



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱

صفحه‌های ۵۱۰-۴۹۷

DOI: 10.22059/jwim.2022.338666.963

مقاله پژوهشی:

### بررسی اثرات تخریبی جریان سیلابی بر روی دال بتنی کف سرریز (مطالعه موردی: سرریز سد بوکان)

امیر بهرامی فر<sup>۱</sup>، حسن افشین<sup>۲\*</sup>، مهرداد امامی تبریزی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری عمران، دانشکده مهندسی عمران، سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

#### چکیده

سرریز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌های آبی وابسته سدها، جریان سیلاب ورودی به مخزن سد را در مواقع تکمیل ظرفیت آن، با ایمنی کافی به پایین‌دست انتقال می‌دهد. ایمنی سدها به‌طور مهم ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با کفایت ظرفیت سرریز دارد. از این رو، اطمینان از عملکرد دقیق سازه‌ای و هیدرولیکی سرریزها از نکات بسیار مهم در همه سدها می‌باشد. در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی عوامل مؤثر بر تخریب پانل بتنی سرریز سد بوکان با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای WS77 و Flow3D به شبیه‌سازی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان بر روی سرریز به‌ازای دبی‌های سیلابی ۵۰ و ۱۰۰۰۰ ساله پرداخته شد. عوامل مختلف شناخته‌شده در تخریب پانل بتنی سرریزها هم‌چون وقوع پدیده کاویتاسیون، نوسانات فشار، فشار برگشت و جک هیدرولیکی نیز مورد بررسی قرار گرفتند. هم‌چنان که در نتایج آمده است، حداقل شاخص کاویتاسیون در سیلاب‌های منتخب ۵۰ و ۱۰ هزارساله به‌ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۷۵ است که از مقدار بحرانی ۰/۲ بیش‌تر است. علاوه بر آن شاخص پتانسیل خرابی در حداکثر مقادیر محاسبه‌شده در دو سیلاب مذکور به‌ترتیب برابر با ۱۱۱ و ۱۹۸ (در آفست ۲/۵ سانتی‌متری) است که از مقدار آستانه تخریب برابر با ۵۰۰، فاصله دارد. بر این اساس وقوع پدیده کاویتاسیون غیرمحمول و لحاظ اقدامات مقابله با کاویتاسیون هم‌چون سازه هوادها در سرریز سد بوکان توصیه نمی‌شود. با این وجود، نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که با افزایش فشار ناشی از وقوع پدیده جک هیدرولیکی در کنار فشار برگشت به مقادیر بیش از مؤلفه وزن و نیروی مقاوم انکرها، منجر به جابه‌جایی پانل بتنی کف سرریز شده است که باید ترمیم شود.

**کلیدواژه‌ها:** انکر، جک هیدرولیکی، سازه‌های هیدرولیکی، فشار برگشت.

### Investigation of destructive effects of flood flow over slab-on-ground of spillway (Case study: Bukan Dam spillway)

Amir Bahramifar<sup>1</sup>, Hassan Afshin<sup>2\*</sup>, Mehrdad Emami Tabrizi<sup>3</sup>

1. Ph. D. Student, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of technology, Tabriz, Iran.

2. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of technology, Tabriz, Iran.

3. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of technology, Tabriz, Iran.

Received: February 06, 2022

Accepted: July 17, 2022

#### Abstract

When the dam reservoir exceeds its capacity, the spillway, as one of the most significant water-dependent elements of dams, safely conveys the oncoming flood flow to the dam reservoir. Dam safety is inextricably linked to sufficient spillway capacity. Therefore, one of the most pressing issues in all dams is ensuring the accuracy of structures and the hydraulic operation of spillways. In the present study, the hydraulic parameters of the flow on the spillway for the flood discharges with 50 and 10,000-year return periods were simulated using WS77 and Flow3D softwares in order to evaluate the factors affecting the destruction of the concrete panel of the Bukan Dam spillway. Various known factors in the destruction of spillway floor concrete panels such as cavitation, pressure fluctuations, uplift pressure and hydraulic jacks were also investigated. As shown in the results, the minimum cavitation index in selected floods of 50 and 10 thousand years is 0.31 and 0.275, respectively, which is more than the critical value of 0.2. Furthermore, at the maximum values estimated in the two floods, the failure potential index is 111 and 198 (2.5 cm offset) respectively, which is much below the value of the destruction threshold of 500. However, the results show that increased pressure owing to the hydraulic jack phenomenon, as well as uplift pressure to values greater than the concrete panel weight component and anchor strength, has resulted in spillway floor concrete panel displacement.

**Keywords:** Bukan Dam, Cavitation, Concrete Floor Panel, Destruction, Spillway, Stagnation pressure.

## مقدمه

سدها سازه‌هایی هستند که در مسیر رودخانه‌ها ساخته شده و باعث تشکیل مخزن و بالآمدن سطح آب در بالادست می‌شوند. یکی از سازه‌های مهم سدها، که پایداری سد و مناطق پایین‌دست را در زمان وقوع سیلاب تضمین می‌کند، سرریزها هستند (Chanson, 1994). سرریز عبارت است از سازه‌ای که آب اضافی را به‌ویژه در زمان وقوع سیل که جریان آب به بدنه سد و تأسیسات وابسته صدمه می‌زند و ممکن است باعث خرابی آن‌ها شود، دفع می‌کند.

سرریز سد یکی از کلیدی‌ترین اجزای سد به‌شمار می‌رود، به‌طوری‌که شکست بسیاری از سدها به عدم‌کفایت هیدرولیکی و سازه‌ای سرریز آن‌ها نسبت داده شده است. ایمنی سدها به‌طور مهم ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با کفایت ظرفیت سرریز دارد. بیش‌تر شکست سدها در اثر عبور آب از روی تاج آن‌ها به وقوع می‌پیوندد که مهم‌ترین عامل آن کافی نبودن ظرفیت سرریز سد است. عملکرد ایمن سرریزها، در شرایط غیرعادی، عامل مهمی در ایمنی سدهاست. بر طبق گزارش‌ها منتشرشده توسط کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) حدود ۰/۳۳ شکست سدها از به‌علت عدم‌کفایت سرریز آن‌ها بوده است.

در نتیجه با توجه به حساس بودن کارکرد، سرریز باید سازه‌ای قوی، مطمئن و با راندمان بالا انتخاب شود که در هر لحظه بتواند برای بهره‌برداری آمادگی داشته و قادر به تخلیه سیل مبنای طرح باشد تا در هنگام وقوع سیل منجر به تلفات جانی و خسارت‌های مالی بیش‌ازحد انتظار نشود. درک صحیح از عملکرد سرریزها می‌تواند تا حد زیادی هزینه ساخت را کاهش و مشکلات سیل‌گرفتگی را مرتفع نماید (Barani & Abbasi, 2005).

یکی از بزرگ‌ترین مشکل‌ها و خطرهایی که ساختمان سرریزها را تهدید می‌کند، پدیده کاویتاسیون است. این

پدیده در تقاطعی از سازه که سرعت جریان آب زیاد بوده و فشار آب به پایین‌تر از فشار اتمسفر کاهش می‌یابد، امکان وقوع خواهد داشت و شدت آن متناسب با خلأ نسبی ایجادشده و دمای آب می‌باشد. اغلب این پدیده به روش مدل‌سازی فیزیکی و عددی بررسی و شبیه‌سازی می‌شود.

شاخص کاویتاسیون بنا به پارامترهای هیدرولیکی جریان و مطابق با رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_p = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_0^2}, \sigma = (C_p)_{\min} \quad (1)$$

که در معادله فوق  $\sigma$  اندیس کاویتاسیون،  $P_0$  فشار مطلق،  $P_v$  فشار بخار آب،  $\rho$  چگالی جریان و  $V_0$  سرعت جریان در نقطه موردبررسی است.

