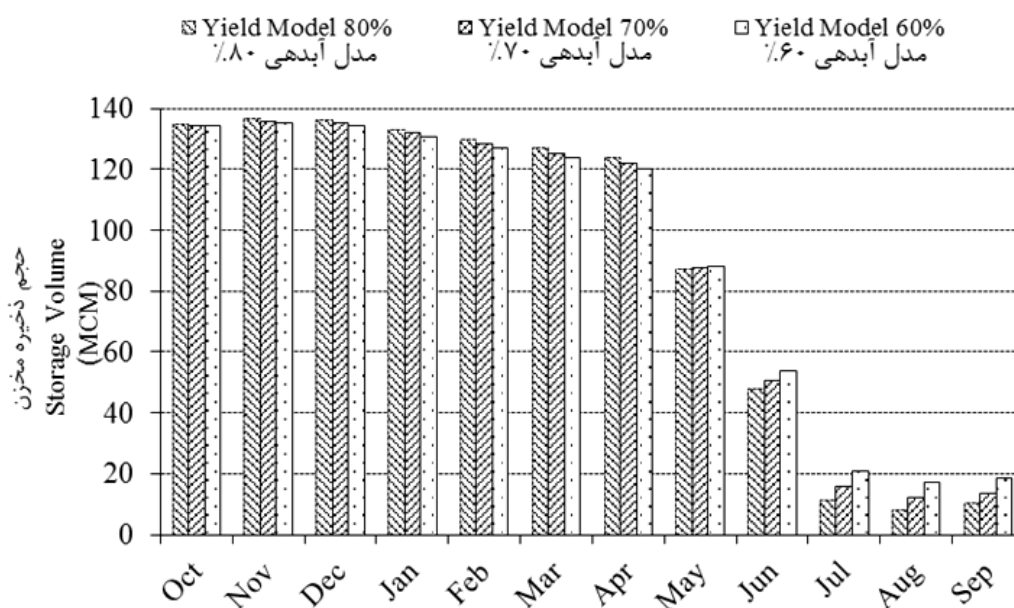
آبدهی					SOP	مدل Model
Yield Model						
سیاست اول	سیاست دوم	سیاست سوم	سیاست چهارم	سیاست پنجم		
First Policy	Second Policy	Third Policy	Fourth Policy	Fifth Policy		
0.99	2.23	3.97	6.20	8.93	6.08	مجموع مربعات کمبود آب Sum squares of water deficit

ورودی به رودخانه بیشتر از کل نیاز سالانه است، همه نیازهای آن ماه تأمین می‌شود، در غیر این صورت، فقط نیازهای قطعی شامل ۱۰۰ درصد نیازهای شرب، صنعت و زیست‌محیطی و ۸۰ درصد

در سیاست اول مدل آبدهی متوسط سالانه تنظیم آب توسط مخزن در طول دوره آماری ۲۰۳/۳۲ میلیون مترمکعب می‌باشد که ۳/۶۲ درصد بیش‌تر از مدل SOP است. در این مدل در سال‌هایی که جریان

شده است. اگرچه در این سیاست بهره‌برداری تعداد ماه‌های شکست افزایش یافته ولی شدت کمبودها کنترل شده است. همچنین در این مدل حداکثر سالانه تنظیم آب توسط مخزن ۲۴۸/۹۸ میلیون مترمکعب می‌باشد که ۳/۷۳ درصد بیش‌تر از مدل SOP است. تغییرات حجم ذخیره مخزن در سیاست‌های پذیرش شده از مدل آبدهی در شکل ۳ نشان داده شده است. از ماه مهر تا ماه فروردین، در سیاست اول مدل آبدهی در مخزن حجم آب بیش‌تری نسبت به سیاست‌های دوم و سوم ذخیره شده است. در صورتی که از ماه اردیبهشت تا ماه شهریور هر چه درصد نیاز کشاورزی کم‌تر می‌شود میزان حجم ذخیره مخزن بیش‌تر شده است.

