

# وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در هسته رسی مایل یک سد سنگریزهای بلند واقع شده در دره‌های تنگ

مرتضی سالاری<sup>۱</sup>، علی اخترپور<sup>۲\*</sup>، امین اکرامی فرد<sup>۳</sup>

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه فردوسی مشهد

\*Akhtarpour@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۴/۱۰]

## چکیده

مطابق آمار، فرسایش داخلی و آبشستگی از عوامل اصلی تخریب سدهای خاکریزه‌ای هستند. اگر این گونه سدها در دره‌های تنگ بنا شوند، دیواره‌های دره موجب افزایش قوس زدگی در بدنه سد می‌شود؛ بنابراین وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در این گونه خاکریزه‌ها محتمل‌تر است. سد بیدواز، سدی خاکی سنگریزه‌ای با هسته‌ی رسی مایل و نازک است که در شمال شرق ایران در دره‌ای تنگ ساخته شده است. هفت و نیم سال بعد از شروع آبیگری، فروافتادگی‌ای در رویه سد مشاهده شد. ارزیابی رفتار سد بر مبنای داده‌های ثبت شده در ابزارهای نصب شده در داخل بدنه و پی سد وقوع فرسایش داخلی را در بخش‌های تحتانی هسته و مجاور به تکیه‌گاه چپ تأیید می‌کنند. پدیده‌ی شکست هیدرولیکی به‌عنوان یکی از علل اصلی شروع فرسایش داخلی در این سد مطرح است. براین اساس هدف اصلی این مقاله ارزیابی اعتبار این فرضیه است. برای ارزیابی اعتبار این فرضیه، ابتدا رفتار سد در دوران ساخت و آبیگری با یک مدل عددی سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. سپس با استفاده از روابط تجربی و نظری معتبر ضریب اطمینان در برابر وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در وجه بالادست هسته سد محاسبه شد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهند، شیب‌های تند دیواره‌های دره، تغییر شیب ناگهانی و اختلاف خواص تراکم‌پذیری مصالح بدنه سد موجب انتقال تنش قابل توجهی از هسته در مجاور دیواره‌های دره به‌ویژه در ترازهای تحتانی آن شده است. این امر سبب شده که در این نواحی، ضریب اطمینان در برابر وقوع شکست هیدرولیکی با هریک از روابط تجربی استفاده‌شده کمتر از یک باشد، پس پدیده شکست هیدرولیکی می‌تواند از علل اصلی شروع فرسایش داخلی در هسته رسی مایل سد بیدواز است.

**واژگان کلیدی:** سدهای خاکی، فرسایش داخلی، قوس زدگی، شکست هیدرولیکی

## ۱- مقدمه

۳۰-۵۰ درصد خرابی‌های سدهای خاکی به علت آبشستگی<sup>۱</sup> پیش‌رونده و فرسایش داخلی است. فل و همکاران [4] معتقد هستند برای بررسی دقیق آبشستگی و فرسایش داخلی در

اطلاعات و تحلیل‌های آماری کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ [1, 2] فوستر و همکاران [3] نشان می‌دهند که در حدود

مطالعات انجام شده درباره نشت‌های متمرکز یا فرسایش داخلی در سدهای هارسپرانگت<sup>۲</sup> و هول<sup>۳</sup> [16]، سد هیته‌جوت<sup>۴</sup> در نروژ [17, 18]، سد بالدرهد<sup>۵</sup> در انگلستان [19]، سدهای استکتون<sup>۶</sup> و ویستر<sup>۷</sup> در آمریکا [20]، سد ویدالسواتن<sup>۸</sup> در نروژ [21] و سد تتن<sup>۹</sup> در آمریکا [22] نشان دادند که پدیده شکست هیدرولیکی می‌تواند از عوامل اصلی وقوع آسیب دیدگی‌های جدی در این سدها باشد.

سد بیدواز، سدی خاکی سنگریزه‌ای بلند با هسته رسی نازک و مایل است که در شمال‌شرق ایران روی رودخانه بیدواز بنا شده است. ساختگاه سد، دره‌ای تنگ و U شکل است. حدود هفت و نیم سال بعد از شروع اولین آبیگری، فروافتادگی<sup>۱۰</sup> در رویه بالادست بدنه سد مشاهده شد. رفتارنگاری سد بر اساس داده‌ای ثبت‌شده در ابزارهای نصب‌شده در بدنه و پی آن، وقوع فرسایش داخلی را در بخش‌های تحتانی هسته و مجاور به تکیه‌گاه چپ دره تأیید می‌کند. با توجه به مشخصات هندسی و تراکم‌پذیری مصالح بدنه سد و ساختگاه پدیده شکست هیدرولیکی به‌عنوان یکی از علل اصلی شروع فرسایش داخلی در این سد می‌تواند مطرح باشد. بر این اساس هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی فرضیه احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در هسته رسی مایل سد بیدواز با استفاده از نتایج شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی و نیز روابط نظری و تجربی معتبر است.

## ۲- سد بیدواز

سد بیدواز سدی خاکی سنگریزه‌ای با هسته رسی مایل است که در ۲۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان اسفراین روی رودخانه بیدواز بنا شده است. بیشینه ارتفاع سد از سطح پی آبرفتی ۶۶ متر است. ساختگاه سد دره‌ای تنگ و تقریباً U شکل با شیب متوسط دیواره‌ای حدود ۶۰ درجه نسبت به افق و عرض دره‌ای حدود ۴۰ متر در بستر

سدهای خاکی‌ریزه‌ای باید مراحل چهارگانه این پدیده که عبارتند از: (۱) شروع (۲) ادامه (۳) توسعه (۴) گسیختگی یا تخریب، به‌صورت مجزا مورد مطالعه قرار گیرند. از نظر ایشان، سازوکارهای احتمالی فرسایش داخلی و آبستگي عبارتند از: (۱) فرسایش عقب‌رونده (۲) فرسایش بر اثر تراوش متمرکز و (۳) ریزشویی است. در مطالعه ایشان، پدیده شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی‌ریزه‌ای در گروه علل شروع فرسایش داخلی بر اثر سازوکار تراوش متمرکز قرار گرفته است.

شکست هیدرولیکی فرایند شروع یا توسعه یک جدایش فیزیکی کوچک، مانند، ترک است [5, 6]. این پدیده در بیشتر مسائل ژئوتکنیکی مهم مانند، گونه‌های متنوع تزریق [7, 8] با پمپ کردن آب، هوا و یا مواد شیمیایی به داخل خاک، در صورتی که فشار پمپاژ از یک مقدار آستانه تجاوز کند، می‌تواند به وقوع پیوندد. در سدهای خاکی‌ریزه‌ای در اولین آبیگری، افزایش فشار آب مخزن موجب می‌شود که حالت تنش در وجه بالادست هسته نفوذناپذیر با سازوکار برشی یا کششی به پوش گسیختگی نزدیک شود. در نتیجه، در بعضی نواحی از وجه بالادست هسته ممکن است ترک‌هایی ایجاد شود. این‌گونه ترک‌ها را ترک‌های هیدرولیکی و فشار آب مورد نیاز برای ایجاد آن‌ها را فشار شکست هیدرولیکی می‌گویند [9].