امکان ایجاد پدیده کاویتاسیون در اثر جریان بر روی سطوح غیرمسطح، توسط Jonson (1963) و Ball (1976) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. جانسون در نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات خود نشان داد که در سرعتی برابر ۳۰ متر بر ثانیه در فرورفتگی‌هایی معادل ۳ میلی‌متر نیز خوردگی رخ می‌دهد.

Falvey (1963) نشان داد سرریزهای تونل USBR با شاخص خوردگی ۰/۲ یا بالاتر از صدمات ناشی از خوردگی مصون هستند. وی محدوده مقدار بحرانی کاویتاسیون ( $\alpha$ ) بر روی مجاری تحت‌فشار، دریچه‌ها و سرریزها را ۰/۲ تا ۰/۲۵ ذکر کرده است. در همین زمینه Mehri (2006) با ساخت مدل فیزیکی سرریز سد بالارود در مقیاس ۱:۱۱۰ و تعیین شاخص کاویتاسیون در ۱۴ دبی مختلف، ثابت کرد در سرریز سد بالارود شاخص کاویتاسیون از مقدار بحرانی بیش‌تر بوده و این سرریز از خطر خوردگی در امان می‌باشد.

Kamanbedast et al. (2014) با انجام ۳۰ آزمایش در

پنج زبری مختلف بر روی مدل فیزیکی به این نتیجه رسیدند

(2009) به بررسی ماهیت و چگونگی رخ داد کاویتاسیون بر روی سرریز سد گلابر به وسیله مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۳۰ پرداختند و اثبات کردند در هیچ یک از نقاط این سرریز شاخص کاویتاسیون به مقدار بحرانی نمی‌رسد.

Zandi *et al.* (2014) به وسیله مدل پیش‌بینی فازی پدیده کاویتاسیون را بررسی نمودند ایشان از داده‌های شوت سرریز سد کارون ۱ برای این کار استفاده نمودند نتایج آن‌ها با نتایج واقعی سازگاری خوبی داشته است و با توجه به نتایج آن‌ها شوت شماره ۲ و ۳ این سرریز دارای خطر آسیب‌دیدگی جدی هستند.

Rajasekhar & Sekhar (2014) به مدل‌سازی سرریز سد ساگار با ارتفاع ۱۲۴/۶۶ متر واقع در رودخانه کریشنا به علت حفره‌های موجود بر سطح سرریز و به دست آوردن راه کارهای برای بهبود آن پرداختند. آزمایش‌های در دبی‌های مختلف و در مدلی با مقیاس ۱:۸۰ انجام گرفت. نتایج نشان داد علاوه بر دبی سیلاب طراحی، در دبی‌های پایین‌تر (معادل سه چهارم دبی طراحی) نیز فشار منفی وجود دارد. در ادامه اندازه‌گیری فشار منفی و محاسبه شاخص کاویتاسیون به این نتیجه رسیدند که کاویتاسیون در سرریز مورد نظر ایجاد و منجر به خورده شدن سطح سرریز می‌شود.

با این وجود، علاوه بر کاویتاسیون عوامل دیگری نیز از سوی پژوهش‌گران در تخریب بدنه ساختمان سرریز مورد اشاره قرار گرفته‌اند. نوسانات فشار در محدوده پرش هیدرولیکی به عنوان علت تخریب در برخی از رخدادهای مشابه شناخته شده است. در حوضچه آرامش سد مالپاسو (Netzahucoyotl (Malpaso) dam) مکزیکی بلوکی با ابعاد ۱۲×۱۲×۲ متر با وزن ۷۰۰ تن در عبور سیلاب نزدیک به ۴۰ درصد سیلاب طراحی به دلیل فشار برکنش ناشی از پرش هیدرولیکی کاملاً جابه‌جا گردید. در رویداد مشابه دیگری در سد کارنافولی بنگلادش عبور سیلابی با بزرگی

که با افزایش زبری، ضریب تخلیه و ضریب کاویتاسیون کاهش می‌یابد. Arefpour (2009) با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی هیدرودینامیک جریان و منحنی پرتاب جت پایین دست در پرتابه جامی شکل سرریز سد بالا رود در مقیاس ۱:۴۰ پرداخته است. نتایج وی حاکی از قابل قبول بودن دامنه تغییرات فشارهای دینامیکی بوده است.

Manafpour *et al.* (2019) به شبیه عددی جریان بر روی سرریز همگرای سد گاوشان پرداختند. بررسی نتایج حاکی از آن بود که با افزایش زاویه همگرایی، شاخص کاویتاسیون افزایش یافته و در نتیجه بالاترین ریسک پدیده کاویتاسیون برای مدل با حداقل زاویه همگرایی خواهد بود.

Doraghi (2009) به بررسی رفتار هیدرودینامیک جریان بر روی سرریز اوجی سه دهانه و بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت آن در مقیاس ۱:۴۰ پرداخت. وی در شش دبی مختلف پارامترهای مهم جریان شامل عمق، سرعت، فشار استاتیکی، نوسانات لحظه‌ای فشار و بی‌نظمی‌های جریان را با هدف حصول اطمینان از عملکرد مطلوب سرریز در دوران بهره‌برداری اندازه‌گیری کرد. بررسی عمق آب روی سرریز و کفایت دیواره‌ها مشخص کرد که از دبی ۲۷۴ لیتر بر ثانیه بلافاصله بعد از تبدیل ابتدایی، عمق آب به بالای دیواره سرریز می‌رسد که نیازمند اصلاح می‌باشد. حداقل ضریب خوردگی که در آستانه سرریز و در دبی ۱۹۰/۳ لیتر بر ثانیه رخ داد، ۰/۸۷ بوده ولی با توجه به ضریب خوردگی بحرانی ( $\alpha$ ) احتمال رخداد پدیده کاویتاسیون در طول محور سرریز وجود ندارد.

Savage & Jonson (2001) با استفاده از مدل فیزیکی با مصالح پلکسی گلاس مطالعاتی بر روی جریان در سرریز اوجی انجام دادند. آن‌ها داده‌های فشار و سرعت را برای ۱۰ دبی مختلف در ۲۹ موقعیت ثبت کردند و عملکرد تاج و شوت سرریز را ارزیابی نمودند. Parsi *et al.*

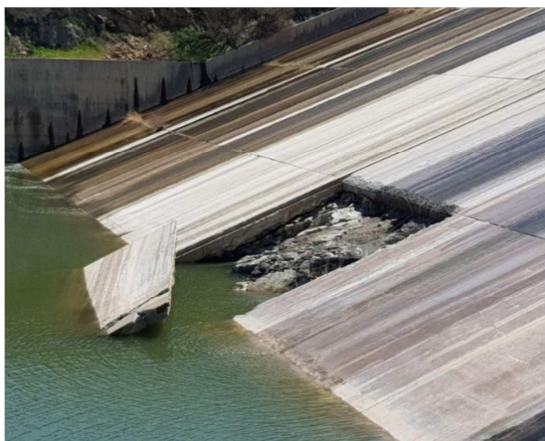
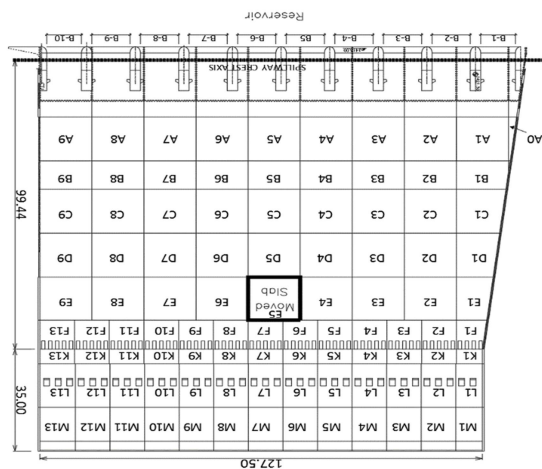


Figure 1. Location of concrete panel excavated from the spillway floor after the flood occurred in 2019