نیازهای کشاورزی آن ماه که حوضه میانی قادر به تأمین آن نیست، تأمین خواهد شد. در هر دو مدل در فصول پاییز و زمستان و همچنین در ماه‌های فروردین و شهریور که جریان ورودی به رودخانه زیاد و برداشت آب از مخزن سد کم است، ۱۰۰ درصد آبی که از مخزن سد تقاضا شود، قابل تأمین است و نیازی به جیره‌بندی آب در این ماه‌ها نیست. در مدل SOP در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد، خصوصاً در ماه تیر میزان متوسط برداشت آب کم‌تر از میزان متوسط تقاضا از مخزن می‌باشد و شدت کمبود آب در این ماه‌ها زیاد است. در صورتی که این میزان کمبود آب در مدل آبدهی تقریباً به‌صورت یکنواخت در تعداد ماه‌های بیش‌تری توزیع



شکل ۳- تغییرات حجم ذخیره مخزن در سیاست‌های پذیرش شده مدل آبدهی.

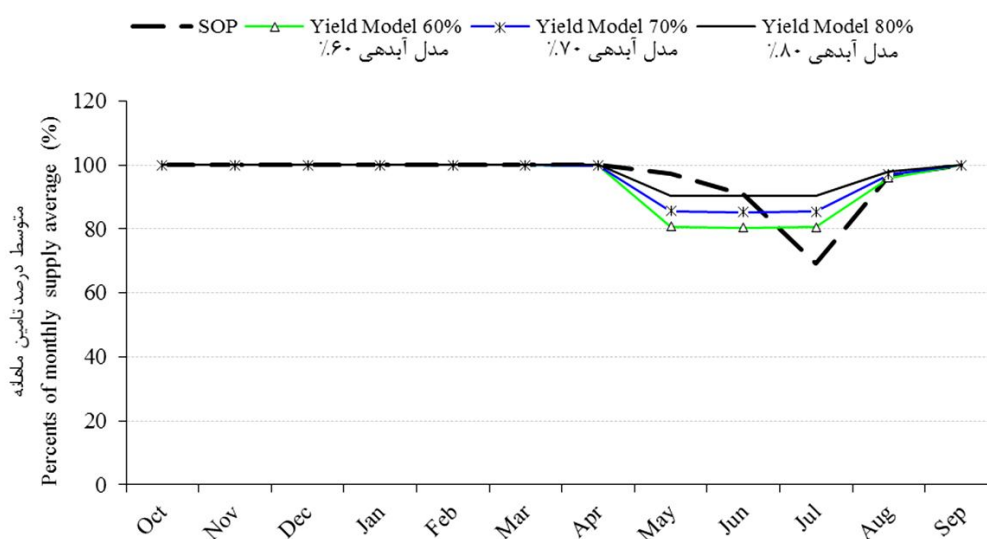
Figure 3. Reservoir storage volume in accepted scenarios in Yield model.

اردیبهشت‌ماه بیش‌تر و در تیرماه کم‌تر از مدل آبدهی می‌باشد و این به‌دلیل ذخیره مقداری از آب برای استفاده در دوره‌های بعد در مدل آبدهی است. متوسط درصد تأمین ماهانه در مدل SOP و در سیاست‌های

شکل ۴ متوسط درصد تأمین ماهانه (نسبت تعداد سال‌های تأمین به کل سال‌ها) سه سیاست بهره‌برداری پذیرش شده از مدل آبدهی و مدل SOP را نشان می‌دهد. متوسط درصد تأمین ماهانه در مدل SOP در

مدل SOP مولفه‌های مصرف‌کننده را با خسارات جبران‌ناپذیری مواجه خواهد کرد. اگر در ماه‌های قبل از رخداد کمبودهای شدید، مقداری آب درون مخزن ذخیره شود، می‌توان از ایجاد خسارات جبران‌ناپذیر جلوگیری نمود. البته باید توجه داشت با این کار تعداد ماه‌های بیش‌تری در ردیف ماه‌های کمبود قرار می‌گیرند. در مدل آبدهی حتی در برخی ماه‌هایی که مخزن قادر به تأمین ۱۰۰ درصد نیاز است از برداشت کل نیاز آن ماه خودداری می‌شود و تنها نیازهای قطعی آن ماه برداشت می‌شود.