اگر نواحی‌ای از توده خاک دارای سطح تنش اولیه پایینی باشد، در این نواحی حالت تنش خاک نزدیک‌تر به پوش‌های گسیختگی است، پس درحین اولین آبیگری، فشار آب کمتری برای ایجاد ترک‌های هیدرولیکی در آن نواحی لازم است. میزان شیب‌های دیواره‌های دره [10, 11, 12]، تغییرات شیب آن‌ها [13]، عرض دره [10, 12]، شکل هندسی هسته [14, 15]، نشست‌های تفاضلی ناشی از تغییرات خواص تراکم‌پذیری بدنه و پی (در راستای مقاطع عرضی و طولی) [10, 14, 5]، درصد رطوبت هسته نسبت به رطوبت بهینه [14] و همچنین اتصال نامناسب بدنه به سازه‌های جانبی مانند سرریز یا مجاری انتقال آب می‌توانند [5] از عوامل مؤثر بر میزان انتقال تنش از هسته (یا قوس‌زدگی<sup>۱</sup>)، ایجاد ترک و مناطق ضعیف در آن است.

2Harspranget  
3Holle  
4Hyttejuvet  
5Balderhead  
6Stockton  
7Wister  
8Viddalsvatn  
9Teton  
10Subsidence

1Arching

موقعیت سه مقطع ابزارگذاری شده سد در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. مقطع طولی سد و مقاطع ابزارگذاری (نمازبالادست)

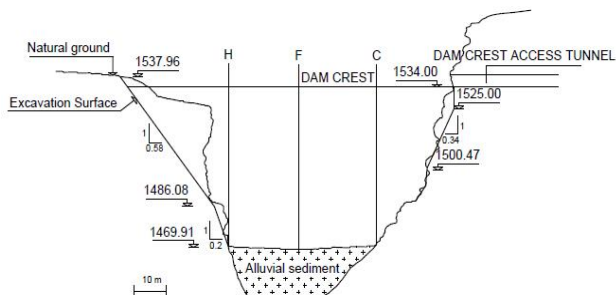


Fig. 1. The longitudinal section of the dam and the instrumentation sections (upstream face)

شکل (۲) نیز جانمایی این ابزارها را در مقطع عرضی H که نزدیک ترین مقطع ابزارگذاری شده به محل فروافتادگی است، نشان می‌دهد. پیزومترهای الکتریکی بدنه (EP)، پی (FP) و سلول‌های فشار (TP) برای اندازه‌گیری فشار حفره‌ای و تنش کل نصب شده‌اند. صفحات نشست سنج مغناطیسی برای اندازه‌گیری نشست در راستای قائم در داخل هسته و پوسته‌های بالادست و پایین دست سد نصب شده‌اند.

رودخانه است. شکل (۱) مقطع طولی دره را در راستای محور نشان می‌دهد. مناطق مختلف بدنه سد در یکی از مقاطع عرضی آن (مقطع H در شکل ۱) در شکل (۲) نشان داده شده است. مصالح هسته از جنس رس سیلتی با پلاستیسیته متوسط ( $PI=10$ ) تشکیل شده است که با حدود یک درصد کمتر از رطوبت بهینه در لایه‌های افقی به ضخامت حدود ۱۵ سانتی‌متر اجرا شده است. مناطق گراولی (۳A و ۳B) با رطوبت بالاتر از رطوبت بهینه در لایه‌هایی با ضخامت متوسط ۳۰ سانتی‌متر اجرا شده‌اند. مناطق سنگریزه-ای (۴A و ۴B) در لایه‌های با ضخامت متوسط ۶۰ سانتی‌متر با رطوبت کافی متراکم شده‌اند. فیلتر و زهکش قائم سد (۲A، ۲B و ۲C) شامل مصالح دانه‌ای هستند که با تراکم ترفیکی اجرا شده‌اند. پوش دانه‌بندی بخش‌های مختلف بدنه سد در شکل (۳) نشان داده شده است. پی آبرفتی سد دارای عمق بیشینه ۲۳ متر در محور سد است که از جنس مصالح شن و ماسه درشت‌دانه متراکم و نفوذپذیر است. کنترل تراوش در پی آبرفتی سد با کمک یک دیواره آب-بند بتن پلاستیک انجام می‌گیرد. توده سنگی محاط‌کننده سد از جنس آهک (شامل اولیتی، ماسه‌ای و دولومیتی) است.

شکل ۲. مقطع عرضی ابزارگذاری شده H، بخش‌های مختلف بدنه سد و موقعیت فروافتادگی سطحی

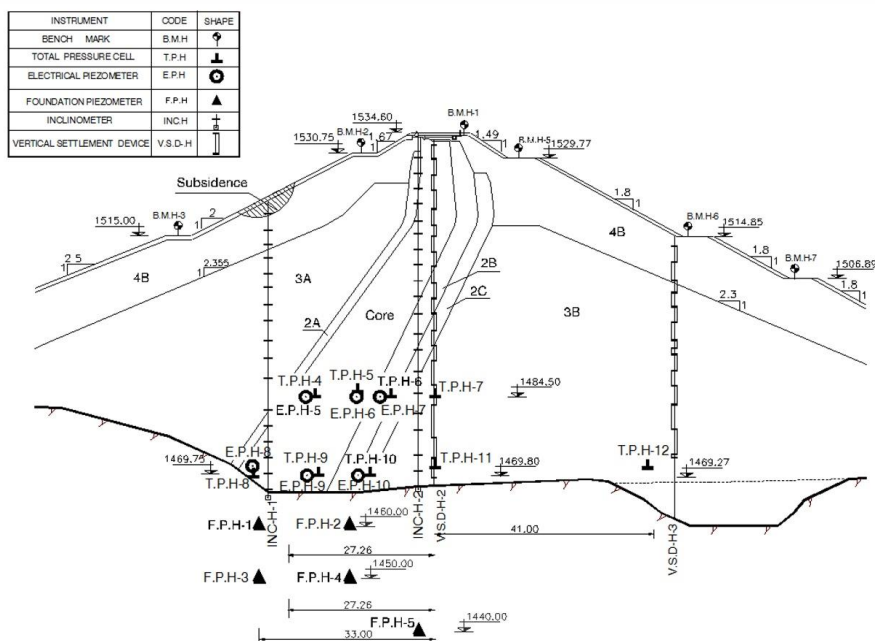


Fig. 2. The instrumented cross-section H, the different parts of the dam body, and the position of surface subsidence