همان‌گونه که بیان شد عوامل مختلفی می‌توانند در تخریب پانل بتنی کف سرریز سدها تأثیرگذار باشند. در پژوهش حاضر با بررسی ابعاد مختلف تخریب پانل بتنی سرریز سد بوکان به شناسایی عوامل تأثیرگذار بر آن هم‌چون کاویتاسیون، فشار برکنش، جک هیدرولیکی و ... پرداخته و در نهایت پدیده اصلی مؤثرتر در رخداد تخریب پانل بتنی کف سرریز سد بوکان تعیین می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### سد بوکان

سد چندمنظوره (Multi-Purpose) شهید کاظمی بوکان که با نام‌های یمین‌آباد و بوکان نیز شناخته می‌شود، بر روی

۲۰ درصد سیلاب طراحی به دلیل فشار بر کنش ناشی از پرش خوابیده روی شوت به تخریب شوت در محدوده اتصال به حوضچه انجامید. پدیده هیدرولیکی دیگر در شرایط بروز پرش خوابیده روی شوت آن است که در این شرایط ستون آب روی سطح بلوک‌های انتهایی شوت به دلیل نیروی جریان فوق بحرانی به سمت پایین دست عقب رانده می‌شود، درحالی‌که فشار برکنش زیر بلوک در صورت راه‌یابی جریان به زیر بلوک در محدوده مقادیر جریان ساکن باقیمانده است که این اختلاف نیز در جهت بلندکردن بلوک تسهیل‌کننده خواهد بود.

عامل شناخته‌شده دیگری در تخریب دال‌های بتنی شوت سرریز سدهای دنیا به نام جک هیدرولیکی می‌باشد که از نمونه‌های مطرح آن می‌توان به اتفاقات رخداد در سدهای دیکینسون (۱۹۵۴)، بیگ سندی (۱۹۸۳) و به‌تازگی در بلندترین سد خاکی آمریکا به نام اورویل (۲۰۱۸) اشاره کرد. جریان‌های سیلابی با سرعت بالا از روی سطح بلوک‌های شوت در نبود واتر استاپ در درزها به داخل درزها و از طریق آن به زیر دال بتنی نفوذ کرده و در این منطقه با تبدیل انرژی جنبشی آب به فشار، نیروی قابل‌توجهی را به سطح قابل‌دسترس زیرین دال وارد می‌کند. با بالا آمدن اندک دال، امکان نفوذ بیشتر و فرسایش گسترده‌تر پی زیر دال‌ها در دفعات بعدی جریانات سیلابی فراهم خواهد شد.

عبور سیلاب‌های اسفندماه ۹۷ و فروردین‌ماه ۹۸ از سرریز سد بوکان، با بلند شدگی و جابه‌جایی پانل واقع در آخرین ردیف‌های پایینی شوت سرریز که در مقابل جریان خروجی از دهانه‌های شماره ۵ و ۶ سرریز (نوار شماره ۶) قرار داشته همراه گردیده و در پی آن بلوک مذکور با ابعاد ۱۵×۱۵ متر و وزن بیش از ۲۷۰ تن از موقعیت خود کاملاً جدا و به حوضچه آرامش جابه‌جا شده است (شکل ۱).

۱۵×۱۵ متر، ۱۵×۱۰ متر، ۱۰×۱۰ متر و ۱۵×۵/۵ متر به تعداد کل ۸۰ بلوک (با احتساب بلوک‌های اوجی) اجرا شده است. در حوضچه آرامش نیز چهار تیپ اندازه‌های بلوک با ابعاد ۱۰×۵، ۱۰×۷/۵، ۱۰×۱۰ و ۱۵×۷/۵ متر به تعداد کل ۳۹ بلوک اجرا شده است.

در پژوهش حاضر به منظور بررسی عوامل تخریب پانل بتنی سرریز سد بوکان، شبیه‌سازی عددی یک و سه بعدی جریان بر روی سرریز صورت گرفت تا تأثیر هر یک از پدیده‌های محتمل هم‌چون کاویتاسیون، فشاربرکش، جک هیدرولیکی و ... مشخص و پارامتر اثرگذار در تخریب پانل بتنی کف سرریز این سد تعیین شود.

#### نرم‌افزار مورد استفاده در پژوهش

در پژوهش حاضر به منظور بررسی پارامترهای اثرگذار بر تخریب پانل بتنی شامل پدیده کاویتاسیون و هم‌چنین تخمین پارامترهای هیدرولیکی جریان از دو نرم‌افزار WS77 و FLOW3D بهره گرفته شد.

WS77 یک برنامه تک‌بعدی است که توسط اداره احیای ایالات متحده (USBR) در سال ۱۹۹۰ طراحی شد و برای شبیه‌سازی برخی پارامترهای هیدرولیکی در سرریزها و تونل‌ها استفاده می‌شود. در واقع این برنامه برای تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیک استفاده می‌شود. با محاسبه شاخص‌های کاویتاسیون و مقایسه آن با شاخص‌های کاویتاسیون بحرانی در این برنامه، می‌توان کاویتاسیون را پیش‌بینی کرد. WS77 که مخفف سطح آب است براساس تعیین نیم‌رخ سطح آب از طریق روش گام استاندارد است که برای جریان متغیر تدریجی در کانال‌های منشوری استفاده می‌شود. خروجی این برنامه شامل کلیه پارامترهای هیدرولیک و مشخصات کاویتاسیون می‌باشد.

مدل FLOW-3D یکی از مدل‌های قوی در زمینه

رودخانه زرینه‌رود و به منظور کنترل و تنظیم جریان این رودخانه از سال ۱۹۷۱ میلادی (۱۳۵۰ شمسی) مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

سد مخزنی بوکان بر روی رودخانه زرینه‌رود در استان آذربایجان غربی و در فاصله ۸۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان میاندوآب و در شرق شهرستان بوکان احداث شده است. عملیات ساختمانی احداث سد مذکور در مردادماه سال ۱۳۴۶ آغاز و در فروردین‌ماه ۱۳۵۰ خاتمه یافته است. این سد از نوع خاکی- سنگریزه‌ای با هسته نفوذناپذیر رسی بوده و اهداف بهره‌برداری آن در حال حاضر تأمین آب کشاورزی و شرب است. رودخانه زرینه‌رود از دامنه‌های شمالی کوه‌های چهل چشمه در نزدیکی مرز عراق سرچشمه گرفته و پس از جمع‌آوری جریان‌های سطحی تعدادی از شاخه‌های مهم مانند ساروق‌چای، خور خوره‌چای، سقزچای و آجرلو از جنوب به سمت شمال جریان یافته و در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزد. سطح حوزه آبریز تا محل سد مخزنی حدود ۶۸۹۰ کیلومترمربع و در محل بند انحرافی ۱۱۴۰۰ کیلومترمربع است (شکل ۲).



Figure 2. Bukan dam spillway location

سرریز سد در جناح راست و با فاصله کم‌تر از ۷۰ متری از بدنه اصلی سد و در میان دو بدنه دایک بتنی جانمایی شده است. بلوک‌های شوت با ابعاد مختلف

خلاصه‌ای از اقدامات انجام شده به منظور انجام شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی شامل تهیه هندسه مدل، شبکه‌بندی، اعمال شرایط مرزی در شکل (۳) ارائه شده است.

برای انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی مدل عددی، پس از ساخت هندسه مدل، شش بلوک مجزای مش‌بندی که شامل پنج بلوک اصلی و یک بلوک تودرتو می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفتند. تعداد کل مش‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی سه‌بعدی مدل عددی ۴۱۲۶۱۵۹ مش می‌باشد. تعداد مش‌های بلوک‌ها متناسب با ابعاد بلوک و اهمیت بلوک از بعد دقت نتایج هیدرولیکی به‌قرار جدول (۱) می‌باشد.

