ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری سد مخزنی کرخه توسط یک تابع خسارات نسبی طی سیلاب تاریخی فروردین ۱۳۹۸

کاظم حمادی[۱]، لیلا نوذریان[۲*]

۱- مدیریت فنی و مهندسی حفاظت و بهره‌برداری منابع آب - سازمان آب و برق خوزستان

۲- رئیس گروه مطالعات منابع آب حوضه کارون بزرگ- سازمان آب و برق خوزستان

چکیده:

سیلاب فروردین سال ۱۳۹۸ در رودخانه کرخه باعث ایجاد خسارت در گستره‌ای به مساحت بیش از ۸۱۱ کیلومتر مربع گردید. بمنظور ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری اتخاذ شده قبل و حین سیلاب در مخزن، تابع خسارت برای منطقه تحت تاثیر سیل توسعه داده شد. با استفاده از دبی ایمن رودخانه و شاخص $RR(t)$ سه سناریو شبیه‌سازی گردید. گر چه برآورد قطعی جریان ورودی به مخزن سد کرخه تقریباً غیرممکن بود با این وصف نتایج نشان داد برای ایجاد شرایط ایمن و بدون خسارت می‌بایست جریانی با حجم ۹/۵ میلیارد مترمکعب از ۵ آبان ماه ۱۳۹۷ به مدت ۲۱۶ روز رها سازی می‌شد اما فرض برآورد جریان ورودی قطعی از اول دی ماه ۱۳۹۷ و داشتن تابع خسارت استخراج شده، میزان خسارت نسبی ۳۶ درصد قابل کاهش می‌باشد.

کلمات کلیدی: سیلاب، تابع هدف، سیاست بهره‌برداری ، سد مخزنی کرخه.

۱. مقدمه

طی چهار دهه گذشته تحقیقات وسیعی در زمینه توسعه مدل‌های ریاضی بهره‌برداری از مخازن انجام گردیده است. ممکن است تجزیه و تحلیل سیستم‌های پیچیده منابع آب شامل هزاران متغیر تصمیم و محدودیت باشد. با تعریف اهداف و محدودیت‌ها، می‌توان بسیاری از تکنیک‌ها برای حل آن‌ها استفاده نمود. انتخاب روش حل به خصوصیات سیستم مخازن در نظر گرفته شده، در دسترس بودن داده‌ها، اهداف و نوع محدودیت‌ها بستگی دارد. شیوه‌های بهینه‌سازی در خلال چندین دهه گذشته در مدیریت و بهره‌برداری از سیستم مخازن پیچیده اهمیت خاصی پیدا کرده‌اند. در گذشته پیشینه کامل و جامع همراه با یک ارزیابی از روش‌های بهینه‌سازی و مدل‌های آن‌ها انجام شده است[1]. علیرغم این که مدل‌های بهینه‌سازی بخوبی رشد و توسعه یافته‌اند اما باز هم اکثر برنامه‌ریزی‌های مخزن و مطالعات بهره‌برداری بر اساس مدل‌های شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. چالش اصلی در توسعه بهره‌برداری بهینه از مخازن تقابل با پیچیدگی‌های معمول سیستم و از جمله عدم قطعیت در مورد جریان‌های ورودی و قیمت انرژی تولید شده در آینده می‌باشد. علاوه بر پیچیدگی‌های فوق در طراحی و مدیریت منابع آب، پارامترهای اجتماعی و زیست محیطی مدام در حال تغییر هستند. بنابراین تعداد زیادی از پارامترهای موثر روی سیستم دارای عدم قطعیت هستند [2]. تابع هدف در بهینه‌سازی می‌تواند منجر به حداقل‌سازی مجموع خسارت ناشی از خروجی تخصیص داده شده در طول دوره بهره‌برداری شود. در این تابع، فرض می‌گردد که خسارت ناشی از رهاسازی آب از سیستم تنها تابعی از نسبت خروجی به نیاز در هر ماه است. این تابع هزینه، محدب و نمایی بوده و محور افقی آن نیز بی‌بُعد می‌باشد. دامنه رهاسازی مطمئن آب شامل محدوده ٪۸۰ تا ٪۱۲۰ می‌باشد که در این محدوده، مقدار خسارت صفر فرض می‌شود. در بیرون از محدوده مطمئن، همان‌طور که انحراف از خروجی مطلوب بیشتر می‌شود، هزینه‌ها به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد[۳]. مدل بهره‌برداری سد کرخه با هدف تخصیص آب به مصرف‌کنندگان پایین‌دست رودخانه کرخه بر اساس نیازهای کمی و کیفی آن‌ها تدوین شد به طوری که تا حد امکان اهداف سیستم تامین گردد. مدل حل اختلاف Nash به عنوان تابع هدف مدل بهینه‌سازی انتخاب شده بود. به منظور پیش‌بینی نیازهای مختلف سیستم تا افق برنامه‌ریزی از روش پویایی‌های سیستم استفاده شده است. این رویکرد بر مبنای شناخت عوامل تاثیرگذار بر سیستم و تعریف روابط علت و معلولی بین پدیده‌های مرتبط می‌باشد. از آنجایی‌که آب تخصیص یافته به سازمانهای مختلف بر اساس معیارها و محدودیت‌های کیفی سیستم رودخانه و مخزن کرخه می‌باشد، برای این منظور مدل‌های شبیه‌سازی کیفی رودخانه و مخزن جهت الحاق به مدل بهینه‌سازی تهیه شده است[۴] و [۵]. برای پیدا کردن جواب بهینه تابع هدف تخصیص، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. کاربرد وسیع روش الگوریتم ژنتیک در سالهای اخیر، برنامه ریزان نرم افزار مطلب را بر آن داشته است تا جعبه ابزار جدیدی به نام الگوریتم ژنتیک به آن اضافه کنند. با در نظر گرفتن افق دید برنامه ریزی یک ساله و بازه های زمانی ماهانه، این الگوریتم برای سد جیرفت قابل اجرا است. نتایج حاصل نشان داد که در بدترین شرایط خشکسالی نیز با مدیریت صحیح، سد جیرفت نیاز پایین دست را برآورده می‌کند[۶]. قابلیت اطمینان و تاب آوری روش الگوریتم ژنتیک بیشتر از روش برنامه‌ریزی دینامیک است و آسیب پذیری آن هم کمتر گزارش شده است[۷]. پژوهشگر دیگری