مصالح هسته سد با رطوبت پایین تر از رطوبت بهینه متراکم شده‌اند و بخش عمده آن غیراشباع است. بر این اساس، در مقاطع C و F پیزومترهای نصب شده در داخل هسته دارای مقادیر نزدیک به صفر یا منفی است و تراز پیزومتریک آن‌ها متأثر از تراز آب مخزن نیست. در شکل (۵) تغییرات زمانی تراز پیزومتریک پیزومترهای نصب شده در داخل هسته سد در مقطع عرضی H نشان داده شده است. در این مقطع در دوران ساخت، بیشتر پیزومترهای داخل هسته دارای مقادیر صفر یا نزدیک به صفر هستند. بعد از گذر چند سال از شروع آبیگری، تراز پیزومتریک در این پیزومترها به تدریج افزایش می‌یابد و سرانجام برابر با تراز آب مخزن می‌شوند و همزمان با آن تغییر می‌کنند. این شاهد می‌تواند دلالت بر برقراری ارتباط مستقیمی بین آب مخزن و داخل هسته در مقطع H داشته باشد.

عملیات خاکریزی بدنه سد در حدود یک سال به طول انجامیده است و در ۵ سپتامبر ۲۰۰۴ پایان یافته است. حدود سه ماه بعد از اتمام خاکریزی بدنه در ۱۰ ژانویه ۲۰۰۵ اولین آبیگری سد شروع شده است. به علت بارندگی شدید، تراز آب مخزن در زمان شروع آبیگری ۱۴۹۳/۳+ بوده است (تراز تاج فرازبند ۱۴۸۸/۸+). هفت و نیم سال بعد، در اوایل سال ۲۰۱۳ فروافتادگی‌ای در رویه سد مشاهده شد، موقعیت فروافتادگی مذکور در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۳. پوش دانه‌بندی بخش‌های مختلف بدنه سد

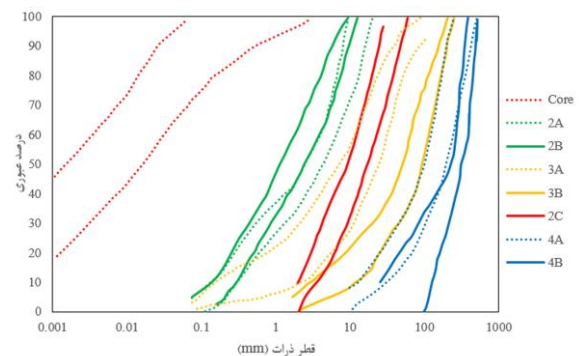


Fig. 3. Grains size distribution limits of different parts of the dam

شکل ۴. پیزومترهای پی، فیلتر و زهکش پایین دست مقطع H

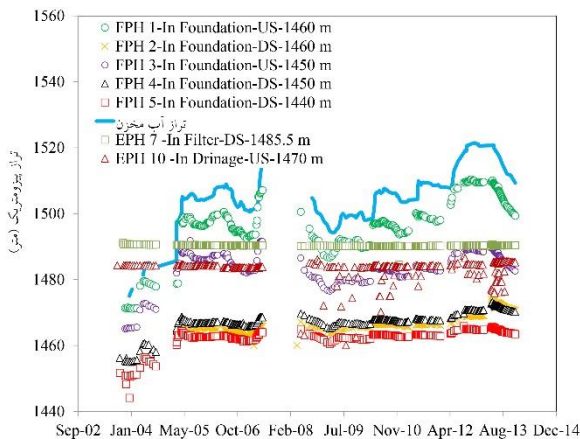


Fig. 4. The piezometers in the foundation and the downstream filter and drain at cross-section H

شکل ۵. پیزومترهای داخل هسته، مقطع H

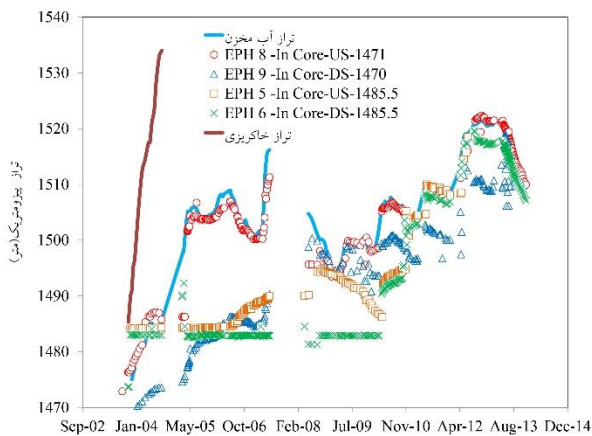


Fig. 5. The piezometers inside the core at cross-section H

### ۳- رفتارنگاری سد

تغییرات تراز پیزومتریک در پیزومترهای موجود در پی سنگی، زهکش و فیلتر پایین دست مقطع عرضی H در مقایسه با تغییرات تراز آب مخزن در شکل (۴) نشان داده شده است. در مقطع H و دو مقطع دیگر، پیزومترهایی که در پی و بالادست پرده آب‌بند و دیواره آب‌بند نصب شده‌اند نسبت به تغییرات تراز آب مخزن بسیار حساس هستند؛ اما پیزومترهای که در پایین دست پرده و دیواره آب‌بند قرار دارند به میزان بسیار کمتری متأثر از تغییرات تراز آب مخزن است. این رفتار حاکی از کارایی مناسب سیستم آب‌بندی در راستای عمود بر محور سد است. علاوه بر این در این مقطع و دو مقطع عرضی ابزارگذاری شده دیگر، پیزومترهایی که در فیلتر یا زهکش پایین دست نصب شده‌اند متأثر از تغییرات تراز آب مخزن نیست. این مشاهده نیز می‌تواند حاکی از این باشد که هسته و فیلترها در جهت عمود بر محور کارایی مناسبی دارند.

مطالعه، با توجه به واقع شدن سد در دره‌ای تنگ، رفتار آن با یک مدل عددی سه‌بعدی در دوران ساخت و اولین آبیگری شبیه‌سازی شده است. این تحلیل در محیط برنامه تفاضل محدود FLAC3D انجام شده است. هندسه المان‌بندی شده سد در شکل (۷) نشان داده شده است. برای مش‌بندی از المان‌های مکعبی استفاده شده است. برای افزایش دقت محاسباتی سعی شده نسبت ابعاد المان‌ها به یک نزدیک باشد و در جاهایی که نیاز به تغییر اندازه المان‌ها است، برای نمایش بهتر گرادیان‌های تنش این تغییر به صورت تدریجی صورت گیرد [23]. فرمول-بندی تحلیل به گونه‌ای است که معادلات جریان و مکانیکی به‌طور همزمان حل می‌شوند.

