

# بررسی و ارزیابی پارامترهای شکست سدهای خاکی -

## مطالعه موردی سد آیدوغموش

ابوالفضل شمسایی<sup>i</sup>؛ شهرام موسوی<sup>ii</sup>

### چکیده

ایمنی مربوط به مسائل سد در تحقیقات دانشگاهی، برنامه‌ریزی دولت و سرمایه‌گذاری در پایاب سدها اهمیت دارد. در این مقاله با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۴۲ سد خاکی شکسته شده در جهان، پارامترهای شکست سدهای خاکی (عرض شکست، شیب شکست، زمان شکست و حداکثر دبی خروجی) بررسی و ارزیابی شده‌است. با استفاده از روابط تجربی و مدل‌های کامپیوتری BREACH و FLDWAV شکست سد خاکی آیدوغموش و پهنه‌بندی سیلاب ناشی از آن در دو حالت روگذری و پدیده ایجاد لوله در بدنه سد بطور مجزا مورد بررسی و ارزیابی واقع گردیده‌است. با توجه به اینکه در روابط تجربی پیشنهادی از داده‌های بیشتری استفاده شده‌است، بنابراین نسبت به روابط قبلی دقیق‌تر هستند. بر اساس تحقیق انجام شده تغییر شرایط ژئوتکنیکی در تعیین زمان ریزش لوله ایجاد شده در بدنه سد، در مدل فرسایشی BREACH، نتایج بهتری را با توجه به سدهای واقعی شکسته شده در جهان بدست می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده، مناطق مسکونی و تاسیسات مهم در پایاب سد فوق‌الذکر در معرض خطر سیلاب شکست سد قرار می‌گیرند.

**کلمات کلیدی:** شکست سد، پهنه بندی سیلاب، روابط تجربی، مدل‌های کامپیوتری.

// :

// :

<sup>i</sup> مدیر گروه عمران آب دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد، واحد علوم و تحقیقات تهران، shamsai@srbiau.ac.ir

<sup>ii</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران، گروه پژوهشی منابع آب نوین، sh\_mousavi@alum.sharif.edu

### ۱- مقدمه

سرریز، تراوش، پدیده ایجاد لوله در بدنه سد (Piping)، لغزش شیب خاکریز، اثر زلزله و روان‌گرایی سدهای خاکی، ایجاد موج ضربه‌ای (Impulse wave) در اثر ورود توده لغزشی به داخل مخزن و یا در اثر خرابکاری صورت گیرد [۲]. بیش از ۸۰ درصد سدهای خاکی شکسته شده در جهان در اثر روگذری و وقوع پدیده ایجاد لوله در بدنه سد شکسته شده‌اند [۳].

در این تحقیق داده‌های مربوط به ۱۴۲ سد خاکی شکسته شده در جهان از چندین منبع معتبر تهیه شده و روابط

سیلاب ناشی از شکست سدهای بزرگ خرابی و مصیبت زیادی را در دو قرن اخیر سبب شده‌است. شکست سد و جریان خروجی ناشی از آن به عنوان یکی از مهمترین مطالعات پژوهشی در بسیاری از کشورها و موسسات تحقیقاتی بوده است و در حال حاضر نیز ادامه دارد [۱]. شکست سد می‌تواند به علت پدیده‌های سرریز شدن آب از روی سد (Overtopping) بدلیل ناتوانی ظرفیت تخلیه

$$2h_d \leq \bar{B} \leq 3h_d \quad (1)$$

$$B_{top}/B_{bottom} = 1.13 - 1.64 \quad (2)$$

$\bar{B}$  = متوسط عرض شکاف،  $h_d$  = ارتفاع سد،  $m$ ،  $B_{top}$  = عرض شکاف در پایین‌ترین قسمت شکست،  $m$ ، پس از تجزیه و تحلیل پارامترهای مربوط به سدهای خاکی شکسته شده و مقایسه همبستگی‌های موجود، از طریق رگرسیون چندگانه، می‌توان نتیجه بهتری بصورت زیر ارائه داد:

$$\ln(\bar{B}) = .8259 + .0635 \ln(V_w) + .8481 \ln(h_b) \quad (3)$$

$h_w$  = عمق آب در بالای کف شکاف،  $m$ ،  $V_w$  = حجم آب در بالای کف نقطه شکست،  $m^3$ ،  $h_b$  = عمق شکاف،  $m$  مقدار  $\bar{B}$  وارد شده در فرمول ۳ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\bar{B} = 2.2839 V_w^{.0635} h_b^{.8481} \quad (4)$$

ضریب تشخیص ( $R^2$ ) رابطه فوق ۰/۹۱۸ است. نتایج تحلیل عدم قطعیت رابطه پیشنهادی در جدول ۱ مشاهده می‌گردد. ضریب تخمین عرض شکست در جدول ۱ با احتمال ۹۵ درصد ارائه شده است.

جدیدی بر مبنای مطالعات محققین قبلی در این زمینه تهیه گردیده است. عدم قطعیت روابط تجربی می‌تواند با استفاده از روشهای آماری مناسب از جمله حذف مقادیر پرت با استفاده از الگوریتم Rousseeuw، انجام شود. در این تحقیق مطالعات مربوط به ماکزیم سیلابهای احتمالی ناشی از شکست سد در پایاب سد آیدوغموش با استفاده از روشهای مختلف انجام و نتایج مورد بررسی واقع شده‌اند.