با تلفیق روش‌های هیدرولوژی و منابع آب به منظور مدیریت سیلاب نسبت به روندیابی سیل در مخزن با استفاده از مدل روندیابی HydroRout و متعاقب آن در سامانه رودخانه‌ای توسط مدل هیدرودینامیک Mike11 اقدام نمود. با اجرای مدل هیدرودینامیک، تراز بالا آمدن آب در سیلاب دشت و نیز منحنی دبی – اشل که از خروجی‌های مدل می باشند، برای طول بازه بدست آمد. از تلفیق تحلیل‌های هیدرولوژیکی و نتایج شبیه‌سازی جریان سیل، منحنی دبی– احتمال وقوع حاصل گردید. این منحنی به رابطه برآورد خسارات نسبی در مقابل احتمال منتج شد[۸]. در تحقیقی میزان خطرپذیری اراضی اطراف رودخانه را قبل و بعد از احداث سد مخزنی کرخه را مورد بررسی قرار گرفته شد. منحنی آب گرفتگی قبل و بعد از احداث سد به شکل غیر خطی است. محقق با مقایسه دو منحنی نتیجه گرفت نرخ (شدت) کاهش در احتمالات مختلف یکسان نیست [۹]. در تحقیق دیگر قابلیت‌های الگوریتم چهارگانه مختلف از الگوریتم‌های بهینه سازی جامعه مورچگان به منظور حل دو مسأله ی تک هدفه بهره برداری از مخزن سد دز به منظور تأمین آب مورد نیاز و بهره برداری برقابی از مخزن سد دز مورد بررسی قرار داده شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچگان الگوریتمی مناسب در حل مسایل بهره برداری مخازن سدها از می‌باشد[10]. محققان بر اساس یک دیدگاه نوین تلفیقی، یک مدل بهینه سازی بهره برداری از مخزن سد ارایه داده‌اند که در آن دو هدف تأمین نیاز پایین دست و خروج رسوبات از مخزن تواماً منظور می‌شوند. مقایسه نتایج مدل بهینه سازی با نتایج واقعی بهره برداری از مخزن سد سفیدرود در یک دوره پنج ساله راهکارهای اجرایی مناسب برای عملیات آینده فلاشینگ در مخزن سد مذکور برای دست یابی به راندمان رسوب زدایی بالاتر و تأمین بهتر نیازهای پایین دست توصیه شده است. بهره برداری بهینه از مخازن سدها با در نظر گرفتن شرایط پویا برای آوردها و نیازهای پایین دست سد کمتر مورد توجه قرار گرفته است[11]. در پژوهشی با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان پویا با رویکرد پسرو و در نظر گرفتن کلیه تغییرات زمانی برای مخزن سد دز انجام داده‌اند و مقادیر رهاسازی جهت بهینه کردن بهره برداری از مخزن را مشخص نموده‌اند[12]. محقق دیگر به توسعه یک مدل آبدهی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی در سیستم منابع آب سه مخزنی حوضه آبریز زهره در جنوب غرب ایران پرداخته است. اساس این مدل، مبتنی بر معادله‌های پیوستگی ذخیره مخزن، معادله‌های آبدهی در هر مخزن، معادله‌های تخصیص آب و محدودیت‌های ظرفیت ذخیره است که تابع هدف آن حداکثرسازی مجموع آبدهی ماهانه قابل رهاسازی از سدهای مخزنی در یک دوره درازمدت، برای تامین نیازهای مختلف است[13]. یک روش نیز برای مدیریت در زمان واقعی در سیستم های مخزن– رودخانه تدوین شد. این روش مبتنی بر ترکیب مدل بهینه سازی عملیات مخزن الگوریتم ژنتیکی و یک مدل شبیه سازی مسیریابی سیلاب مبتنی بر هیدرولیک در سیستم رودخانه پایین دست، پایگاه داده مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و استفاده از الگوریتم K-Nearest Neighbor یا (K-NN) برای تدوین قوانین عملیاتی بهینه است. مدل بهینه سازی میزان انتشار مخازن ساعتی بهینه را تخمین می‌زند تا خسارت سیلاب در پایین دست را به حداقل برساند. از ابزارهای GIS نیز برای مشخص کردن تفاوت مناطق مورد استفاده و توابع خسارت در پایین‌دست پهنه سیلاب استفاده شده است و با مدل Hec-GeoRAS مرتبط شده است[14]. مرور منابع نشان داد که توابع خسارات سیل به عنوان توابع هدف در سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن سدها مهم و کار ساز می‌باشد. طی فروردین ۱۳۹۸ در رودخانه کرخه سیلاب با دوره

بازگشت بالا و احتمال کم رخ داد و خسارتی در گستره‌ای به وسعت ۸۱ هزار هکتار بوجود آورد. این پژوهش به منظور تعیین تابع هدف و اعمال سیاست‌های بهینه در مدیریت سیلاب سامانه مخزن- رودخانه پایین‌دست سد کرخه تعریف و در سه سناریو شامل ارزیابی سیل فروردین ۹۸، خسارت- صفر و خسارت حداقل شبیه سازی انجام گردید.