بهربرداری اول تا سوم مدل آبدهی به‌ترتیب ۹۶/۱۰، ۹۷/۳۸، ۹۶/۰۷ و ۹۴/۷۶ درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که متوسط درصد تأمین ماهانه تنها در اولین سیاست بهره‌برداری از مدل آبدهی بیش‌تر از مدل SOP است که به‌عنوان سیاست بهره‌برداری از مخزن سد شهید رجایی انتخاب می‌شود. حداقل درصد تأمین ماهانه در مدل SOP و در این سیاست بهره‌برداری از مدل آبدهی به‌ترتیب ۱۲/۴۳ درصد مربوط به ماه خرداد و ۸۲/۶۱ درصد مربوط به ماه اردیبهشت می‌باشد. این میزان ناچیز درصد تأمین در



شکل ۴- متوسط درصد تامین ماهانه در مدل SOP و سیاست‌های پذیرش شده مدل آبدهی.

Figure 4. Percents of monthly supply average in SOP Model and accepted scenarios in Yield model.

نشدن کل نیاز پایین‌دست در بعضی از ماه‌ها، سطح آب در مخزن بالا می‌آید و سطح تبخیر افزایش می‌یابد.

در جدول ۳ متوسط ماهانه کمبود آب در دو مدل SOP و آبدهی ارائه شده است. با توجه به جدول در مدل SOP، مخزن در تیرماه با کمبود آب شدیدی مواجه خواهد شد. در دوره‌هایی که کمبود آب شدید است، میزان برداشت آب از مخزن به حداقل خواهد رسید. در مدل آبدهی، کمبود آب در تعداد ماه‌های

در محاسبات بهره‌برداری از مخزن سد شهید رجایی از میانگین درازمدت ماهانه تبخیر از سطح مخزن استفاده شده است. بر اساس مدل SOP، به‌طور متوسط ماهانه ۰/۱۸ و سالانه ۲/۱۹ میلیون مترمکعب تبخیر از سطح مخزن خواهد بود که این مقدار در مدل آبدهی، به‌طور متوسط به ماهانه ۰/۳۳ و سالانه ۴/۰۱ میلیون مترمکعب می‌باشد. افزایش میزان تبخیر در مدل آبدهی نسبت به مدل SOP به‌دلیل افزایش سطح تبخیر می‌باشد. در مدل آبدهی به‌دلیل تأمین

است. بر اساس مدل‌های SOP و آبدهی، متوسط سالانه کمبود آب به ترتیب ۲۳/۶ و ۱۵/۱۶ میلیون مترمکعب می‌باشد.

بیش‌تری مشاهده شده است. در واقع این مدل با ذخیره آب در ماه‌های پر آبی و توزیع یکنواخت کمبود آب در ماه‌های اردیبهشت، خرداد و تیر، از ایجاد کمبودهای شدید در این ماه‌ها جلوگیری نموده

جدول ۳- متوسط ماهانه کمبود آب در مدل SOP و آبدهی (میلیون مترمکعب).

Table 3. Monthly average water deficit in SOP and Yield models (MCM).

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
Month	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
مدل SOP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.47	-5.34	-16.28	-0.51	0.00
مدل آبدهی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	-4.59	-5.26	-5.02	-0.27	0.00

SOP به ترتیب ۳/۸۱ و ۵۲/۲۹ درصد بیش‌تر می‌باشد. همچنین حداکثر آسیب‌پذیری در مدل آبدهی نسبت به مدل SOP، ۸۰ درصد کم‌تر است.

مقادیر اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری در دو مدل در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به جدول میانگین و حداقل اعتمادپذیری در مدل آبدهی نسبت به مدل

جدول ۴- مقادیر اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری در دو مدل SOP و آبدهی.

Table 4. Reliability and vulnerability in SOP and Yield models.

شاخص	اعتمادپذیری (درصد)		آسیب‌پذیری (درصد)	
Index	Reliability (%)		Vulnerability (%)	
مدل	SOP	آبدهی	SOP	آبدهی
Model	SOP	Yield	SOP	Yield
ماکزیم	100.00	100.00	87.57	17.38
Max	100.00	100.00	87.57	17.38
میانگین	89.74	93.29	31.20	9.88
Ave	89.74	93.29	31.20	9.88
مینیم	47.76	87.53	0.00	0.00
Min	47.76	87.53	0.00	0.00

تأمین سالانه در سطح تأمین‌های برابر و کم‌تر از ۸۰ درصد، ۱۰۰ درصد می‌باشد. زیرا در این سیاست هدف تأمین ۱۰۰ درصد نیازهای قطعی شامل ۱۰۰ درصد نیازهای شرب، صنعت و زیست‌محیطی و ۸۰ درصد نیازهای کشاورزی است. با توجه به نتایج ارائه شده، مدل آبدهی نسبت به روش SOP کارایی بهتری دارد که با نتایج عمادی و همکاران (2012) و تقیان (2014) مطابقت دارد.