دینامیک سیالات است که توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc صورت گرفته است. این مدل قابلیت تحلیل سه‌بعدی میدان جریان و ارائه خروجی‌های یک‌بعدی، دو‌بعدی و سه‌بعدی را دارد و محدوده کاربرد بسیار وسیعی را در مسائل مربوط به سیالات دارد. معادلات پایه‌ای مورد استفاده در این مدل، معادلات ناویر استوکس هستند و از مدل‌های آشفتگی متنوع در حل خصوصیات جریان‌های آشفته استفاده می‌کند.

شبیه‌سازی عددی سرریز سد بوکان توسط مدل یک‌بعدی ws77 و سه‌بعدی FLOW-3D، برای سیلاب‌های با دوره بازگشت ۵۰ ساله (سیلاب کوچک) و سیلاب ده‌هزارساله (طراحی سرریز) صورت گرفت.

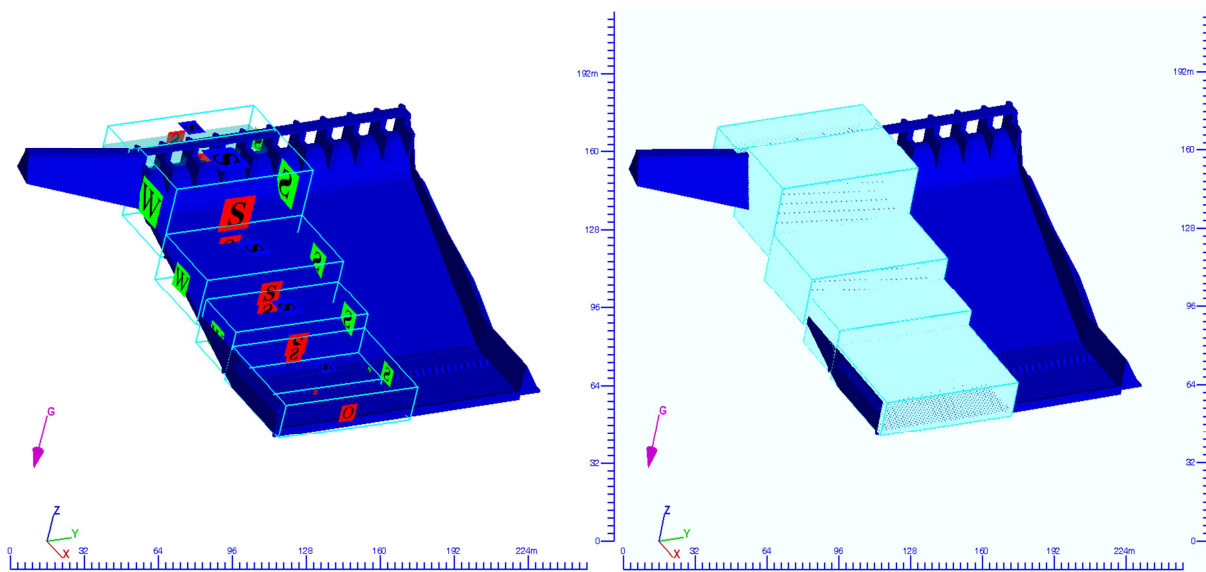


Figure 3. Geometry, boundary conditions and spillway meshing in the numerical model

Table 1. Specifications of blocks, number of mesh and boundary conditions of numerical model

Mesh Block	Number of Mesh	Boundary Condition
Block 1	152400	$X_{min,max}$ :Symmetry; $Y_{min}$ :Wall; $Y_{max}$ :Symmetry; $Z_{min}$ :Flow rate, $Z_{max}$ :Symmetry
Block 2	1181920	$X_{min,max}$ :Symmetry; $Y_{min}$ :Wall; $Y_{max}$ :Symmetry; $Z_{min}$ :Wall, $Z_{max}$ :Symmetry
Block 3	861520	$X_{min,max}$ :Symmetry; $Y_{min}$ :Wall; $Y_{max}$ :Symmetry; $Z_{min}$ :Wall, $Z_{max}$ :Symmetry
Block 4	1336300	$X_{min,max}$ :Symmetry; $Y_{min}$ :Wall; $Y_{max}$ :Symmetry; $Z_{min}$ :Wall, $Z_{max}$ :Symmetry
Block 5	394560	$X_{min,max}$ :Symmetry; $Y_{min}$ :Wall; $Y_{max}$ :Symmetry; $Z_{min}$ :Wall, $Z_{max}$ :Symmetry
Block 6	199459	$X_{min}$ :Symmetry, $X_{max}$ :Outlet; $Y_{min}$ :Wall; $Y_{max}$ :Symmetry; $Z_{min}$ :Wall, $Z_{max}$ :Symmetry

### سیلاب‌های طراحی

هیدروگراف سیلاب‌های ورودی به مخزن سد بوکان در وضع موجود به صورت گراف شکل (۴) می‌باشد. هیدروگراف براساس مدل‌سازی هیدرولوژیکی (روش SCS) و بازای دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه شده است. به عبارت دیگر، مقادیر ضریب CN حوضه (نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک) و همچنین زمان تمرکز و زمان تأخیر حوضه آبریز براساس مشخصات فیزیوگرافی حوضه تعیین و سپس مقدار بارش حوضه با استفاده از منحنی‌های شدت مدت فراوانی بازای دوره‌های بازگشت مختلف تعیین و در محیط HEC-HMS اجرا شده است. در نهایت هیدروگراف‌های سیل در محل سد بوکان مطابق شکل (۴) محاسبه و رسم شد.

### نتایج و بحث

همان‌گونه که در بخش قبل نیز اشاره شد به منظور شبیه‌سازی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان‌های سیلابی بر روی سرریز سد بوکان از دو نرم‌افزار WS77 و FLOW3D بهره گرفته شد. شبیه‌سازی‌های مذکور برای دو دبی سیلابی با دوره بازگشت‌های ۵۰ و ۱۰۰۰۰ ساله صورت گرفته است. انتخاب این دو دبی بر مبنای لحاظ

یک آستانه دبی حداقلی و دوره بازگشت سیلاب طراحی در شبیه‌سازی صورت گرفته است. در ابتدا خروجی‌های سه‌بعدی الگوها و مشخصه‌های جریان سیلابی بر روی سرریز ارائه شده و در ادامه به ارائه تفصیلی نتایج مشخصه‌های هیدرولیکی جریان پرداخته شده است.

### الگو و مشخصه‌های سه‌بعدی جریان بر روی سرریز سد بوکان به ازای دبی با دوره بازگشت ۵۰ و ۱۰۰۰۰ ساله

در شکل (۵) الگوهای جریان سه‌بعدی بر روی سرریز سد بوکان و همچنین مشخصه‌های جریان سیلابی نشان داده شده است. همان‌گونه که از نتایج مشخص است شکل‌گیری امواج عرضی یکی از مشخصه‌های بارز به وقوع پیوسته در جریان بر روی این سرریز می‌باشد که دلیل آن نیز ناشی از پایه‌های موجود بر روی سرریز سد می‌باشد.

### مشخصه‌های هیدرولیکی جریان بر روی سرریز سد بوکان

مشخصات هیدرولیکی جریان سیلابی بر روی سرریز به ازای دبی‌های منتخب ۵۰ و ۱۰۰۰۰ ساله شامل، عمق، سرعت، فشار و ضخامت لایه‌مرزی به صورت گراف‌های شکل (۶) می‌باشد.