۲. مواد و روش‌ها

میدان کار پژوهش حاضر حوضه آبریز سد مخزنی کرخه و بازه پایین‌دست آن تا تالاب هورالعظیم را شامل می‌شود. رودخانه کرخه از چند شاخه اصلی به نامهای گاماسیاب، قره سو، سیمره، کشکان و تعداد زیادی شاخه‌های کوچک و بزرگ تشکیل شده است. سامانه رودخانه‌ی کرخه یکی از مهمترین رودخانه‌های حوضه آبریز خلیج فارس ودریای عمان می‌باشد که مساحت حوضه آن حدود ۵۰۷۲۷ کیلومترمربع است. این رودخانه مستقیماً وارد خلیج فارس نمی‌شود، بلکه ابتدا وارد هورالعظیم شده سپس از طریق اروندرود با خلیج فارس ارتباط پیدا می‌کند. سرشاخه‌های رودخانه کرخه آب‌های مناطق وسیعی از استان‌های ایلام، کرمانشاه، لرستان، همدان ومناطق محدودی از استان‌های کردستان و خوزستان را زهکشی و وارد هورالعظیم می‌نماید. رودخانه کرخه با گذر از ارتفاعات زاگرس وارد جلگه خوزستان شده و از غرب دزفول و شهرهای شوش، سوسنگرد و بستان عبور کرده و طی انشعابات متعدد وارد تالاب هورالعظیم می‌گردد. از شاخه‌های اصلی در دشت آزادگان می‌توان به شاخه‌های سابله، هوفل, نیسان و کرخه‌نور اشاره نمود. در حال حاضر دو سد سیمره و کرخه بر روی این رودخانه در حال بهره‌برداری هستند. بخش مولد رواناب حوضه تقریباً تا محل سد کرخه است که وسعت آن حدود ۴۳۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز کرخه در بخش مولد رواناب منطبق با اهداف پژوهش در محل پای پل را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز کرخه در ایستگاه هیدرومتری پای پل

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
سطح حوضه آبریز (کیلومتر مربع)	43347	شیب خالص آبراهه اصلی (درصد)	0.30
محیط حوضه آبریز (کیلومتر)	1488	ضریب فشردگی حوضه آبریز	2.00
ارتفاع حداکثر حوضه آبریز (متر)	3615	نسبت دایره ای حوضه آبریز	0.25
ارتفاع حداقل حوضه آبریز (متر)	101	نسبت کشیدگی حوضه آبریز	0.31
ارتفاع متوسط حوضه آبریز (متر)	1551	طول مستطیل معادل حوضه آبریز (کیلومتر)	680
ارتفاع میانه حوضه آبریز (متر)	1561	عرض مستطیل معادل حوضه آبریز (کیلومتر)	64
طول شاخه اصلی حوضه آبریز (کیلومتر)	770	زمان تمرکز (ساعت)	88.7
شیب متوسط آبراهه اصلی (درصد)	0.23	زمان تأخیر (ساعت)	53.2

متدلوژی مطالعه حاضر بر اساس اصول شناخته شده شبیه سازی و بهینه سازی در منابع آب و واقعیت‌های میدانی سیل فروردین ۱۳۹۸ رودخانه کرخه در جلگه خوزستان شکل می‌گیرد. بهینه‌سازی در واقع تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم برای حداقل یا حداکثر کردن تابع هدف است. اکثر مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن که تاکنون توسعه

داده شده‌اند، برای بهره‌برداری در مقیاس ماهانه و یا فصلی مناسب بوده و قادر به در نظر گرفتن تغییرات قابل توجه ورودی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت سیلابی نمی‌باشند. سیاست‌های بهره‌برداری که در قالب این مدل‌ها تدوین می-شوند، اعم از استاتیک یا دینامیک، از کارایی قابل قبولی در مدیریت سیلاب در مخزن برخوردار نیستند [15]. علاوه بر موارد فوق، ماهیت کوتاه‌مدت و ساعتی مدیریت بهره‌برداری از مخزن در شرایط سیلابی، استفاده از روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی نظیر برنامه‌ریزی پویا را عملاً با مشکلات زیادی مواجه می‌کند. دلیل این امر، تغییرات کم حجم ذخیره مخزن در مقیاس ساعتی و ضرورت افزایش قابل توجه تعداد مجزاسازی حجم مخزن می‌باشد که روش‌هایی نظیر برنامه‌ریزی پویا را با مشکلات ابعادی مواجه می‌سازد. در مبحث سیلاب منظور از تابع هدف، حداقل‌سازی مجموع خسارت ناشی از خروجی مخزن می‌باشد که در آن خسارت ناشی از رهاسازی آب از سیستم تنها تابعی از نسبت خروجی به دبی ایمن رودخانه پایین‌دست در نظر گرفته می‌شود. دامنه رهاسازی مطمئن می‌تواند شامل محدوده صفر تا ۱۰۰٪ دبی ایمن رودخانه پایین‌دست باشد. خارج از محدوده مطمئن، با افزایش انحراف از خروجی مطلوب، هزینه‌ها به‌صورت نمایی افزایش می‌یابند [۳]:

$$Loss(t) = 0 \qquad , RR(t) \le 1$$
$$Loss(t) = 3.88 * 10^5 (e^{(RR(t)/1.2)} - e^1) \qquad , RR(t) > 1 \qquad (۱)$$