شکل ۷. هندسه سه‌بعدی المان بندی شده مدل

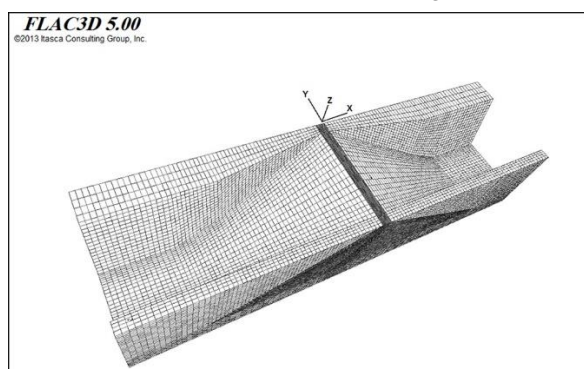


Fig. 7. 3D geometry of the meshed model

#### ۴-۱- مدل‌سازی مکانیکی و جریان

رفتار مکانیکی مصالح بدنه و پی آبرفتی با مدل رفتاری موهر-کولمب شبیه‌سازی شده است. این مدل دارای شش پارامتر است که عبارتند از: مدول یانگ  $E$ ، ضریب پواسون  $\nu$ ، زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$ ، چسبندگی  $C$ ، زاویه اتساع  $\psi$ ، و مقاومت کششی  $t$ . به علت سختی قابل ملاحظه مصالح توده سنگی محاط‌کننده سد از مدل رفتاری الاستیک خطی برای آن استفاده شده است. این مدل دارای دو پارامتر است که عبارتند از: مدول یانگ  $E$ ، ضریب پواسون  $\nu$ . مقادیر کلیه این پارامترها برای بخش‌های مختلف بدنه سد در جدول (۱) آمده است. این پارامترها با استفاده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بدست آمده‌اند و در ادامه با تحلیل‌های بازگشتی تدقیق شده‌اند [24-27]. به‌طور ویژه، پارامترهای مقاومتی هسته بر اساس

همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در مجاورت هریک از پی‌زومترهای داخل هسته یک سلول تنش کل برای اندازه‌گیری تنش کل قائم نصب شده است. بنابراین می‌توان تنش مؤثر قائم را از تفاضل مقادیر ثبت‌شده در این دو ابزار محاسبه کرد. تغییرات زمانی تنش مؤثر قائم در محل نصب پی‌زومترهای هسته در شکل (۶) نشان داده شده است. شکل (۶) نشان می‌دهد که در این ناحیه از هسته، در دوران ساخت تنش مؤثر همگام با افزایش ارتفاع خاکریز به تدریج افزایش می‌یابد. در اوایل دوران آبیگری، ورود آب به داخل پوسته بالادست موجب کاهش تنش مؤثر در آن و بالتبع در داخل هسته می‌شود. اما در ادامه آبیگری، با کاهش تراز آب مخزن برخلاف انتظار تنش مؤثر با سرعت غیرمعمولی به سمت صفر کاهش می‌یابد. این کاهش تنش مؤثر حاکی از ضعیف شدن اتصالات بین ذرات خاک است. نزدیک به صفر شدن تنش مؤثر در این ناحیه از هسته به این معناست که جریان آب به آسانی می‌توانسته ذرات خاک را با خود انتقال دهد و موجب فرسایش داخلی مصالح هسته شود.

در ادامه، با ساخت یک مدل تحلیلی سه‌بعدی از سد در دوران ساخت و آبیگری این عارضه علت‌یابی شده است.

شکل ۶. تنش مؤثر در محل پی‌زومترهای داخل هسته، مقطع H

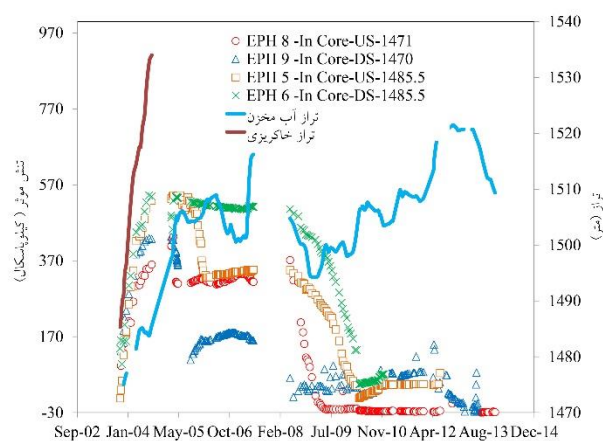


Fig. 6. The effective stress in the position of the core piezometers at cross-section H

#### ۴- مدل عددی تحلیلی سه‌بعدی

در سال‌های اخیر روش‌های عددی به‌طور گسترده‌ای برای تحلیل سدهای خاکی و سنگریزه‌ای استفاده می‌شود. در این

نتایج آزمایش‌های برجا (مانند لوفران و لوژان) استخراج شده است [26 و 27].

جدول ۱. پارامترهای رفتاری مکانیکی و جریان مدل

parameters	Bedrock	alluvial	core	2A 2B 2C	3B	3A
$\rho (\frac{gr}{cm^3})$	2.65	1.95	1.80	1.90	2.15	2.15
$E (MPa)$	1100	80	9	42	55	70
$\nu$	0.13	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
$C (kPa)$	-	0	50	0	0	0
$\phi$	-	36	30	36	38	41
$\psi$	-	6	0	6	8	9
$t (kPa)$	0	0	80	0	0	0
$K (\frac{cm}{s})$	$2 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$

Table 1. The parameters pertaining to mechanical and flow behavior of the model

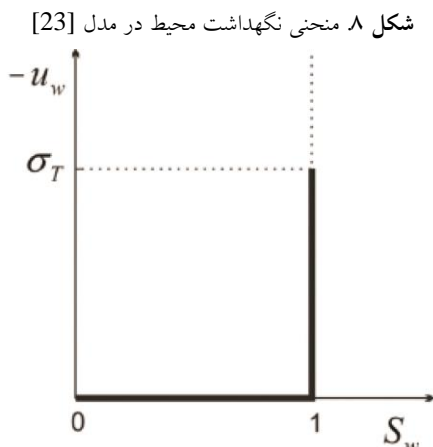


Fig. 8. Assumed retention curve in FLAC3D [23]

در این برنامه، فرایندهای دیفیوژن تغییرشکل مبتنی بر تئوری شبه استاتیک بایوت [29] فرمول‌بندی شده است. در این فرمول‌بندی از تراکم‌پذیری ذرات خاک در مقایسه با اسکلت تغییرشکل‌پذیر آن چشم‌پوشی شده است [23].