## ۲- آنالیز غیرقطعی روشهای تجربی

با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۴۲ سد خاکی شکسته شده در جهان که از مراجع معتبر و با کمک محققین در کشورهای مختلف بدست آمده‌اند، روشهای مختلف تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای تشخیص دقیق‌ترین رابطه تخمین معمولاً از روش کمترین میانگین مربعات خطاها استفاده می‌گردد. بعلاوه عدم دقت بودن مشاهدات برای ارائه رابطه مناسب و موجود بودن داده‌های پرت در این مقادیر و نیز نامعین بودن روابط تخمین، لازم است که آنالیز عدم قطعیت برای روابط تخمین انجام شود. چنانچه رابطه تخمینی دارای ضریب تشخیص (Coefficient of determination) خوب، میانگین مربعات خطا و محدوده نامعینی کم و نیز تعداد پارامترهای پرت کمتری باشد، قوی‌تر است و از آن می‌توان برای برآورد مناسب استفاده کرد [۴].

### ۲-۱- تخمین عرض شکست

با بررسی ۱۴۲ سد خاکی شکسته شده در جهان می‌توان نتایج کلی زیر را از داده‌های مذکور استخراج نمود:

جدول ۱: مقایسه نامعینی و دقت روابط پیشنهادی تخمین عرض شکست

معادله تعیین عرض شکست	میانگین مربعات خطاها	تعداد داده‌های تحلیل شده	تعداد داده‌های پُرت	متوسط خطا	محدوده نامعینی	ضریب تخمین عرض شکست
رابطه پیشنهادی (فرمول ۴)	۲۴۱/۶۲	۳۰	۳	۰/۰۱	±۰/۲۷۲	۰/۵۵-۱/۹۲

شکست سد ارائه شده‌اند. در ادامه کار Webby (۱۹۹۶)، [۵] می‌توان با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده رابطه مناسبی برای تخمین حداکثر جریان خروجی ارائه کرد.

### ۲-۲- تخمین حداکثر دبی خروجی

روابط زیادی برای تخمین حداکثر دبی خروجی ناشی از

مراحل این کار به شرح زیر می باشد:

$$Q_p = f(g, V_w, h_w) \quad (5)$$

با توجه به رابطه فوق دو بعد اصلی طول و زمان و جمعا چهار پارامتر برای تخمین وجود دارد. پس می توان گفت که دو پارامتر بدون بعد به شرح زیر وجود دارند:

$$\Pi_1 = Q_p g^{-1/2} V_w^{-5/6} \quad (6)$$

$$\Pi_2 = h_w V_w^{-1/3} \quad (7)$$

بین پارامترهای بی بعد می توان رابطه زیر را ارائه نمود:

$$\frac{Q_p}{\sqrt{g V_w^{5/3}}} = F\left(\frac{h_w}{V_w^{1/3}}\right) \quad (8)$$

با استفاده از رگرسیون غیرخطی بهترین رابطه ای که می توان بدست آورد بصورت زیر می باشد:

$$\frac{Q_p}{\sqrt{g V_w^{5/3}}} = 0.0657 \left(\frac{h_w}{V_w^{1/3}}\right)^{1.7053} \quad (9)$$

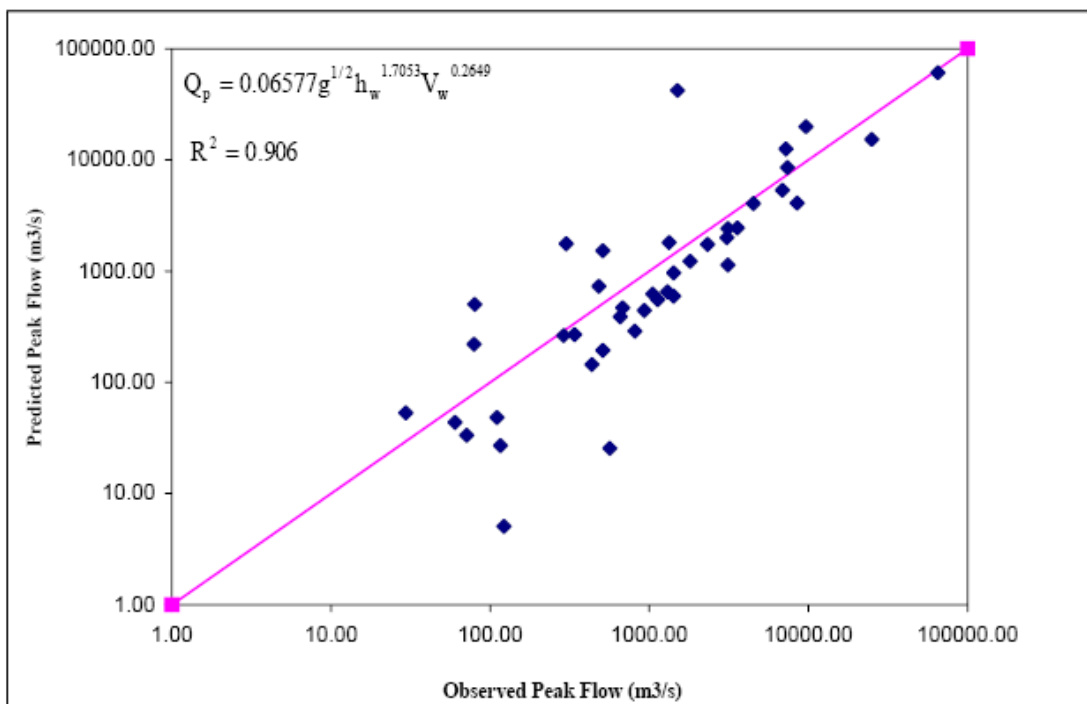
پس از ساده کردن فرمول فوق رابطه زیر بدست می آید:

$$Q_p = 0.06577 g^{1/2} h_w^{1.7053} V_w^{0.2649} \quad (10)$$

مقایسه بین مقادیر محاسباتی و اندازه گیری شده حداکثر دبی خروجی برای این حالت در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج تحلیل عدم قطعیت در جدول ۲ ارائه گردیده است.

باید توجه داشت که این محدوده ها با احتمال ۹۵ درصد به ازاء تخمین واحد حداکثر دبی خروجی می باشد و بسته به شرایط مورد مطالعه، حد بالا یا حد پایین آن در نظر گرفته می شود.

با استفاده از داده های جدول ۲ و بررسی روابط قبلی، دقت و اطمینان رابطه پیشنهادی با توجه به این نکته که از داده های بیشتری برای تحلیل استفاده شده است، بهتر می باشد.



شکل ۱: مقایسه بین مقادیر محاسباتی و اندازه گیری شده حداکثر دبی خروجی

جدول ۲: مقایسه نامعینی و دقت رابطه پیشنهادی برای تخمین حداکثر دبی خروجی

ضریب تخمین حداکثر دبی	محدوده نامعینی	متوسط خطا	تعداد داده های پرت	تعداد داده های تحلیل شده	میانگین ن مربعات خطاها	روش تعیین حداکثر دبی خروجی
۰/۳۳-۴/۹۵	۰/۵۸۶ ±	۰/۱۱ -	۴	۴۳	*۱۰ <sup>۷</sup> ۱/۰۸	رابطه پیشنهادی (فرمول ۱۰)

## ۲-۳- تخمین زمان شکست

بر اساس تحلیلهای انجام شده، نامعینی روابط تخمین زمان شکست زیاد بوده و عملاً استفاده از این روابط منطقی نمی‌باشد. نتایج آنالیز غیرقطعی داده‌های مربوط به زمان شکست به شرح زیر می‌باشد:

- متوسط زمان شکست ۳/۰۸ ساعت است.
- محدوده زمان شکست با احتمال ۹۵ درصد بین ۰/۹۷ الی ۵/۱۹ ساعت می‌باشد.
- حداقل زمان شکست ۰/۱ ساعت و حداکثر زمان شکست ۴۸ ساعت اندازه‌گیری شده است [۱ و ۳].

برای تامین مدیریت ایمنی در پایین دست سدها پیشنهاد می‌گردد در بررسی زمان شکست از ارقام دست پایین یا مدل کامپیوتری BREACH استفاده به عمل آید.

## ۲-۴- تخمین شیب شکست

بهترین حالت تعیین شیب شکست استفاده از محدوده آن با استفاده از سدهای شکسته شده قبلی می‌باشد. نتایج آنالیز غیر قطعی مربوط به شیب شکست به شرح زیر است:

- متوسط شیب شکست (افق به قائم) ۰/۹۸ است.
- محدوده شیب شکست با احتمال ۹۵ درصد بین ۰/۷۹ الی ۱/۱۷ می‌باشد.

## ۳- مدلهای کامپیوتری شکست سد

برای تخمین پارامترهای شکست سدهای خاکی و تعیین هیدروگراف دبی خروجی ناشی از شکست سد از مدل BREACH که مبتنی بر اصول هیدرولیک، هیدرولوژی و ژئوتکنیک می‌باشد استفاده می‌گردد [۶]. برای حالت پدیده ایجاد لوله در بدنه سد، استفاده از شرایط بحرانی ریزش لوله ایجاد شده مطابق رابطه ۷، [۷] در مدل فوق، نتایج بهتری با توجه به سدهای واقعی شکسته شده در جهان بدست می‌دهد.

$$R_{crit} = \frac{2c}{\rho'(\operatorname{tg}\phi + 2)} + \frac{\operatorname{tg}\phi}{(\operatorname{tg}\phi + 2)} (H_{dam} - H_p) \quad (11)$$

$R_{crit}$  = شعاع بحرانی لوله ایجاد شده در بدنه سد،  $m$ ،  $c$  = چسبندگی ذرات هسته،  $Kpas$ ،  $\rho'$  = دانسیته استغراق مصالح سد،  $Kg/m^2$ ،  $\phi$  = زاویه اصطکاک داخلی مصالح

سد، درجه،  $H_{dam}$  = تراز تاج سد،  $m$ ،  $H_p$  = تراز مرکز لوله ایجاد شده،  $m$

برای تعیین هیدروگراف دبی خروجی ناشی از شکست سد و روندیابی سیلاب ناشی از آن، مدل FLDWAV از توسعه مدل‌های DWOPER و DAMBRK با کارایی بهتر ایجاد شده است [۸]. این مدل یک مدل پارامتری است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریانهای غیرماندگار از روش ضمنی چهارنقطه‌ای و تکنیک (Local Partial LPI) Inertia Technique استفاده شده است.