که در آن‌ها Loss(t) تابع هزینه‌ها و RR(t) برابر نسبت خروجی به دبی ایمن رودخانه پایین دست می‌باشد. در مواقع عدم رعایت محدوده‌های مجاز حجم و خروجی مخزن، مقدار جریمه ثابتی در نظر گرفته شده است. مطابق تحقیقات زهرایی و تکشی(۱۳۸۵)، متغیرهای تصمیم جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، میزان خروجی دو ساعته می‌باشد که این متغیر در طول دوره بهره‌برداری (شروع تا پایان سیلاب) بایستی بهینه گردد. در تمام مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن باید موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره مخزن برقرار باشد:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t \qquad (۲)$$

St+1 : حجم ذخیره مخزن در زمان t+1 — St : حجم ذخیره مخزن در زمان t

It : ورودی به مخزن در زمان t — Rt : خروجی از مخزن در زمان t

همچنین در تمام مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، حجم ذخیره بایستی بین مقادیر حداقل و حداکثر رقوم کنترل سیلاب باشد و نیز میزان خروجی بهینه شده در هر دوره بین مقادیر حداقل و حداکثر آن باشد. تابع ذکر شده علیرغم مفید بودن دارای اشکال نیز هست. وقتی RR(t) بین محدوده ۱ تا 1/2 باشد نمای ترم اول تابع از یک کوچکتر خواهد بود. بعبارتی دیگر مقدار هزینه منفی خواهد شد. به منظور اصلاح این تابع کلی میزان سطح خسارت را بصورت تابعی از ارتفاع/دبی برای کل محدوده سیلاب فروردین ۱۳۹۸ رودخانه کرخه استخراج و بی بعد گردید. بنابراین تابع هدف مطابق ذیل اصلاح شد:

$$Loss(t) = 0 \qquad , RR(t) \le 1$$

$$Loss(t) = \alpha * \exp(\frac{RR(t)}{\beta}) \qquad , RR(t) > 1 \tag{۳}$$

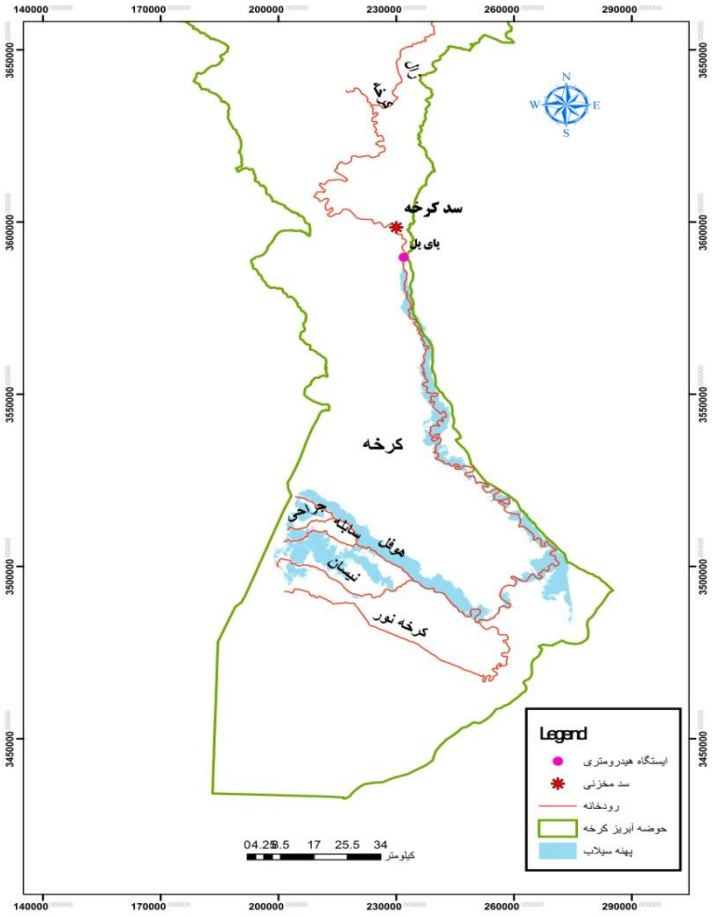
نقشه (۱) موقعیت سد مخزنی کرخه و گستره سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در شرایط حداکثری نشان می‌دهد. وضعیت هیپسومتری محدوده آبگرفتگی از روی مدل رقومی ۱۰*۱۰ استخراج و در تعیین تابع هدف استفاده شد. راجع به ضرایب تابع هدف و نحوه استخراج آن در بخش بعدی یعنی نتایج، بحث می‌شود.

۳. نتایج و بحث

حوضه‌های آبریز جنوب غرب کشور از جمله حوضه کرخه از سال ۱۳۸۶ وارد یک دوره خشکسالی گردید. اما در سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ با وقوع بارش‌های حدی این حوضه شاهد سیلابهای بزرگ و سال پرآبی شد. میزان جریان ورودی و خروجی سد کرخه از ابتدای سال آبی تا انتهای تیر ماه ۳۰۳ روز در شکل (۱) ارائه شده است. طی زمان مذکور میزان ۱۱/۷ میلیارد متر مکعب از مخزن سد کرخه وارد دشت خوزستان شد.