#### ۵-۲- مراحل مدل‌سازی

خاکریزی بدنه سد با چهل و دو لایه از المان‌ها و سپس آبگیری سد تا رسیدن به تراز ۱۵۱۶/۹ در تاریخ ۱ ژوئن ۲۰۰۷ در چهار مرحله شبیه‌سازی شده است. با توجه به شکل (۷) این تاریخ تقریباً منطبق با لحظه آغاز افت سریع تنش مؤثر در بخش‌های

آزمایش‌های برش مستقیم و تک‌محوری روی نمونه دست‌نخورده و نیز تیر خمشی (برای تعیین مقاومت کششی) روی نمونه بازسازی‌شده (با رطوبت برجا) بدست آمده از حفاری ماشینی در هسته سد تعیین شده‌اند [25].

استفاده از تحلیل همبسته مکانیکی - جریان نیاز دارد که فرمول‌بندی جریان سیال مشخص شود. در فرمول‌بندی جریان سیال استفاده شده در برنامه FLAC3D قانون دارسی بر انتقال جریان در محیط متخلخل حاکم است. هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل  $K$ ، (بر حسب  $m/s$ ) تابعی از نفوذپذیری اسکلت متخلخل خاک (نفوذپذیری ذاتی<sup>۱</sup>)، خواص سیال (دانسیته و ویسکوزیته) و درجه اشباع‌شدگی محیط  $S_w$  است. نفوذپذیری ذاتی  $k$ ، (بر حسب  $m^2$ ) اسکلت خاک بستگی به تخلخل کلی  $n$  دارد. برای سادگی از مقدار ثابتی برای نفوذپذیری ذاتی خاک استفاده شده است که متناظر با تخلخل اولیه آن است [23]. شکل (۸) منحنی نگهداشت<sup>۲</sup> پیش فرض محیط متخلخل در مدل است. این منحنی تغییرات فشار سیال میان حفره‌ای  $(-u_w)$  را در برابر درجه اشباع‌شدگی  $S_w$  نشان می‌دهد [23]. در این شکل،  $\sigma_T$  حد کششی سیال (عدد منفی) است. این کمیت از نظر فیزیکی تنش کششی‌ای است که توسط آب حفره‌ای قابل تحمل است. هنگامی که فشار سیال به زیر این حد افت کند، موینگی به‌وقوع می‌پیوندد و فشار سیال میان حفره‌ای صفر می‌شود. در برنامه FLAC3D رابطه (۱) برای منظور کردن تأثیر اشباع‌شدگی خاک بر هدایت هیدرولیکی بکار می‌رود [23].

$$K(S_w) = K(S_w = 1) \times (3 - 2S_w) S_w^2 \quad (1)$$

در جدول (۱) هدایت هیدرولیکی (در حالت اشباع کامل) برای بخش‌های مختلف بدنه سد در مدل تحلیلی نشان داده شده است. این کمیت برای مصالح هسته بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بدست آمده‌اند [24] و برای سایر بخش‌های بدنه براساس دانه‌بندی آن‌ها و با کمک روابط تجربی مانند رابطه هازن [28] استخراج شده‌اند [24]. هدایت هیدرولیکی مصالح پی آبرفتی و توده سنگی محاط‌کننده سد از

1 intrinsic permeability  
2 retention curve  
3 interstitial fluid pressure

پایین دست محور (SM-3)، نصب شده‌اند. شکل (۹) مقایسه بین پروفیل‌های نشست اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در این ابزارها را نشان می‌دهد. هماهنگی مناسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده دیده می‌شود نشست بیشینه در شروع آبیگری سد ۸۳ سانتی متر است (۱/۲۶ درصد ارتفاع سد).

مقایسه مقادیر تنش کل قائم اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در محل سلول‌های تنش کل واقع در مقطع H در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل هماهنگی مناسبی بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده دیده می‌شود. عدم هماهنگی مشاهده شده در اواخر دوره تحلیل می‌تواند به علت تأثیر فرسایش داخلی بر توزیع تنش‌های هسته باشد.

توزیع کنتوری تنش کل قائم، تنش اصلی کمینه و نسبت قوس-زدگی (نسبت تنش کل قائم  $\sigma_v$ ، به تنش سربار  $\gamma h$ ) در رویه بالادست هسته مایل سد در شکل‌های (۱۱ تا ۱۳) نشان داده شده است. با وجود تغییرات جزئی این کمیت‌ها در مقاطع میانی سد، اما در مقاطع عرضی مجاور دیواره‌های دره (به‌ویژه جناح چپ) به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابند. این کاهش ناگهانی ناشی از تأثیر دره تنگ و شیب تند سنگبرداری‌ها بر توزیع تنش داخلی هسته است. همین کاهش موجب افزایش احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در این نواحی خواهد شد.

شکل ۹. مقادیر نشست محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در مقطع F در شروع آبیگری

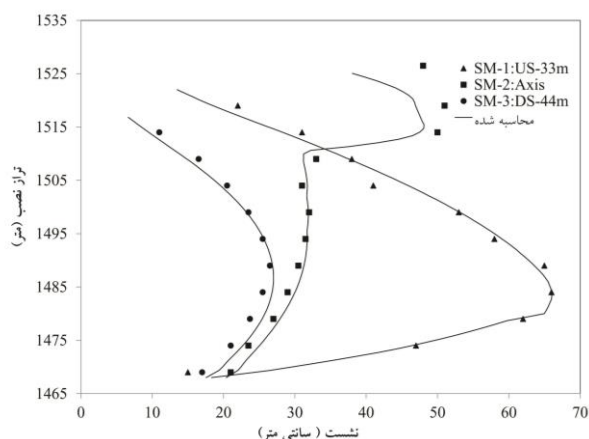


Fig. 9. The calculated and measured values for settlement at section F during the first impounding