## ۴- مطالعه موردی

مطالعه موردی در این تحقیق بر روی سد خاکی آیدوغموش انجام شده است (شکل ۲). در پایاب سد مذکور مناطق مسکونی (شهرک راه‌آهن)، پلهای ارتباطی راه‌آهن شمالغرب، تصفیه‌خانه آب و فاضلاب و کارخانه فولاد آذربایجان وجود دارد. مطالعات شکست برای این سد با استفاده از روابط تجربی و مدل‌های کامپیوتری BREACH و FLDWAV مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات لازم برای تحلیل شکست بصورت زیر می‌باشد:

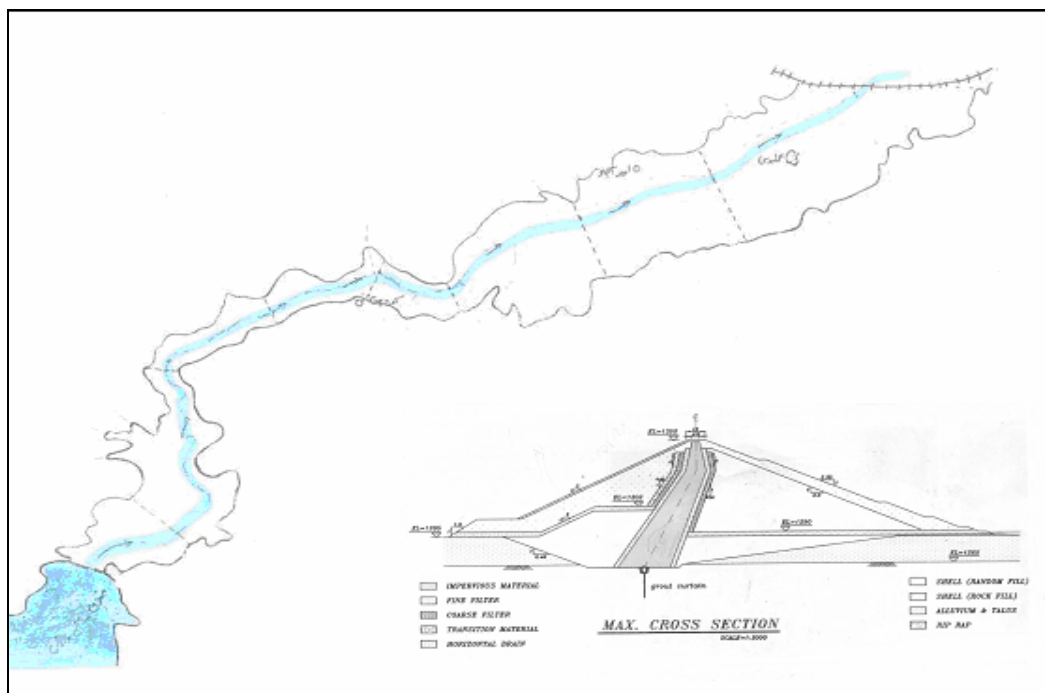
تراز بستر رودخانه ۱۲۸۳ متر، تراز تاج سرریز ۱۳۴۱/۵ متر، تراز تاج سد ۱۳۵۰ متر، حجم مخزن در تراز تاج سرریز و تاج سد به ترتیب ۱۴۵/۲ و ۲۱۲/۵ میلیون متر مکعب، میزان چسبندگی مصالح هسته ۰/۲۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب،  $D_{50}$  مصالح هسته و مصالح خارجی به ترتیب ۰/۲۰۳ و ۳/۳۵ میلیمتر، زاویه اصطکاک داخلی مصالح هسته و مصالح خارجی به ترتیب ۳۰ و ۴۲/۵ درجه، میزان سیلاب PMF و ۱۰۰ ساله به ترتیب ۵۶۶۰ و ۳۸۱ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد [۹].

برای مطالعه شکست سدهای خاکی در حالت روگذری از سیلابهای PMF و برای حالت پدیده ایجاد لوله در بدنه سد از سیلابهای ۱۰۰ ساله یا دبی نرمال استفاده می‌گردد [۱۰].

میزان حداکثر دبی خروجی با استفاده از رابطه پیشنهادی برای حالت روگذری و پدیده ایجاد لوله در بدنه سد آیدوغموش به ترتیب ۴۳۰۰۵ و ۲۸۲۴۳ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. هیدروگرافهای دبی خروجی با استفاده

از مدل BREACH در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. با استفاده از نتایج روشهای تجربی و مدل فرسایشی BREACH و کاربرد آن در مدل FLDWAV هیدروگراف دبی خروجی و دبی شبیه‌سازی شده در پایاب سد مورد مطالعه در شکل‌های ۴ الی ۷ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۴ الی ۷، میزان حداکثر دبی خروجی از سد آیدوغموش و حداکثر تراز آب در مجاورت مناطق مسکونی (کیلومتر ۲۴/۳۵) برای حالت روگذری به ترتیب ۵۸۳۲۷ متر مکعب بر ثانیه و ۱۰۶۳/۶۹ متر و برای حالت پدیده ایجاد لوله در بدنه سد به ترتیب ۵۹۲۳۳ مترمکعب بر ثانیه و ۱۰۶۳/۳۱ متر برآورد شده‌است. با تغییر زمان شکست بین ۰/۹۷ الی ۵ ساعت در مدل FLDWAV میزان حداکثر دبی خروجی از سد برای حالت روگذری به ترتیب ۸۴۷۶۰ و ۲۹۶۳۰ مترمکعب بر ثانیه و برای حالت پدیده ایجاد لوله در بدنه سد، این مقادیر به ترتیب ۷۸۴۹۰ و ۳۱۹۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشند.