در سیلاب فروردین ۹۸ تعدادی از ایستگاه‌های هیدرومتری طی این واقعه آسیب دیدند و در بازه‌های رودخانه‌ای بین ایستگاه‌ها نیز با شکست سیل‌بند، جریان به سیلاب دشت و گستره های سیل به وسعت حدود ۸۱۶ کیلومتر مربع انتقال و وارد شد. جریان پایه رودخانه‌ای و بخشی از جریان سیلابی از طریق مسیل ها و خط القعرهای طبیعی به صورت مستقیم وارد تالاب هورالعظیم (بخش ایرانی و عراقی تالاب) گردید و بخشی از جریان سیلابی در گستره‌های سیلابی نفوذ، ذخیره و نهایتاً تبخیر گردید. با توجه به گستره سیلاب مورد بحث و مطابق متدلوژی ذکر شده در بند پیش نسبت به استخراج توابع نسبی خسارت اقدام و ضرایب تابع هدف ذکر شده در رابطه (۳) محاسبه شد. در شکل‌های (۲) تا (۴) رابطه بی بعد شده ارتفاع- مساحت، دبی و خسارت نسبی سیل فروردین ۱۳۹۸ ارائه شده است.

$$\left(\frac{A_i}{A_{\max}}\right) = 0.186 \ln\left(\frac{h_i}{h_{\max}}\right) + \ln(e + 0.03) \tag{۴}$$



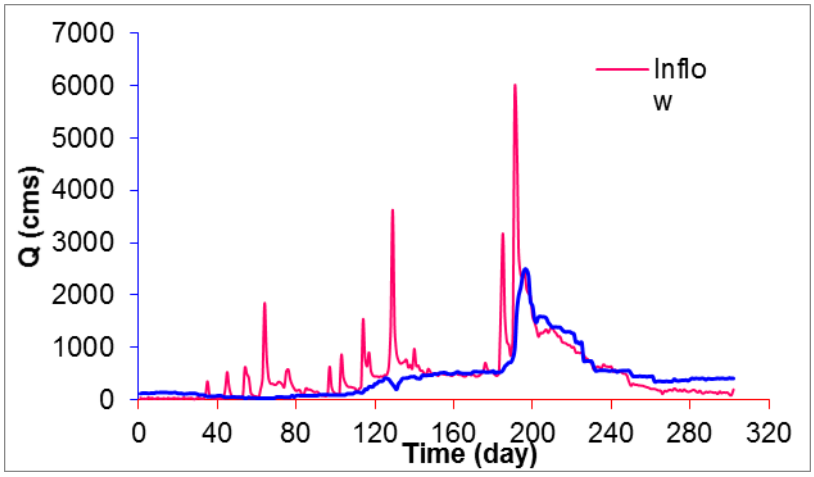
نقشه (۱): موقعیت سد مخزنی کرخه و گستره سیلاب پایین دست

$$\left(\frac{Q_i}{Q_{safe}}\right)=1.082\ln\left(\frac{h_i}{h_{\max}}\right)+\ln(e+86) \qquad (۵)$$

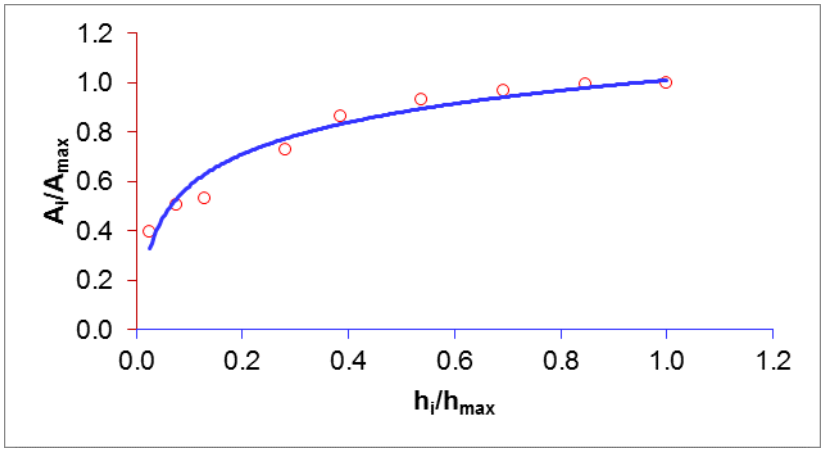
$$Loss(t)=0 \qquad ,RR(t)\le 1$$

$$Loss(t)=3.47*10^5\exp\left(\frac{RR(t)}{4.15}\right) \qquad ,RR(t)>1 \qquad (۶)$$

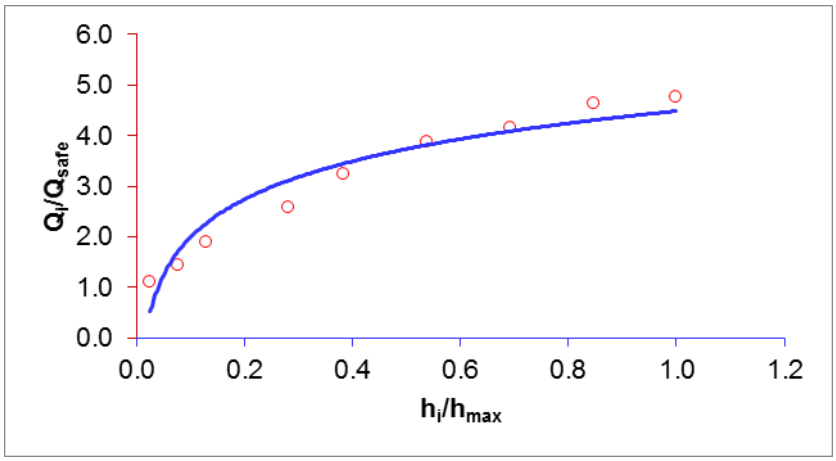
$$RR(t)=\left(\frac{Q_i}{Q_{safe}}\right)$$