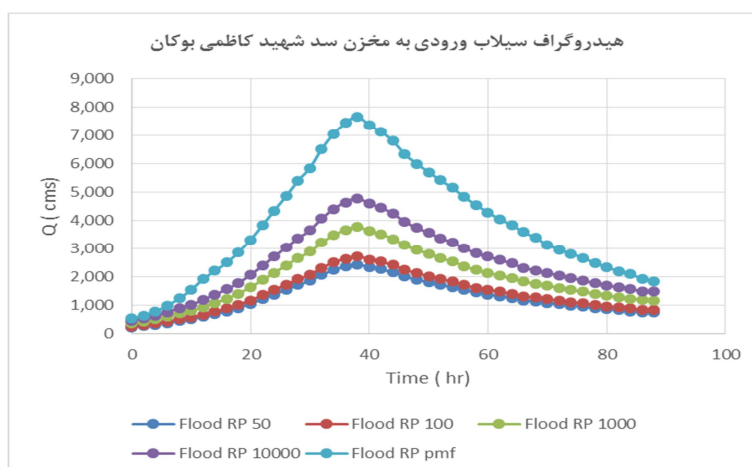


Figure 4. Hydrograph of incoming floods to the Bukan Dam reservoir

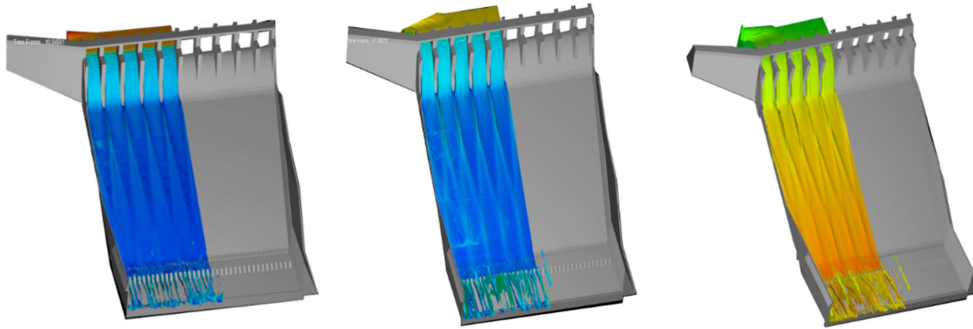


Figure 5. Three-dimensional flow pattern on the spillway of Bukan Dam for discharge with a return period of 50 and 10,000 years

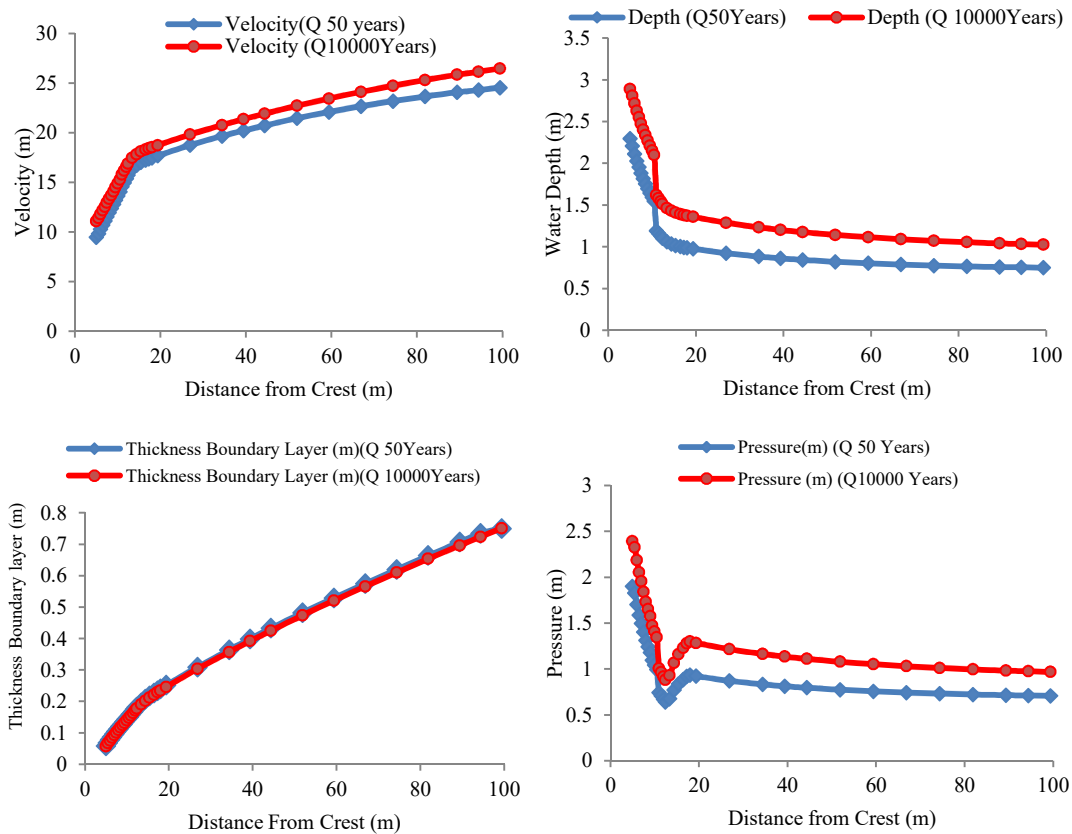


Figure 6. Hydraulic characteristics of flow on the spillway for selected discharges with a return period of 50 and 10,000 years

پدیده کم می‌باشد. براساس گزارش‌های گوناگون در سطح جهان، خسارت قابل ملاحظه در سرریزها غالباً در مواقعی رخ داده است که اندیس کاویتاسیون جریان کوچکتر از  $0/2$  بوده البته هنگامی که اندیس کاویتاسیون بزرگتر از  $0/2$  بوده نیز خسارت‌هایی مشاهده شده که

### کاویتاسیون

معمولاً جهت بررسی امکان وقوع پدیده کاویتاسیون در سرریزها از اندیس کاویتاسیون استفاده می‌شود. زمانی که اندیس کاویتاسیون در هر نقطه از جریان از مقدار بحرانی شروع کاویتاسیون ( $\sigma_i$ ) بیشتر باشد، امکان وقوع این



Flow3D پایین‌تر از مقادیر نرم‌افزار WS77 بودند که دلیل این موضوع را می‌توان در لحاظ هر سه بعد جریان در محاسبات توسط مدل Flow3D دانست.

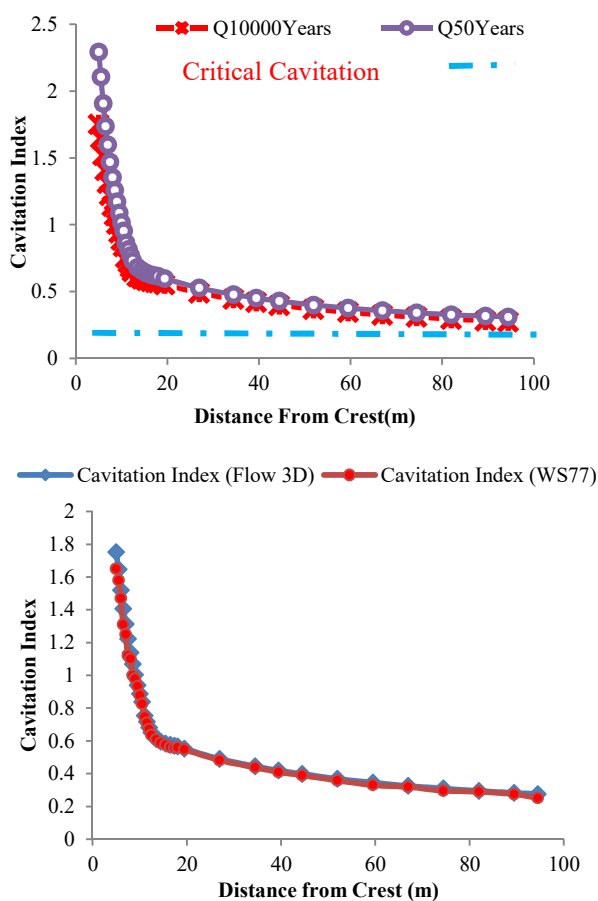


Figure 7. Comparison of cavitation index along spillway with critical index

همان‌گونه که از بررسی نتایج مدل‌های مورد استفاده در مورد بررسی شاخص کاویتاسیون در محدوده تخریب شده بلوک سرریز که از بحرانی‌ترین نقاط از نظر رخداد پدیده کاویتاسیون می‌باشد، حکایت از آن دارد که سرریز مذکور به‌ازای دبی‌های ۵۰ و ۱۰۰۰۰ ساله در محدوده بالاتر از شاخص بحرانی ۰/۲ قرار دارد که این موضوع احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

غالباً میزان خرابی ناشی از آن زیاد نبوده است. واضح است که میزان مقاومت بتن و رواداری‌های مجاز در ناهمواری‌های سطح شوت، حد بحرانی ذکر شده فوق را تحت تأثیر قرار می‌دهند. جدول (۲) راهنمای مناسبی در این زمینه می‌باشد.