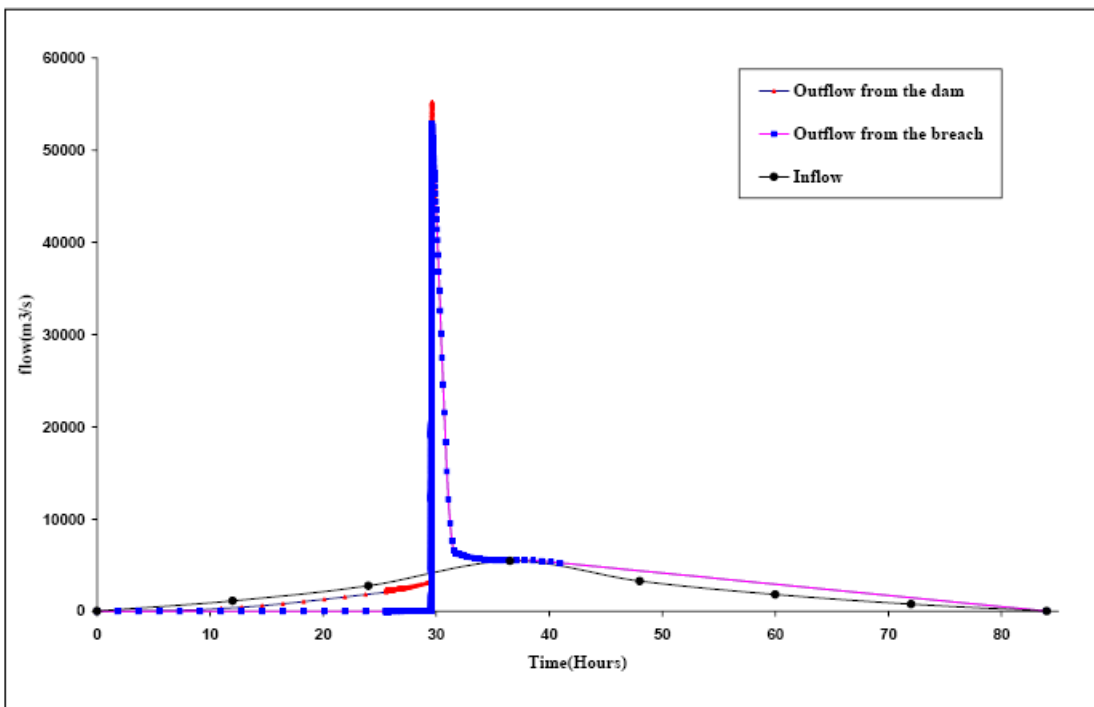
از مدل BREACH در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. با استفاده از نتایج روشهای تجربی و مدل فرسایشی BREACH و کاربرد آن در مدل FLDWAV هیدروگراف دبی خروجی و دبی شبیه‌سازی شده در پایاب سد مورد مطالعه در شکل‌های ۴ الی ۷ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۴ الی ۷، میزان حداکثر دبی خروجی از سد آیدوغموش و حداکثر تراز آب در مجاورت مناطق مسکونی (کیلومتر ۲۴/۳۵) برای حالت روگذری به ترتیب