تحتانی مقطع H است. بر طبق ایده‌آل‌سازی نوبری و دانکن [30] چهار اثر آبیگری عبارتند از: (۱) بار هیدرواستاتیک روی المان آب‌بند (هسته) (۲) بار هیدرواستاتیک روی پی، (۳) نیروی غوطه‌وری پوسته بالادست (۴) نشست‌های رمبشی مصالح پوسته بالادست. از آنجایی که محاسبات جریان و مکانیکی به‌صورت همزمان انجام می‌پذیرد، با تخصیص فشار حفره‌ای متناسب با تراز آب مخزن در هر مرحله از آبیگری بر گره‌های المان‌های پوسته، فیلتر بالادست و پی آبرفتی و همچنین، اعمال بار هیدرواستاتیک متناسب با تراز آب مخزن بر سطح بیرونی پوسته و سطح پی در بالادست، سه اثر اول آبیگری شبیه‌سازی شده است. متأسفانه به‌جز تنها قرائت معتبر از نشست‌سنج‌های مغناطیسی سد در شروع اولین آبیگری، قرائت معتبر دیگری از نشست سد در اختیار نیست. البته بازدیدهای میدانی نشان می‌دهد میزان نشست‌های پوسته بالادست در دوران اولین آبیگری قابل توجه نبوده است به گونه‌ای که در حال حاضر گرده<sup>۱</sup> تاج سد همچنان پابرجاست؛ بنابراین در مدل‌سازی عددی از نشست‌های رمبشی پوسته بالادست در دوران آبیگری چشم‌پوشی شده است. نشست‌های رمبشی ناچیز می‌تواند ناشی از این باشد که مصالح سنگریزه‌ای و درشت‌دانه پوسته بالادست با تراکم و رطوبت مناسب اجرا شده‌اند. همچنین، با توجه به شکل (۲)، بخش عمده پوسته بالادست سد از مصالح درشت‌دانه رودخانه‌ای تشکیل شده است (3A) که به روش تراکم اصلاح شده متراکم شده‌اند. این مصالح دارای تجربه سیکل‌های متعدد خشک-اشباع در حین نهشته‌شدن هستند پس انتظار می‌رود که نشست‌های رمبشی بسیار پایینی داشته باشند.

### ۳-۵- نتایج عددی و مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده

پیش از این ذکر شد که تنها قرائت معتبر مربوط به تغییر شکل سد از صفحات مغناطیسی نصب شده در مقطع اصلی سد (مقطع F) بدست آمده است که در شروع اولین آبیگری برداشت شده است. در مقطع عرضی F مشابه مقطع H (شکل ۲) صفحات مغناطیسی در سه راستای قائم در فواصل: (۱) ۳۳ متری بالادست محور سد (SM-1)، (۲) روی محور SM-2 و (۳) در ۴۴ متری

شکل ۱۳. تنش کل حداقل (پاسکال) در وجه بالادست هسته سد در شروع آبیگری (نما از بالادست)

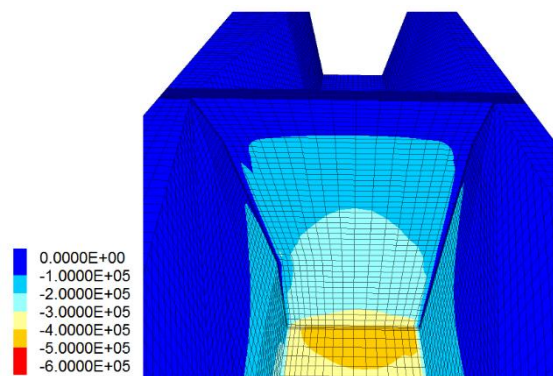


Fig. 13. The minimum total stress (Pa) in the upstream surface of the core during the first impounding (upstream face)

## ۶- احتمال وقوع شکست هیدرولیکی

مسئله شکست هیدرولیکی در هسته‌های خاکی سدهای خاکریزه‌ای از زمان شکست سد تن در ۵ ژوئن ۱۹۷۶ [22]، [31] به یکی از دغدغه‌های مهم ژئوتکنیکی در مورد ایمنی این گونه سدها تبدیل شد. مطالعات قبلی روش‌های متنوعی را برای تعیین فشار شکست هیدرولیکی  $P_f$  پیشنهاد می‌دهند. این روش‌ها به سه دسته قابل تقسیم هستند [32]: (۱) روش‌های تجربی مبتنی بر آزمایش‌های میدانی یا آزمایشگاهی (مانند، رابطه قنبری و راد [9]، جاوارسکی و همکاران [6] موری و تامورا [33])، (۲) روش‌های نظری همچون نظریه‌های توسعه حفره استوانه‌ای یا دایره‌ای در چارچوب مکانیک محیط‌های پیوسته الاستوپلاستیک یا الاستیک (همچون کمک‌پناه و یانگیساوا [34]) و (۳) مدل‌های مفهومی بر مبنای مدل‌های آزمایشگاهی و نظریات مکانیک شکست (همچون موردوج [35]).

از نظر میکروسکوپی، بر طبق مطالعات قبلی، در دسته‌های اول و دوم مد گسیختگی در شروع ترک هیدرولیکی یا کششی است یا برشی. گروهی از دیدگاه شروع ترک با مد گسیختگی کششی [36-43]، [6] و گروهی دیگر از دیدگاه شروع گسیختگی با مد برشی حمایت می‌کنند [33, 34, 44-46]. اما گروهی معتقدند مد گسیختگی وابسته به عواملی مانند، فشار محصورکننده، پلاستیسیته خاک، چسبندگی، محتوی رطوبت و

شکل ۱۰. مقادیر محاسبه‌شده و اندازه‌گیری شده تنش کل قائم در مقطع

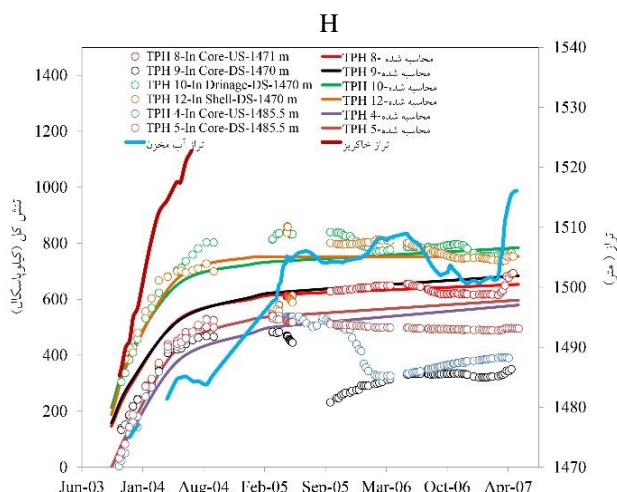


Fig. 10. The calculated and measured values of total vertical stress at section H

شکل ۱۱. تنش کل قائم (پاسکال) در وجه بالادست هسته سد در شروع آبیگری (نما از بالادست)

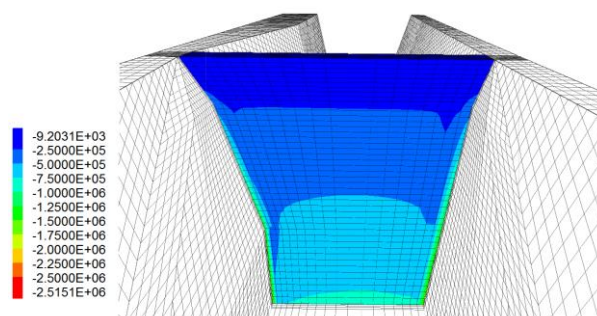


Fig. 11. The total vertical stress (Pa) in the upstream face of the core during the first impounding (upstream face)