در جدول ۵ درصد احتمال تأمین سالانه که عبارت است از نسبت تعداد سال‌های تأمین به کل سال‌ها در سطح تأمین‌های مختلف در مدل SOP و آبدهی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مدل SOP، متوسط درصد احتمال تأمین سالانه در سطح تأمین‌های مختلف چندان تفاوتی با یکدیگر ندارند. زیرا این سیاست همواره در صدد تأمین ۱۰۰ درصد نیاز است. در مدل آبدهی، متوسط درصد احتمال

جدول ۵- درصد احتمال تامین سالانه در سطح تامین‌های مختلف (%).

Table 5. Annual supply probability in various supplies level (%).

10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	سطح تامین (%) Supply Level (%)
100.00	98.93	97.85	97.31	95.97	94.89	94.62	93.55	91.94	91.67	مدل SOP SOP Model
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	85.49	76.34	مدل آبدهی Yield Model

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تشریح مدل آبدهی و SOP پرداخته شد. به منظور بررسی کارایی مدل آبدهی در تهیه منحنی فرمان، سد مخزنی شهید رجایی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به مسایل مورد بحث می‌توان نتایج زیر را ذکر کرد:

۱- در مدل SOP کمبودهای ایجاد شده بسیار شدید می‌باشد که اگر سیستم واقعاً با آن مواجه شود زیان‌های جبران‌ناپذیری ایجاد خواهد شد که مدل آبدهی با جیره‌بندی آب از دو یا سه ماه قبل از ایجاد کمبودهای شدید، از شدت کمبودها در ماه‌های بحرانی می‌کاهد و آن را کنترل می‌کند.

۲- در مدل SOP مقدار کمبود کل به حداقل می‌رسد که علت آن کاهش حجم تبخیر به دلیل پایین نگه داشته شدن سطح آب مخزن در این مدل می‌باشد ولی در مدل آبدهی از آنجایی که برای کنترل شدت کمبودها از خالی شدن مخزن جلوگیری و سطح آب در مخزن بالا نگه داشته می‌شود، این امر موجب افزایش حجم تبخیر و کمبود کل می‌شود.

۳- در مدل آبدهی توسعه داده شده برای سد مخزنی شهید رجایی پنج سیاست بهره‌برداری در نظر گرفته شد که از این بین، سیاست‌های اول، دوم و سوم بهره‌برداری با هدف تأمین ۱۰۰ درصد نیاز شرب، صنعت و زیست‌محیطی و ۸۰، ۷۰ و ۶۰ درصد نیاز کشاورزی و به ترتیب با مجموع مربعات خطای ۰/۹۹، ۲/۲۳ و ۳/۹۷ قابل پذیرش هستند که در نهایت اولویت با سیاست اول بهره‌برداری با حداقل مجموع مربعات خطا می‌باشد. در سیاست‌های اول، دوم و سوم بهره‌برداری به ترتیب ۸۳/۷۲، ۶۳/۳۲ و ۳۴/۷۰ درصد بهبود در بهره‌برداری نسبت به مدل SOP مشاهده شده است. سیاست‌های چهارم و پنجم بهره‌برداری با هدف تأمین ۱۰۰ درصد نیاز شرب، صنعت و زیست‌محیطی و ۵۰ و ۴۰ درصد نیاز کشاورزی و به ترتیب با مجموع مربعات خطای ۶/۲۰ و ۸/۹۳ غیرقابل اجرا می‌باشند. در سیاست‌های چهارم و پنجم بهره‌برداری مجموع مربعات خطا بیش‌تر از مدل SOP (۶/۰۸) می‌باشد.