Table 2. Cavitation Index limits and (Zandi et al., 2014)

توصیه‌ها	اندیس کاویتاسیون ( $\sigma$ )
خسارت‌های جزئی است و غالباً نیازی به تعمیرات ندارد.	$\sigma > 0.2$
با تمهیدات مناسب مانند هوادهی می‌توان مانع وقوع پدیدهی کاویتاسیون شد.	$0.12 < \sigma < 0.2$
بهرتر است با بازنگری طرح و تغییر پارامترهای هیدرولیکی جریان از طریق کاهش سرعت و یا افزایش فشار به اعداد کاویتاسیون بزرگ‌تری دست‌یافت.	$\sigma < 0.2$

بنا به مطالب بیان‌شده، شاخص کاویتاسیون برای جریان سیلابی با دوره بازگشت‌های ۵۰ و ۱۰۰۰۰ ساله سرریز سد بوکان محاسبه و به‌صورت گراف شکل (۷) می‌باشد. هم‌چنان که در نتایج آمده است، حداقل شاخص کاویتاسیون در سیلاب‌های منتخب ۵۰ و ۱۰ هزارساله به‌ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۷۵ است که از مقدار بحرانی ۰/۲ بیش‌تر است. علاوه بر آن شاخص پتانسیل خرابی در حداکثر مقادیر محاسبه‌شده در دو سیلاب مذکور به‌ترتیب برابر با ۱۱۱ و ۱۹۸ (در آفست ۲/۵ سانتی‌متری) است که از مقدار آستانه تخریب برابر با ۵۰۰ فاصله دارد. بر این اساس وقوع پدیده کاویتاسیون غیرمحمتمل و لحاظ اقدام‌های مقابله با کاویتاسیون هم‌چون سازه هواده‌ها در سرریز سد بوکان توصیه نمی‌شود.

مقادیر شاخص کاویتاسیون برای مدل سه‌بعدی Flow3D نیز در انطباق با مدل WS77 بوده و از اختلاف ۴ درصدی برخوردار می‌باشند. مقادیر حاصل از مدل

برکنش زیر بلوک در صورت راه‌یابی جریان به زیر بلوک در محدوده مقادیر جریان ساکن باقیمانده است.

عامل شناخته‌شده دیگری در تخریب دال‌های بتنی شوت سرریز سدهای دنیا به نام جک هیدرولیکی است. جریان‌های سیلابی با سرعت بالا از روی سطح بلوک‌های شوت در نبود واتر استاپ در درزها به داخل درزها و از طریق آن به زیر دال بتنی نفوذ کرده و در این منطقه با تبدیل انرژی جنبشی آب به فشار، نیروی قابل‌توجهی را به سطح قابل‌دسترس زیرین دال وارد می‌کند. بالا آمدن اندک دال، امکان نفوذ بیشتر و فرسایش گسترده‌تر پی زیر دال‌ها در دفعات بعدی جریانات سیلابی فراهم خواهد شد (شکل ۸) (Hepler et al., 1988).

در سرریز سد بوکان براساس مشاهدات میدانی وضعیت درزها و جابه‌جایی‌های مختلف و قابل‌توجه بلوک‌ها شرایط را برای نفوذ جریان با سرعت بالا به زیر دال‌های بتنی شوت تسهیل کرده است. براساس بازدیدهای میدانی در بخش انتهایی نوارهای ۵ و ۶ جابه‌جایی بلوک‌های قابل‌توجه بوده که خود نشان از وجود فضای خالی در زیر دال‌های این ناحیه دارد (شکل ۹).

در این شرایط جریان با سرعت بالا از درز بالایی و کناری بلوک E5 وارد ناحیه زیرین دال شده و در سطح وسیعی از زیر این بلوک فشار جک‌هیدرولیکی (Stagnation pressure) را ایجاد نموده است. این فشار در کنار فشار برکنش ناشی از بروز پرش خوابیده روی شوت (که در نیمه پایینی بلوک وارد شده است) به مقادیر بیش از مؤلفه وزن و نیروی مقاوم انکرها رسیده و بلوک مذکور را جابه‌جا نموده است.

تغییرات سرعت جریان در طول مسیر سرریز از ابتدا تا انتها به فرم شکل (۱۰) می‌باشد. همان‌گونه که از نتایج شکل (۱۰) مشخص است سرعت جریان در محدوده بلوک تخریب‌شده (E) برای دبی با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله، بیش از ۲۵ متر بر ثانیه است.

از طرفی با توجه به این‌که در زمان رخداد تخریب بلوک بتنی سرریز، جریان سیلابی عبوری از روی سرریز دارای مقادیر کم‌تر از حتی دبی با دوره بازگشت ۲۵ ساله بوده است (دبی سیلابی عبوری از روی سرریز در زمان رخداد تخریب بلوک بتنی سرریز ۷۰۰ مترمکعب بر ثانیه بوده است)، عملاً احتمال تخریب این بلوک بتنی توسط پدیده کاویتاسیون غیرمحتمل می‌باشد.

### تحلیل سایر عوامل مؤثر بر تخریب دال بتنی

براساس نتایج محاسبات ارائه‌شده و صرف‌نظر از مشاهدات میدانی، تخریب ناشی از پدیده کاویتاسیون در اثر عبور سیلاب زمان حادثه منتفی است. هم‌چنان که در گزارش ارزیابی داده‌های بهره‌برداری آمده است سیلاب‌های بزرگ‌تر از سیلاب روز حادثه در طول دوره بهره‌برداری سرریز سد بوکان تجربه شده است، لذا شرایط هیدرولیکی با شدت بیش‌تر در زمان‌های قبل از وقوع حادثه تجربه شده است. بنابراین نمی‌توان عوامل هیدرولیکی را به‌عنوان دلایل مستقل (از باقی دلایل) کلیدی تخریب معرفی کرد. نوسانات فشار و فشار برکنش به‌عنوان علت تخریب در برخی از رخداد‌های مشابه شناخته شده است. دلیل عمده فشار برکنش تبدیل متناوب انرژی جنبشی (Kinetic Energy) جریان راه‌یافته به زیر بلوک بتنی از طریق زه‌کش‌ها و درزها و ترک‌ها به انرژی فشاری (Pressure) وارد بر سطح زیرین بلوک است. این شرایط در هم‌زمانی بروز فشار منفی در سطح‌رویی بلوک با فشار برکنش در سطح زیرین بلوک تشدید می‌شود و در صورتی‌که برآیند نیروها از وزن آب و بتن مستغرق بیش‌تر باشد موجب بلندشدگی بلوک را فراهم خواهد کرد.