شکل ۱۲. نسبت قوس‌زدگی در وجه بالادست هسته سد در شروع آبیگری سد

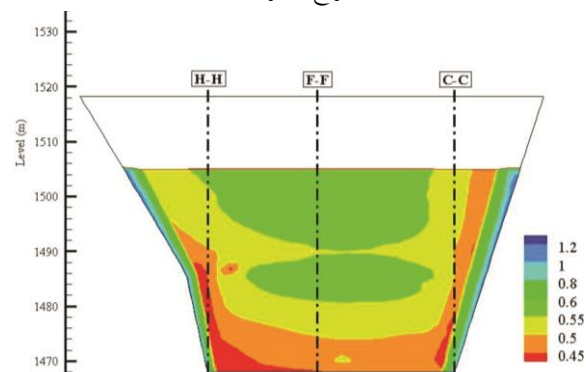


Fig. 12. The arching ratio of the upstream face of core during the first impounding



هیدرولیکی با سازوکار کششی در آن غیرمحمول باشد و نه آنچنان ترد و شکننده است که به آسانی ترک‌های هیدرولیکی فقط با سازوکار کششی پیش از ترک‌های هیدرولیکی با سازوکار برشی در آن به وقوع پیوندد. وجود ترک‌های هیدرولیکی با سازوکارهای ترکیبی برشی - کششی نیز در هسته این سد محتمل است.

با توجه به توضیحات فوق، برای ارزیابی احتمال وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در وجه بالادست هسته مایل سد بیدواز، فشار شکست هیدرولیکی با استفاده از: (۱) رابطه تجربی پیشنهادی به وسیله موری و تامورا [33] و رابطه نظری به وسیله کمک‌پناه و یانگیساوا [34] که بیشتر از دیدگاه پیدایش ترک هیدرولیکی با مد گسیختگی برشی حمایت می‌کنند، (۲) رابطه تجربی جاوارسکی و همکاران [6] که از دیدگاه پیدایش ترک هیدرولیکی با مکانیسم کششی حمایت می‌کند، (۳) رابطه پیشنهادی قنبری و راد [9] که البته به صراحت نوع مد گسیختگی مدنظرشان را مشخص نکرده‌اند، تعیین خواهد شد.

غیره می‌تواند کششی، برشی یا برشی-کششی باشد [49-47, 9]. از باب نمونه، مارچی و همکاران [49] با بررسی مقادیر نرمالیزه شده فشار شکست هیدرولیکی ( $\frac{P_f}{\sigma_0}$ ) در برابر شاخص روانی (LI) نمونه‌های آزمایش شده در پژوهش‌های پژوهشگران قبلی به این باور رسیدند که نوع مد گسیختگی بستگی به حالت خاک (در اینجا شاخص روانی) دارد. اگر خاک دارای شاخص روانی مثبت باشد، خاک خمیری است و وقوع مد گسیختگی برشی نسبت به مد کششی در آن محتمل‌تر است. اما مقدار منفی شاخص روانی نشان می‌دهد که خاک شبه‌جامد و شکننده است، به گونه‌ای که با افزایش فشار شکست هیدرولیکی مستعد ایجاد تغییرشکل‌های برگشت‌ناپذیر می‌باشد و این تغییرشکل‌ها به آسانی می‌توانند موجب ترک خوردن نمونه شوند. مقدار شاخص روانی (LI) متوسط مصالح هسته سد بیدواز نزدیک به صفر است ( $\pm 0.05$ ) است. این مقدار دلالت بر این دارد که حالت خاک هسته سد بیدواز تقریباً میانی است، یعنی نه آنچنان خمیری است که پیدایش ترک‌های

جدول ۲. روابط تعیین فشار شکست هیدرولیکی و پارامترهای نظیرشان برای هسته رسی سد بیدواز اسفراین

Reference	Equation	Parameters	Value for clay core
Mori and Tamura [33]	$p_f = \sigma_0 + q_u$	$\sigma_0$ : minimum total principal stress	Analysis
		$q_u$ : Undrained Unconfined Strength	290 kPa
Panah and Yanagisawa [34]	$p_f = (1 + \sin \varphi_u) \sigma_0 + C_u \cos \varphi_u$	$\sigma_0$ : minimum total principal stress	Analysis
		$C_u$ : Undrained cohesion	50 kPa
		$\varphi_u$ : Undrained friction angle	30
Jaworski et al. [6]	$p_f = m \sigma_h + \sigma_t$	$\sigma_h$ : Horizontal total stress	Analysis
		m: line slope	1.5
Ghanbari and Rad [9]	$p_f = m \sigma_0 + n$	$\sigma_t$ : Tensile strength	80 kPa
		$\sigma_0$ : minimum total principal stress	Analysis
		m	1.05
		n	30 kPa

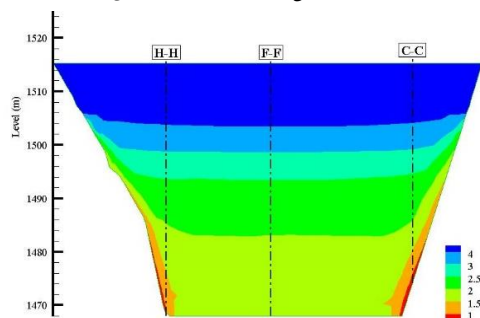
۱- پارامترهای مقاومتی مربوط به نمونه بازسازی شده در رطوبت برجا (شرایط غیراشباع) می‌باشند [25]

Table 2. The equations used for determining the hydraulic fracturing pressure and their parameters for clay core of Bidwaz dam

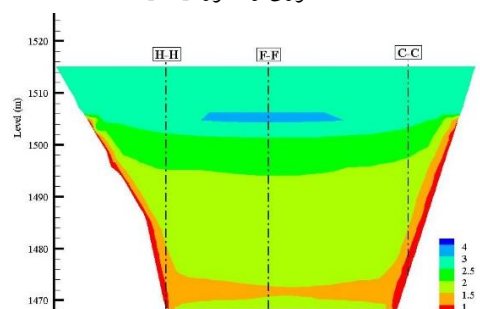
هیدرولیکی می تواند از علل اصلی شروع فرسایش داخلی در داخل هسته سد بیدواز باشد.