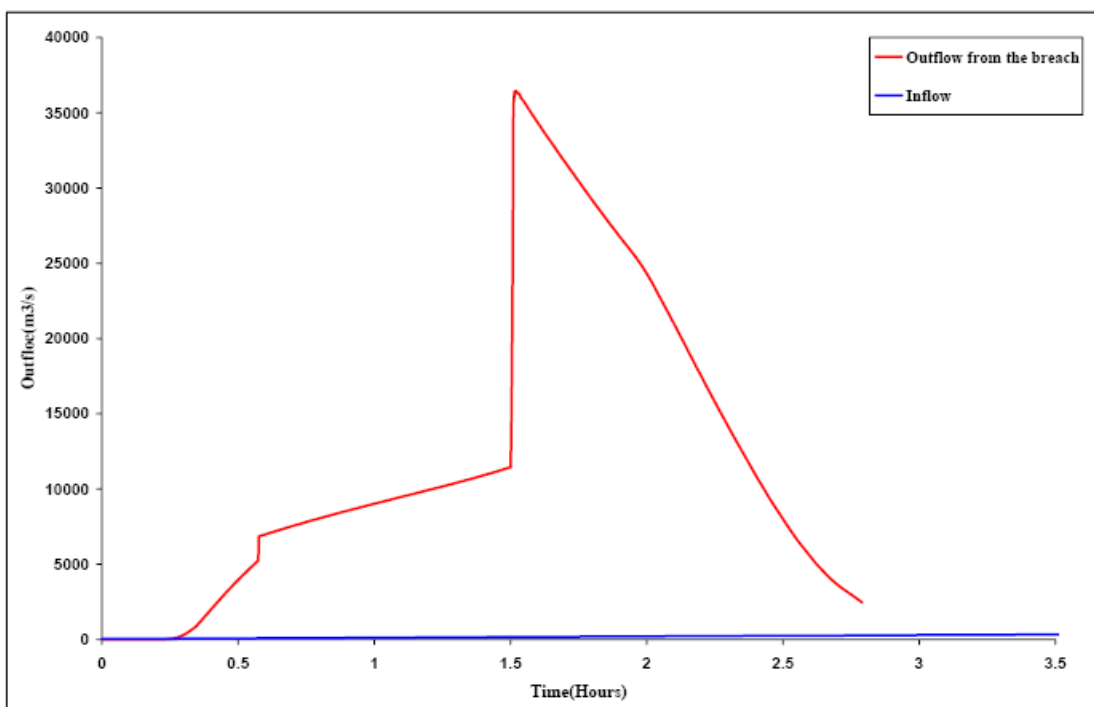
شکل ۲: مسیر پایاب سد آیدوغموش

جدول ۳: نتایج تخمین پارامترهای شکست سد خاکی آیدوغموش

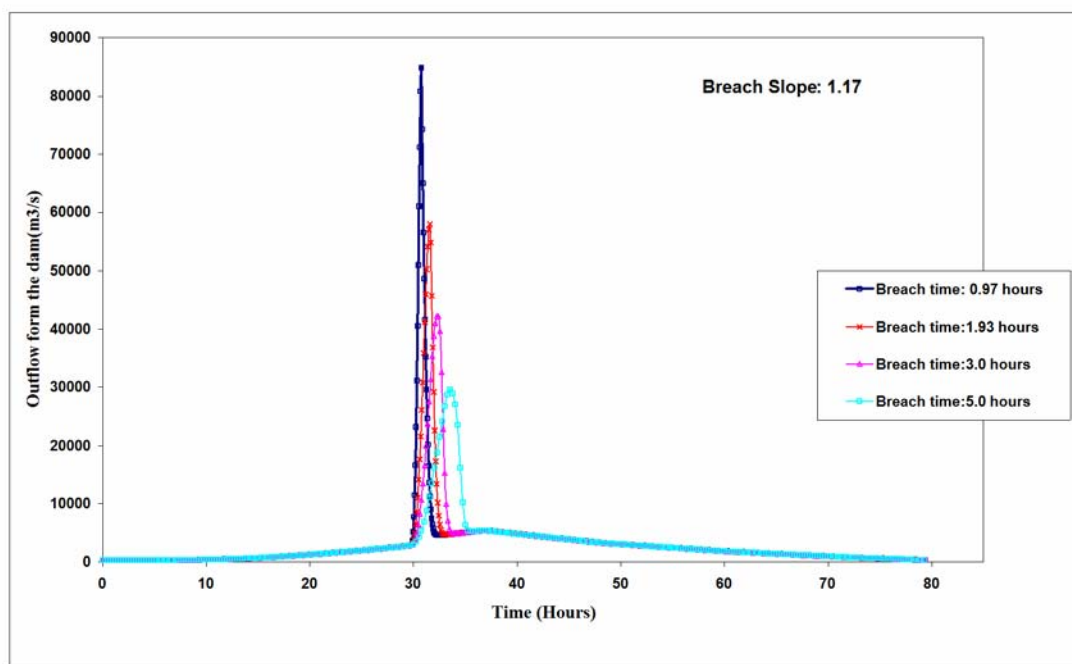
مدل BREACH		رابطه پیشنهادی		پارامتر شکست
Piping	روگذری	Piping	روگذری	
۳۶۴۳۸	۵۵۱۶۴	۲۸۲۴۳	۴۳۰۰۵	حداکثر دبی خروجی (مترمکعب بر ثانیه)
۲/۵۶	۱/۹۳	۰/۹۷-۵/۱۹	۰/۹۷-۵/۱۹	زمان (ساعت)



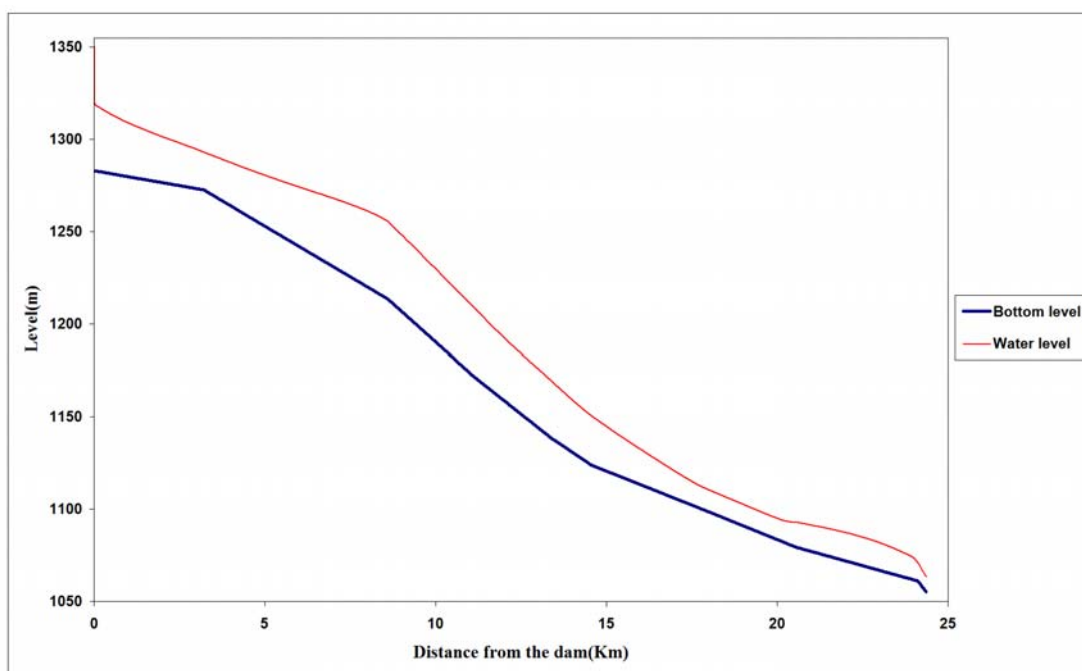
شکل ۲: هیدروگراف دبی خروجی سد آیدوغموش در اثر پدیده روگذری (محاسبه شده با مدل BREACH)