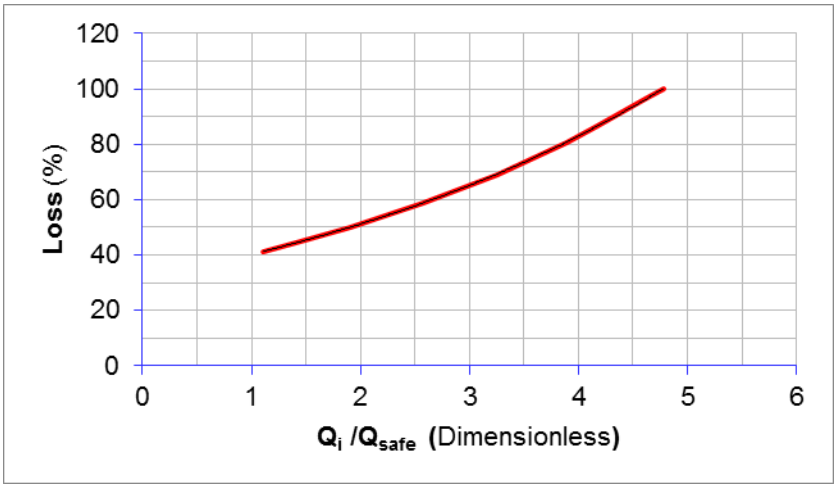
شکل۱- هیدروگراف جریان ورودی و خروجی مخزن سد کرخه از ابتدای سال آبی



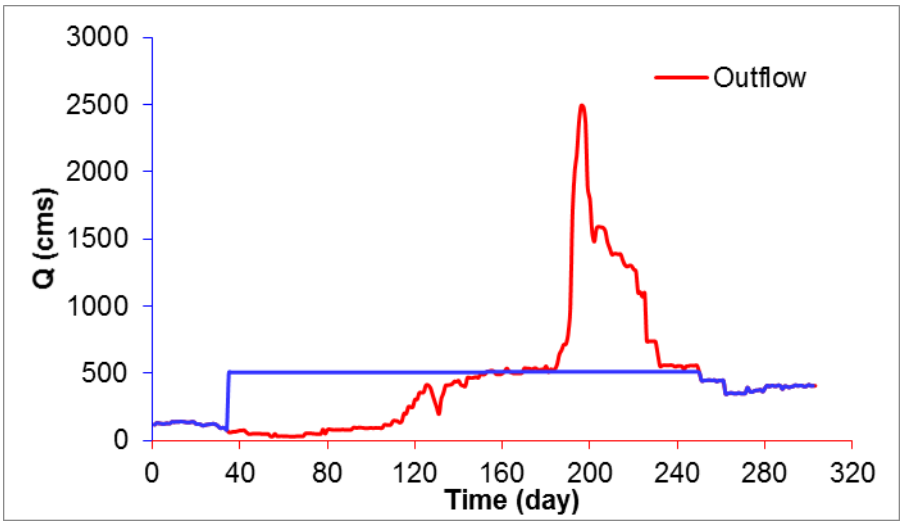
شکل۲- رابطه بی بعد شده ارتفاع- مساحت خسارت سیل فروردین ۱۳۹۸



شکل۳- رابطه بی بعد شده ارتفاع- دبی خسارت سیل فروردین ۱۳۹۸



شکل۴- رابطه دبی با خسارت نسبی سیل فروردین ۱۳۹۸



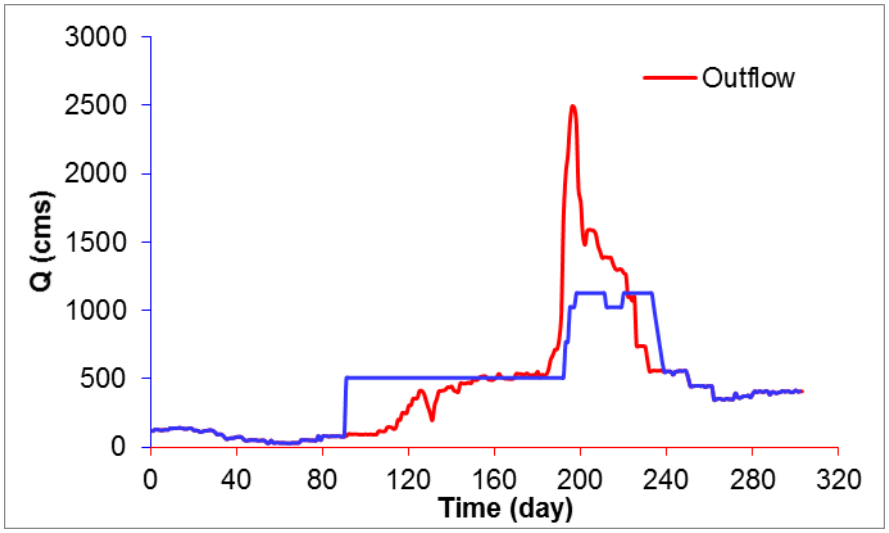
شکل۵- خروجی سد کرخه و خروجی بهینه شده بر اساس جریان ورودی قطعی (سناریو خسارات صفر)

شکل(۱) هیدروگراف ورودی و خروجی به سد مخزنی کرخه از ابتدای سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ یعنی از اول مهر ماه ۱۳۹۷ تا آخر تیر ماه ۱۳۹۸ به مدت ۳۰۳ روز را نشان می‌دهد. میزان خروجی در این دوره زمانی به طور متوسط ۴۴۵ متر مکعب بر ثانیه و معادل حجم ۱۱/۷ میلیارد متر مکعب می‌باشد. همانگونه که در شکل مورد بحث ملاحظه می‌شود در این سال آبی از آذر ماه تا اردیبهشت ماه سیلاب‌های متعددی وارد سد مخزنی کرخه شده که بزرگترین و آخرین آنها در فروردین ماه ۱۳۹۸ رخ داد. سیل فروردین به ناچار منجر به خروجی بیش از دبی ایمن رودخانه در پایین‌دست از سوم فروردین تا آخر اردیبهشت ۱۳۹۸ گردید. طی این بازه زمانی ۶۰ روزه حدود ۶ میلیارد متر مکعب معادل دبی متوسط ۱۱۶۸ متر مکعب در ثانیه از سد خارج گردید. اضافه می‌شود که دبی حداکثر خروجی در روز هفدهم فروردین ۱۳۹۸ و به میزان ۲۴۹۲ متر مکعب در ثانیه رخ داد. همانگونه که اشاره شد در این بازه زمانی دبی خروجی سد از دبی ایمن

رودخانه کرخه در پایین‌دست یعنی رقم ۵۱۲ متر مکعب در ثانیه بیشتر بود و باعث ایجاد خسارت در گستره‌ای به مساحت بیش از ۸۱ هزار هکتار گردید. میزان خسارت و دبی نسبت به ارتفاع گستره سیل در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است.