منابع

1. Bower, B.T., Hufschmidt, M.M., and Reedy, W.W. 1962. Operating procedures: Their role in the design of water- resource systems by simulation analyses. Design of water resources systems. Harvard University Press, Cambridge, MA. Pp: 443-458.
2. Dandy, G.C., Connarty, M.C., and Loucks, D.P. 1997. Comparison of Methods for Yield Assessment of Multiple Reservoir Systems. J. Water Resour. Plan. Manage. 23: 6. 350-358.
3. Dahe, P.D., and Srivastava, D.K. 2002. Multireservoir Multiyield Model with Allowable Deficit in Annual Yield. J. Water Resour. Plan. Manage. 128: 6. 406-414.
4. Emadi, A., and Khademi, M. 2011. Reservoir Operation Rule Curve of Doroodzan Dam using Yield Model. J. Water Soil. 25: 5. 1058-1068. (In Persian)

5. Emadi, A., Khademi, M., Mohseni Movahed, S.A., and Nouri, M.R. 2012. Comparative of simulated annealing (SA) optimization algorithm, yield model and standard operation policy in reservoir operation (Case study: Doroodzan Dam). *J. Iran Water Res.* 10: 187-196. (In Persian)
6. Farhangi, M., and Bozorg Haddad, O. 2009. Using Monte Carlo simulation to investigation of effect of release changes to the reservoir system reliability. *The First National Conference on Engineering and Management of Infrastructures.* 8p. (In Persian)
7. Neelakantan, T.R., and Pundrikanthan, N.V. 1999. Hedging rule optimization for water supply Reservoirs System. *Water Resources Research.* 13: 6. 409-426.
8. Rasoulzadeh Gharibdousti, S., and Bozorg Haddad, A. 2009. Study of Efficiency reservoirs yield variations on probability distribute optimum output. *1st National Conference on Engineering and Management of Infra Structures.* Tehran University. 27-29 Oct. 8p. (In Persian)
9. Sharifi, M.B., and Shahidipour, S.M.M. 2001. *Analysis of Water Resources Systems.* Publication of University of Mashhad, 275p. (In Persian)
10. Sinha, A.K., Rao, B.V., and Lall, U. 1999. Yield Model for Screening Multipurpose Reservoir Systems. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 125: 6. 325-332.
11. Taghian, M. 2014. Developed simulation model to determine the Reservoir Operation Rule Curve Dam using Yield Model. *2nd National Conference on Water Crisis.* Shahrekord University. 9-10 Sep. 9p. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(6), 2016
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Evaluation of yield model and standard operation policy in developing of operation rule curve (Case study: Shahid Rajaei Dam)

A.R. Emadi¹, M. Khademi² and *S. Kakouei²

¹Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ²Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 06/30/2014; Accepted: 06/23/2015

Abstract

Background and Objectives: Regarding the recent droughts, water resources management and prioritization of water allocation to different demands are important and essential issues. The amount of water allocation in storage dams at different months is determined based on reservoir storage. Therefore, the objective of this study is to determine the suitable operation policy regarding the sum squares of water deficit.

Materials and Methods: In this study the Standard Operation Policy (SOP) and Yield models were developed for planning and water resources management. In these models amount of water release from reservoir is determined by storage volume at beginning of the period. For assessment of models efficiency in development of rule curve, Shahid Rajaei dam was studied. In mentioned models, river discharge in dam site and middle basin between Shahid Rajaei dam and Tajan diversion dam were used. By means of these models, five operation scenarios consisted of supplying 100 percent of drinking, industrial and environmental demands; with 40 to 80 percent of agricultural demand from the reservoir were simultaneously investigated.

Results: In the first, second and third operation scenarios, deficit sum squares in Yield model compared to SOP model was less, equal to 83.72, 63.32 and 34.70 percent; respectively. In the fourth and fifth operation scenarios this parameter in the Yield model was greater than SOP model. Average annual water deficit in the SOP and Yield models was 23.6 and 15.16 MCM; respectively. Average and minimum reliability in Yield model were 3.81 and 52.29 percent more than SOP model; respectively; whereas, maximum vulnerability in Yield model was 80 percent less than SOP model.

Conclusion: First, second and third operation scenarios with the aim of supplying 100 percent drinking, industrial and environmental demands and 60, 70 and 80 percent agricultural demand were acceptable with sum squares of water deficit of 3.97, 2.23 and 0.99; respectively. Fourth and fifth operation scenarios with the aim of supplying 100 percent drinking, industrial and environmental demands, and 40 and 50 percent agricultural demand were not acceptable with sum square of water deficit of 8.93 and 6.20; respectively.

Keywords: Yield model, Rule curve, Able to accommodate, Shahid Rajaei Dam

* Corresponding Author; Email: saheleh_kakouei@yahoo.com