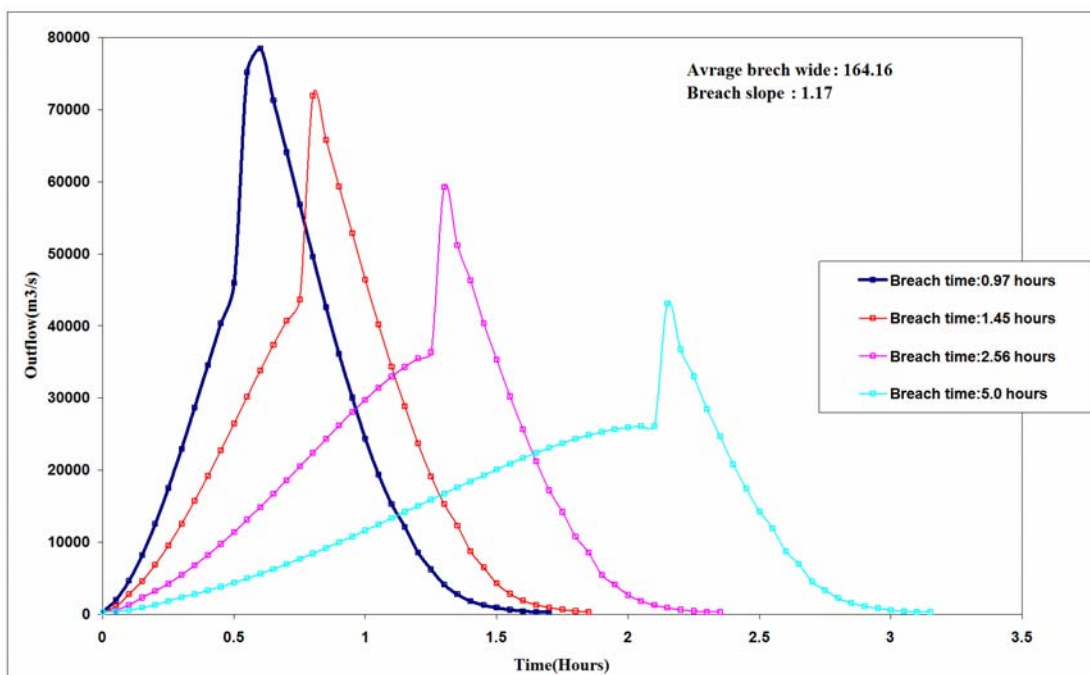
شکل ۳: هیدروگراف دبی خروجی سد آیدوغموش در اثر پدیده Piping (محاسبه شده با مدل BREACH)



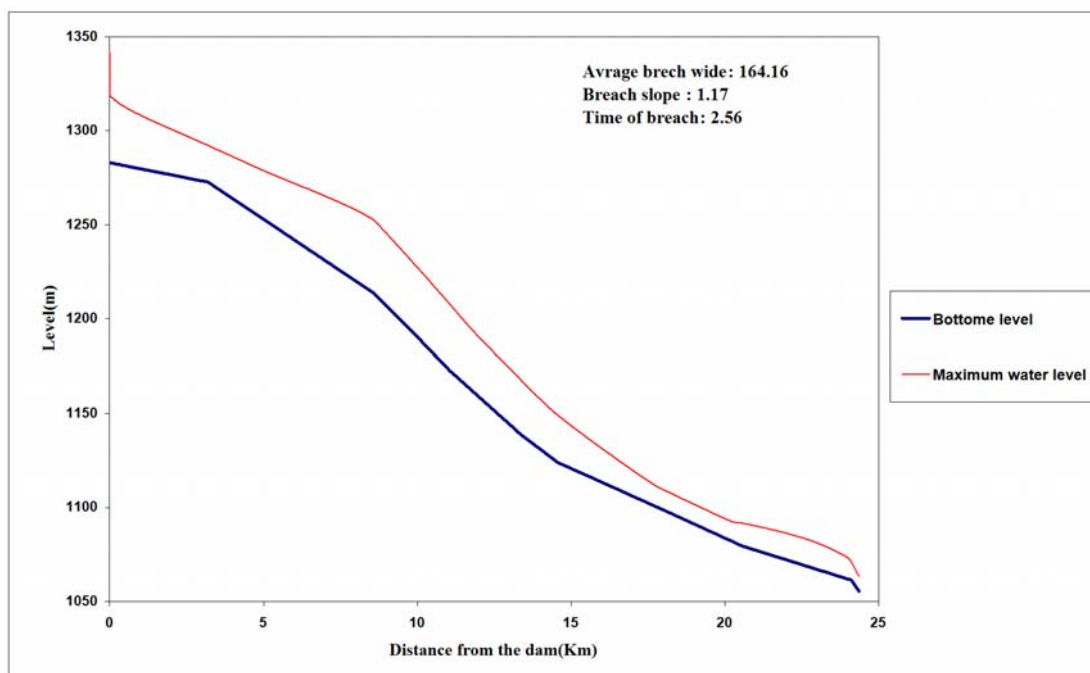
شکل ۴: هیدروگراف دبی خروجی سد آیدوغموش به ازای مقادیر مختلف زمان شکست (بعلت روگذری)