روابط (۴) و (۵) و تابع هدف ارایه شده در معادله (۶)، ابزار ریاضی سودمندی برای ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی مخزن کرخه در سیل فروردین ۱۳۹۸ و سیلاب‌های محتمل آن را فراهم کرده است.

میزان جریان خروجی سد مخزنی کرخه نمایش داده شده در شکل (۱) توسط تابع هدف رابطه (۶) شبیه‌سازی و نتیجه آن بصورت خسارت نسبی در شکل (۴) منعکس گردید. خسارت ناشی از عبور شاخص $RR(t)$ از مقدار یک بوده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود در مراحل ابتدایی انحراف از دبی ایمن رودخانه میزان خسارت نسبی به ۴۰ درصد کل خسارت رسید. این امر به دلیل امکانات محدوده درون سیستم در تخلیه سیلاب برمی‌گردد. ۵۰ درصد خسارات سیلاب مربوط به دبی خروجی متوسط ۹۷۷ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. دبی‌های خروجی حدود ۱۳۵۰ و ۱۷۰۰ متر مکعب در ثانیه باعث ایجاد ۶۰ و ۷۰ درصد خسارت گردید و بالاخره ۸۵ درصد خسارات نسبی در دبی ۲۱۰۰ متر مکعب در ثانیه اتفاق افتاد. سوالی که پیش می‌آید این است که آیا بهره‌برداران سد می‌توانستند به منظور کاهش خسارات سیل، سیاست بهره‌برداری مناسب‌تری اتخاذ کنند. به منظور پاسخ به این سوال یک سناریوی دیگری توسط تابع هدف شبیه‌سازی شد. در این حالت فرض شده جریان ورودی به سد بطور قطعی از پیش معلوم و برابر مقادیر حادث شده می‌باشد. نتایج شبیه سازی این سناریو حاکی از این است که برای ایجاد شرایط ایمن و بدون خسارت (خسارت صفر) نیاز بود حجم معادل ۹/۵ میلیارد مترمکعب معادل دبی ثابت ۵۰۹ متر مکعب بر ثانیه از ۵ آبان ماه ۱۳۹۷ به مدت ۲۱۶ روز رها سازی شود شکل (۵). در ابتدای این دوره حجم مخزن ۲۳۵۴ میلیون مترمکعب و ارتفاع سطح آب مخزن برابر ۱۹۶/۸۱ متر است، بنابراین بلحاظ عملی تحمل ریسک بزرگ و رهاسازی در حد دبی ایمن از ۵ آبان میسر نبود. این امر منتج به تعریف سناریوی سوم شبیه سازی مبنی بر تنظیم خروجی معادل آستانه دبی ایمن از اول دی ماه ۱۳۹۷ گردید. خروجی این دوره در حد آستانه دبی ایمن تنظیم و تا ۱۰۰ روز ادامه داشت، طی این مدت قید محدودیت (حجم ۴۷۰۰ میلیون مترمکعب و ارتفاع ۲۱۶/۲ متر) عمل نکرده اما از آنجایی که در روز ۱۳ فروردین ماه ۱۳۹۸ یعنی روز ۱۰۱ ام شبیه سازی، حجم جریانی معادل ۵۱۰ میلیون مترمکعب وارد مخزن شد قید حجم ذخیره مخزن وارد محاسبات می‌شود و ناچاراً دبی خروجی از آستانه دبی ایمن بیشتر می‌شود. شبیه سازی این سناریو در شکل (۶) منعکس شده است. نتایج شبیه سازی حاکی از این است که ناچاراً خروجی از روز ۱۴ فروردین ماه ۱۳۹۸ به مدت ۵۷ از دبی ایمن رودخانه فراتر می-رود. متوسط دبی این دوره برابر ۹۶۵ مترمکعب بر ثانیه، حداکثر آن ۱۱۲۶ مترمکعب بر ثانیه و حجم جریان خروجی معادل ۴۷۰۸ میلیون مترمکعب می‌باشد. خسارت نسبی این سناریو (خسارت حداقل) نسبت به خسارت سناریو اول (حادث شده) برابر ۶۴ درصد است. به عبارتی با فرض برآورد جریان ورودی قطعی از اول دی ماه ۱۳۹۷ و داشتن تابع خسارت استخراج شده در پژوهش حاضر و با اتخاذ این سیاست میزان خسارت نسبی ۳۶ درصد کاهش داده می‌شود.