پدیده هیدرولیکی دیگر در شرایط بروز پرش خوابیده روی شوت آن است که در این شرایط ستون آب روی سطح بلوک‌های انتهایی شوت به‌دلیل نیروی جریان فوق بحرانی به سمت پایین‌دست عقب رانده می‌شود، درحالی‌که فشار

بررسی اثرات تخریبی جریان سیلابی بر روی دال بتنی کف سرریز (مطالعه موردی: سرریز سد بوکان)

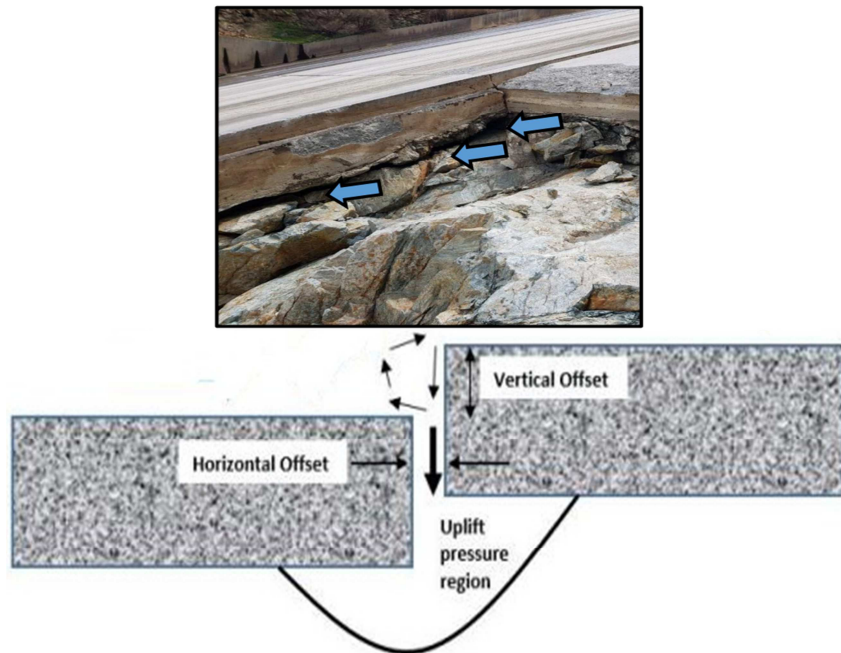


Figure 8. Status of joints and vertical offset of concrete panel of spillway

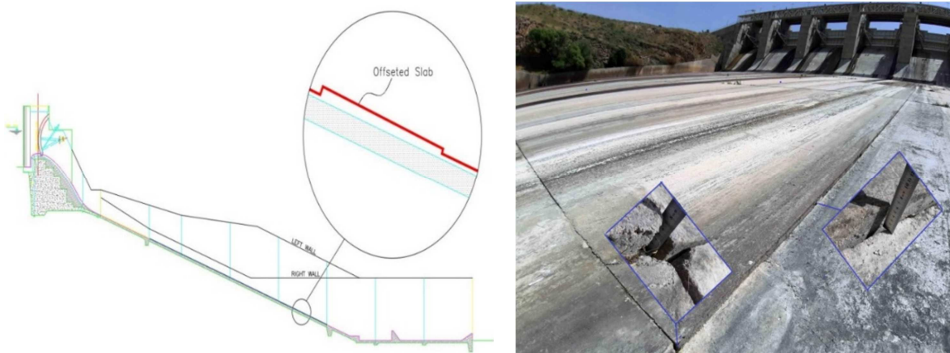


Figure 9. Location of joints and vertical offset of concrete panel of Bukan spillway

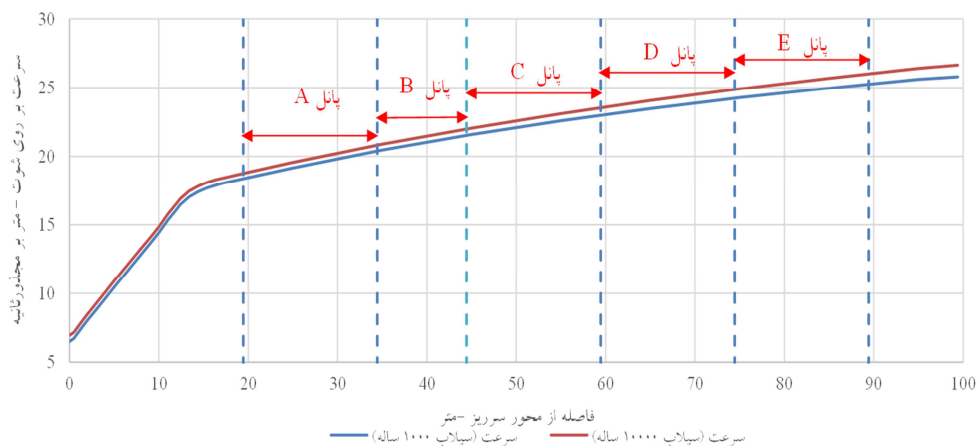


Figure 10. Flow velocity along the chute

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱

پاسکال) به ترتیب به‌ازای شرایط بلندشدگی ۱۹ میلی‌متری و Stagnation در محدوده پانل تخریب‌شده کف سرریز سد بوکان دارد. نیروی منتج حاصل از هرکدام از فشارهای برگش یادشده، قابلیت غلبه بر نیروی وزن پانل بتنی ( $W=15 \times 15 \times 0.5 \times 2600 \times 9.806 = 2866500N$ ) و نیروی مقاوم انکراژ آن را دارد.

به‌منظور تعیین درصد سطح تأثیر هر پانل بتنی کف سرریز برای قرارگیری در آستانه غوطه‌وری و واژگونی متناسب با سرعت جریان بر روی سرریز و نیروی فشار برگش، گراف شکل (۱۲) تهیه شد. براساس شکل (۱۳) اگر جریانی با سرعت حدود ۲۵ متر بر ثانیه بر روی سرریز جاری شود، در صورتی‌که فقط ۱۶ درصد از سطح پانل‌های A-C-D-E را تحت تأثیر قرار دهد، آسیب غوطه‌وری کامل پانل‌های تحت تأثیر فراهم خواهد شد.

USBR (1987) در مطالعات خود بر روی فشار برگش با توجه به‌سرعت جریان در محدوده پانل تخریب‌شده، ارتفاع بالازدگی پانل‌ها نسبت به هم (Offset) و درز بین پانل‌های بتنی (Gap)، فشار جک هیدرولیکی (Stagnation pressure) را ارائه داده است.

در نهایت براساس اندازه‌گیری‌های میدانی در سرریز سد بوکان، مقدار متوسط ارتفاع بالازدگی پانل‌ها نسبت به هم (Offset) و درز بین پانل‌های بتنی (Gap)، به‌ترتیب برابر با ۱۹ و ۱۳ میلی‌متر به‌دست آمد. براساس داده‌های به‌دست‌آمده و نمودار مرتبط از USBR، فشار جک هیدرولیکی (Stagnation pressure) از شکل (۱۱) استخراج شد.

بررسی شکل (۱۱) حاکی از ایجاد فشار برگش ۳۱/۵ متر آب (۳۰۸/۷ کیلو پاسکال) و ۲۳ متر آب (۲۲۵/۴ کیلو

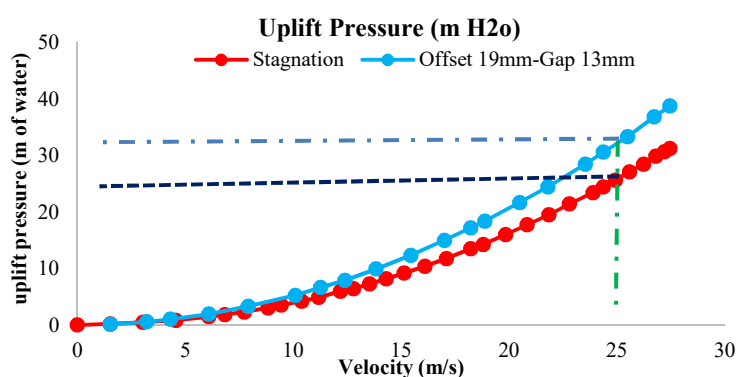


Figure 11. Uplift pressure in the area of destroyed concrete slab (E) of Bukan Dam spillway

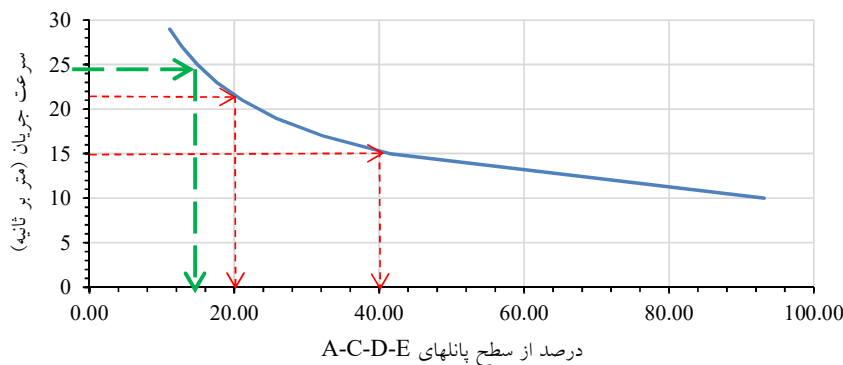


Figure 12. Percentage of the affected surface of each panel to be on the immersion and overturning threshold in proportion to the flow velocity on the spillway

## نتیجه گیری

با توجه به بررسی عددی عوامل مؤثر بر تخریب پانل بتنی سرریز سد بوکان، نتایج پژوهش در موارد زیر خلاصه می‌شوند.