شکل ۵: پروفیل ماکزیمم تراز آب در رودخانه آیدوغموش (بعلت روگذری)



شکل ۶: هیدروگراف جریان خروجی به ازای مقادیر مختلف زمان شکست (بعلت وقوع Piping)



شکل ۷: پروفیل ماکزیمم تراز آب در رودخانه آیدوغموش (بعلت وقوع Piping)

## ۵- نتیجه گیری

- روابط پیشنهادی بر اساس ۱۴۲ سد خاکی شکسته شده در جهان صورت گرفته و نسبت به روابط قبلی از دقت و اطمینان بیشتری برخوردار است.
- استفاده از شرایط ژئوتکنیکی پیشنهادی در تعیین زمان ریزش لوله ایجاد شده در بدنه سد، در مدل

نتایج حاصل از تحقیق انجام شده، به شرح زیر می باشند:

- کلیه روابط تخمین پارامترهای شکست سدهای خاکی غیر قطعی و با یک احتمال مشخص نتایج حاصل از تخمین معتبر می باشند.



85577 Neubiberg, Germany, European commission Concerted Action on Dam Break Modelling Meeting at University of Zaragoza, Spain 18th - 19th November 1999.

U.S. Army Corps of Engineers, 1997, Engineering and Design hydrologic engineering requirement for reservoirs, Manual No. 1110-2-1420.

Wahl, Tony L., 1998, Prediction of Embankment Dam Breach Parameters - A Literature Review and Needs Assessment, U.S. Bureau of Reclamation Dam Safety Report DSO-98-004, July 1998.

Rousseuw, Peter J. (1998). "Robust Estimation and Identifying Outliers" in andbook of Statistical Methods for Engineers and Scientists, 2nd ed., Harrison M. Wadsworth, r., editor. McGraw-Hill, New York, NY, pp.17.1-17.15.

Webby, M. Grant, 1996, discussion of "Peak Outflow from Breached Embankment Dam" (Froehlich,1995a), Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 122, no. 4, p. 316-317.

Fread, D.L., 1988 (revised 1991), BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Maryland.

Huokuna, M., 1998, "A Numerical Erosion Model for Embankment Dam Failure," European commission Concerted Action on Dam Break Modelling Meeting at Universität D.L. Fread, and J.M. Lewis, 1998, "NWS FLDWAV Model: The Replacement of DAMBRK for Dam-Break Flood Prediction," Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service (NWS), NOAA Silver Spring, Maryland 20910.

آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و اردبیل، وزارت نیرو، "طرح سد آیدوغموش"، ۱۳۸۰.

Singh, V., P., 1996. Dam Breach Modeling Technology. Kleiwer Academic Publishers.

فرسایشی BREACH نتایج بهتری را با توجه به سدهای واقعی شکسته شده در جهان بدست می‌دهد.

- [۲] حساسیت مدل BREACH در حالت روگذری، نسبت به عمق اولیه شکاف زیاد می‌باشد. با توجه به مشخصات سد آیدوغموش، عمق اولیه شکاف ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شده است.
- نتایج تخمین پارامترهای شکست سد خاکی آیدوغموش با استفاده از روابط پیشنهادی و مدل فرسایشی BREACH در جدول ۳ نشان داده شده- اند.
- مدل FLDWAV حساسیت زیادی به زمان شکست سد دارد و تغییرات معنی‌داری در هیدروگراف دبی خروجی ایجاد می‌نماید.
- در حالت پدیده ایجاد لوله در بدنه سد، مدل FLDWAV مقادیر بالاتری را در تخمین حداکثر دبی خروجی نشان می‌دهد، زیرا مسئله ریزش لوله ایجاد شده را بصورت آبی و بدون در نظر گرفتن شرایط انتقال رسوب محاسبه می‌نماید.
- با توجه به نتایج بدست آمده تصفیه‌خانه آب و فاضلاب، چهار پل ارتباطی در مجاورت راه آهن و شهرک مسکونی راه‌آهن در معرض خطر سیلاب ناشی از شکست سد قرار می‌گیرند.

[۹]

[۸]

[۷]

[۶]

[۵]

[۴]

[۳]

[۲]

[۱]

## ۶- مراجع

[۱] Broich, K., 1999, "An Overview of Breach Modelling", University of the Federal Armed Forces Munich Werner-Heisenberg-Weg 39;