شکل۶- خروجی سد کرخه و خروجی بهینه شده بر اساس جریان ورودی قطعی (سناریو-خسارت حداقل)

۴. نتیجه‌گیری

سیلاب فروردین ۱۳۹۸ رودخانه کرخه یک سیلاب تاریخی و رتبه اول سیلاب‌های مشاهداتی را به خود اختصاص داده و باعث ایجاد خسارت در گستره‌ای به مساحت بیش از ۸۱ هزار هکتار گردید. بمنظور ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری اتخاذ شده قبل و حین سیلاب، یک تابع خسارت برای منطقه تحت تاثیر سیل توسعه داده شد. با استفاده از دبی ایمن رودخانه و شاخص $RR(t)$ (نسبت دبی خروجی سد به دبی ایمن رودخانه در پایین‌دست) سه سناریو شبیه‌سازی شد. در سناریوی اول جریان ورودی و خروجی ثبت شده از مخزن از ابتدای سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ تا انتهای تیر ماه شبیه‌سازی و میزان خسارت محاسبه گردید. در سناریوی میانه سیاست بهره‌برداری خسارت-صفر و در سناریوی آخر خسارت حداقل اتخاذ شد. نتایج حاکی از این است که در سناریو دوم برای ایجاد شرایط ایمن و بدون خسارت (خسارت صفر) نیاز است حجم ۹/۵ میلیارد مترمکعب معادل دبی ثابت ۵۰۹ متر مکعب بر ثانیه از ۵ آبان ماه ۱۳۹۷ به مدت ۲۱۶ روز رها سازی شود. در سناریو آخر با فرض برآورد جریان ورودی قطعی از اول دی ماه ۱۳۹۷ و داشتن تابع خسارت استخراج شده در پژوهش حاضر، میزان خسارت نسبی ۳۶ درصد کاهش داده می‌شود.

۵. قدردانی

از همکاران محترم معاونت مطالعات، آقایان مهندس طرفی و حسین زاده بدلیل همکاری در استخراج داده های هندسی گستره سیل و همچنین همکاران محترم دفتر پژوهش‌های کاربردی سازمان آب و برق خوزستان تشکر می‌شود.

۶. مراجع

1. Yeh, W. G. 1985. Reservoir Management and Operation Models: A State-of-the-art review, Water Resources Research, 21(12), pp. 1797-1818
2. Labadi, J. W. 2004. Optimal Operation of Multi Reservoir Systems: State-of-the-art Review, Journal of Water Planning and Management. 130(2) pp. 93-111.
3. Karamouz M., Araghinejad S., and Haghnegahdar A. (2004) "Calibration and Validation of Long-term Stream flow Forecasting Models" Conference Proceeding Paper, Critical Transition in Water and Environmental Resources Management, USA.

۴. کارآموز، م، (۱۳۸۴-ب)، "گزارش نهایی برنامه‌ریزی و مدیریت کمی و کیفی بهره‌برداری و تخصیص آب با تاکید بر حل اختلاف"، وزارت نیرو.

۵. کارآموز، م. احمدی، آ. و نظیف، س. (۱۳۸۵). چالش‌ها و فرصت‌های بکارگیری مدل‌های بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب. لوح فشرده اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده رود شهرکرد - دانشگاه شهرکرد ۱۶ص.

۶. امینی, امید؛ رهنما،م. ابراهیمی،ح (۱۳۸۶)، "بهینه سازی بهره برداری از مخازن سدها با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سد جیرفت)"، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شهرکرد، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد

7. A. Adib and M.A. Samandizadeh INTERNATIONAL JOURNAL OF OPTIMIZATION IN CIVIL ENGINEERING Int. J. Optim. Civil Eng., 2016; 6(1):43-62

۸. حمادی ک. (۱۳۸۷) . تلفیق روش‌های هیدرولوژی و منابع آب در مدیریت سیلاب، پایان نامه دکتری هیدرولوژی و منابع آب دانشگاه شهید چمران اهواز، ۲۱۸ ص.

۹. محمدپور، م؛ بهنیا، ع؛ آخوند علی، ع؛ تلوری، ع؛(۱۳۸۷) تاثیر سد مخزنی کرخه بر میزان خطر پذیری اراضی پایین دست و حریم قانونی رودخانه، مجله علوم و صنایع کشاورزی ویژه آب و خاک، جلد ۲۲، شماره۱، ص۹۶-۷۹.

۱۰. افشاری، محمد هادی. رضایی سنگدهی، سید ابراهیم. معینی، رامتین ۱۳۹۳، "الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچگان در مساله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها: مطالعه مقایسه‌ای چهار الگوریتم" نشریه مهندسی عمران فردوسی، سال ۲۵،شماره ۲، ۱۳۹۳

۱۱. سعید اشرف واقفی، سید جمشید موسوی، بنفشه زهرایی،" بهینه سازی چند هدفه بهره برداری از مخزن سد با در نظر گرفتن رسوب زدایی و تامین نیاز پایین‌دست به کمک اگوریتم رقابت استعماری" نشریه نیروگاه برق‌آبی ایران دوره ۱، شماره ۲،(۶-۱۳۹۳)

۱۲. امین نژاد, بابک و روزبه فرخ زاد، (۱۳۹۴)، بهره برداری بهینه از مخازن سدها با استفاده از الگوریتم جامعه ی مورچگان، کنفرانس بین المللی مهندسی و علوم کاربردی، دبی، موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا

۱۳. تقیان، مهرداد "برآورد آبدهی مطمئن در سیستمهای منابع آب با استفاده از بهینه سازی خطی" مجله علوم و مهندسی آبیاری(مجله علمی- پژوهشی)، جلد ۴۰ ، شماره ۱ بهار۹۶

14. B. Malekmohammadi ,B. Zahraie ,R. Kerachian "A real-time operation optimization model for flood management in river-reservoir systems "460 Nat Hazards (2010) 53:459–482

۱۵. زهرایی, بنفشه و آذر تکشی، (۱۳۸۵)، "تدوین سیاستهای بهینه بهره برداری از سد شهید عباسپور در شرایط سیلابی"، اولین همایش منطقه ای بهره برداری از منابع آب حوضه های کارون و زاینده رود (فرصتها و چالشها)، شهرکرد، دانشگاه شهرکرد