۱- حداقل شاخص کاویتاسیون در سیلاب‌های منتخب ۵۰ و ۱۰ هزارساله به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۷۵ است که از مقدار بحرانی ۰/۲ بیش‌تر است و امکان وقوع پدیده کاویتاسیون را غیرمحمتمل می‌سازد.

۲- شاخص پتانسیل خرابی در حداکثر مقادیر محاسبه‌شده در دو سیلاب مذکور به ترتیب برابر با ۱۱۱ و ۱۹۸ (در آفست ۲/۵ سانتی‌متری) است که از مقدار آستانه تخریب ناشی از کاویتاسیون برابر با ۵۰۰، فاصله دارد و از این‌رو تخریب ناشی از کاویتاسیون را غیرمحمتمل می‌سازد.

۳- ایجاد فشار برکنش ۳۱/۵ متر آب (۳۰۸/۷ کیلو پاسکال) و ۲۳ متر آب (۲۲۵/۴ کیلو پاسکال) به ترتیب به‌ازای شرایط بلندشدگی ۱۹ میلی‌متری پانل بتنی و Stagnation در محدوده دال تخریب‌شده کف سرریز سد بوکان قابلیت غلبه بر نیروی مقاوم وزن دال بتنی و نیروی مقاوم انکراژ آن را دارد و توانایی واژگونی و تخریب پانل بتنی کف سرریز سد بوکان را دارد.

۴- درصد سطح تأثیر هر پانل بتنی کف سرریز برای قرارگیری در آستانه غوطه‌وری و واژگونی متناسب با سرعت جریان بر روی سرریز و نیروی فشار برکنش، حاکی از آن است که به‌ازای جریانی با سرعت حدود ۲۵ متر بر ثانیه بر روی سرریز، در صورتی که فقط ۱۶ درصد از سطح پانل‌ها را تحت تأثیر قرار دهد، قادر به غوطه‌وری کامل پانل‌ها خواهد بود.

در جهت تکمیل مطالعه حاضر، توسعه مدل‌های شبیه‌سازی عددی اندرکنش آب-سازه (Fluid-structure interaction) به‌منظور شناسایی رفتار جریان سیلابی بر

روی پانل‌های جابه‌جاشده کف سرریز و تعیین اندرکنش بین سازه سیال پیشنهاد می‌شود.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

## منابع

1. Manafpour, M., Ebrahimnezhadian, H., & Babazadeh, V. (2019). Numerical study of spillway sidewall convergence effects on the hydraulic characteristics of flow and probability of occurrence of cavitation phenomenon. *J. of Water and Soil Conservation*. 25(5). 109-126.
2. Doraghi, A. (2009). Hydraulic behavior of water on the ogee spillway of three craters and determination of flow-scale relationship and optimization of transition walls (Case study of Balaroud Dam). Master Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
3. Arefpour, M. (2009). Investigation of flow hydrodynamics and downstream jet trajectory curve in cup-shaped projectile (Case study of Balaroud Dam). Master Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
4. Parsi, E., Behdarvandi Asghar, M., Fathi Moghadam, M., & Kazemiyanzadeh, A. (2009). Investigation of cavitation phenomenon along spillway using structure model. *8th Iran Hydraulic Conference*.
5. Mehri, M. (2006). Modeling the hydraulic behavior of the flow on the spillway of Balaroud dam with small scale. Master Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
6. Nasr Esfahani M.J., & Shafai Bajestan M. (2014). Investigation of Cavitation at the Roughened Bed of Abrupt Drop Stilling Basin. *Journal of Hydraulics*. 8(2), 29-40.
7. Hashemi, A.F., Khosrowjerdi, A., & Sedghi, H. (2012). Study of Pressure Fluctuations and Probability of Cavitation Occurrence in the Slot of Bottom Outlet Gate of Gotvand Dam. *Water and Soil Science Journal*. 22(3). 183-195.
8. Ball, J.W. (1976). Cavitation from surface Irregularities in high velocity flow. *American Society of Civil Engineers*. 102 (9). 1283-1297.
9. Barani, G.H., & Abbasi, U. (2005). Optimization of flat plate Flip Bucket radius using dimensional analysis. *5th Iranian Hydraulic Conference*. November 17-19, Faculty of Engineering. Shahid Bahonar University of Kerman. Kerman. pp. 145-153.

10. Boes, R., & Hager, W.H. (2003). Two-phase characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (9), 661-670.
11. Chanson, H. (1994). Hydraulics of Nappe Flow Regime Above Stepped Chutes and Spillways. *Aust. Civil Engineering Trans.* I.E. Aust., 36(1), 69-76.
12. Darren Hinton, P.E., Brian Hughes, M.A., & Ed Zapel, M.S. (2015). Scott Dam Spillway-Comparing Physical Model Study Results. *Paper Presented Hydro Vision Conference*. July. 15-17.
13. Falvey. (1990). Cavitation in chute and spillway [Engineering Monograph No. 42. *United States Department of the Interior-Bureau of Reclamation*. Denever. Colorado.
14. Falvey. (1982). Predicting cavitation in tunnel spillway. *Water Power and Dam Construction*, 34(8), 13-155.
15. Gonzalez, A.C., & Chanson, H. (2004). Scale effects in moderate slope stepped spillways experimental studies in air-water flows. *In the 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering. Gold Coast. Australia*.
16. Johnson, V.E. (1963). Mechanics of cavitation. *Tran American Society of Civil Engineers. Journal of Hydraulic Engineering*, 89(3), 251-275.
17. Kamanbedast, A., Bahmani, M., & Aghamajidi, R. (2014). The Effect of Surface Roughness on Discharge Coefficient and Cavitations of Ogee Spillways Using Physical Models. *Journal of Applied Science and Agriculture*, 9(6), 2442-2448.
18. Rajasekhar, Santhosh., & Sekhar, S.J. (2014). Physical and Numerical Model Studies on Cavitation Phenomenon-A Study on Nagarjuna Sagar Spillway. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 2(1), 1-10.
19. Savage, B.M., & Johnson, C. (2001). Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127, 640-649.
20. Zandi Goharrizi, F., Azhdary Moghadam, M., & Parchami, A. (2014). Fuzzy Predicting Model for Cavitation in Chute Spillways. *Global Journal of Scientific Researches*, 2(1), 12-20.
21. Wyoming, Reclamation (March 1987). Bureau of Reclamation. 1987. Design Summary. Big Sandy Dam Safety Spillway Modification. Eden Project. Technical Service Center. Denver. Colorado.
22. Hepler, T.E., & Johnson, P.L. (1988). Analysis of Spillway Failures Caused by Uplift Pressure. *Proceedings of National Conference on Hydraulic Engineering and International Symposium on Model-Prototype Correlations. American Society of Civil Engineers*. August 8-12. 1988.