شکل ۱۴. ضریب اطمینان در برابر وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در وجه

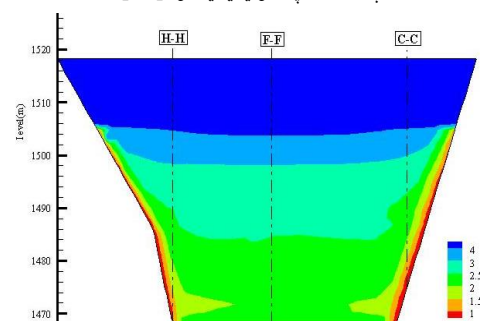
بالادست هسته مایل سد بیدواز در ۱ ژوئن ۲۰۰۷



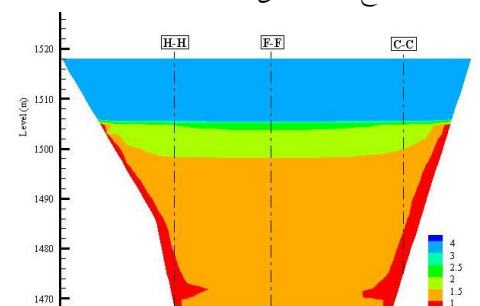
(الف) موری و تامورا [33]



(ب) کمک پناه و یانگیساوا [34]



(ج) جاوارسکی و همکاران [6]



(د) قنبری و راد [9]

Fig. 14. The factor of safety against hydraulic fracturing in the upstream face of the core of the Bidwaz dam (1 Jun 2007)

در جدول (۲) این روابط به همراه مقادیر پارامترهای آن‌ها برای هسته رسی سد بیدواز نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که پارامترهای مقاومتی هسته از آزمایش‌های برش مستقیم، تک‌محوری و تیر خمشی روی نمونه‌های بازسازی شده (با رطوبت برجا) بدست آمده از حفاری در هسته (که دارای شرایط غیراشباع است) تعیین شده است. در رابطه جاوارسکی و همکاران [6] پارامتر  $m$  شیب رابطه خطی بین فشار شکست هیدرولیکی و تنش افقی کل قبل از ایجاد ترک است. با توجه به اینکه در این رابطه، راستای تنش افقی کل عمود بر صفحه ترک فرض شده است بنابراین برای محاسبه فشار شکست هیدرولیکی در وجه بالادست هسته مایل سد بیدواز، تنش افقی کل  $\sigma_h$ ، با تنش کل اصلی حداقل  $\sigma_0$ ، جایگزین شده است. مقدار  $m$  از  $1/5$  تا  $1/8$  برای سیلت [6]،  $1$  تا  $2$  برای رس [50] و  $1/3$  تا  $1/6$  برای رس خاکستر آتشفشانی [39] تغییر می‌کند.

بحرانی‌ترین زمان برای ارزیابی احتمال وقوع پدیده شکست هیدرولیکی انتهای اولین آبدگیری است. یعنی زمانی که فشار آب به‌طور ناگهانی در رویه بالادست هسته افزایش می‌یابد [51]. در این مطالعه، همان‌طور که گفته شد، دوران آبدگیری سد تا رسیدن تراز آب مخزن به  $1516/9$  متر در تاریخ ۱ ژوئن ۲۰۰۷ شبیه‌سازی شده است. سپس احتمال وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در وجه بالادست هسته مایل سد در انتهای تحلیل ارزیابی شده است. برای این کار ابتدا فشار شکست هیدرولیکی  $P_f$  با کمک هریک از روابط پیشنهادی مذکور در وجه بالادست هسته (تا تراز  $1516$ ) تعیین شده است. ضریب اطمینان در برابر وقوع این پدیده یعنی نسبت فشار شکست هیدرولیکی  $P_f$  به فشار آب مخزن  $P_w$  تعیین شده است. در شکل (۱۴) الف تا د توزیع کنتوری ضریب اطمینان محاسبه شده در برابر وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در وجه بالادست هسته مایل سد بیدواز نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان سه مطلب زیر را فهمید:

(الف) در مجاورت دیواره‌های دره، ضریب اطمینان در برابر وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در رویه بالادست هسته مایل سد در کلیه روش‌ها کمتر از یک است. این شاهد، مؤید فرضیه اصلی این پژوهش است. به عبارت دیگر پدیده شکست

ب) کمترین وسعت ناحیه دارای ضریب اطمینان کمتر از یک (ناحیه بحرانی) به وسیله روش موری تامورا (شکل ۱۴ - الف) پیش‌بینی شده است، پژوهشگران دیگری نیز نشان دادند ابطه موری تامورا فشار مورد نیاز برای وقوع شکست هیدرولیکی را دست بالا پیش‌بینی می‌کند [52].

ج) بیشترین وسعت ناحیه بحرانی به وسیله رابطه قنبری و راد (شکل ۱۴ - د) پیش‌بینی می‌شود. مصالح آزمایش‌شده در مطالعه ایشان [9] دارای خاصیت خمیری کمتر و در نتیجه قابلیت شکنندگی بیشتری نسبت به مصالح هسته سد بیدواز هستند. همین امر سبب شده است رابطه قنبری راد برآوردی دست پایین از فشار شکست هیدرولیکی در رویه بالادست هسته سد بیدواز به عمل آورد.

در انتها، باید گفته شود که هرچند با پیش‌بینی‌های فوق پتانسیل ایجاد ترک‌های هیدرولیکی در هسته سد هم در مجاورت دیواره جناح راست و هم دیواره جناح راست وجود دارد؛ اما می‌دانیم که صرف پیدایش ترک‌های هیدرولیکی نمی‌تواند تضمین‌کننده وقوع حتمی فرسایش داخلی باشند، زیرا همان‌گونه که فل و همکاران متذکر شدند [4] وقوع فرسایش داخلی علاوه بر علل شروع فرسایش نیازمند وجود علل ادامه و توسعه فرسایش داخلی نیز می‌باشد، بنابراین به نظر می‌رسد علت اینکه فرسایش داخلی در هسته سد در مجاورت جناح چپ به وقوع پیوسته است به این برمی‌گردد که احتمالاً در این نواحی علل ادامه و توسعه مؤثری وجود دارند. مطالعات رفتارنگاری سد بیدواز در بخش ۴ مقاله نشان داد که تراز پیزومتریک فشار آب حفره‌ای ثبت‌شده در پی و پایین دست پرده آب‌بند یا دیوار آب‌بند در کلیه مقاطع ابزارگذاری حتی در مقطع H تأثیر قابل ملاحظه‌ای از تراز آب مخزن نمی‌پذیرند. تراز پیزومتریک در پیزومترهای نصب‌شده در فیلتر و پوسته پایین‌دست تأثیر قابل توجهی از تراز آب مخزن نمی‌پذیرند (شکل ۳). در نتیجه، احتمالاً علل ادامه و توسعه فرسایش داخلی در پی آبرفتی و فیلترها وجود نداشته باشد. آهکی بودن توده سنگی محاط‌کننده سد و امکان تشکیل حفرات انحلالی (کارستی) در آن و همچنین وجود نواحی گسلی بیشتر و در نتیجه خردشدگی بالاتر توده سنگی جناح چپ نسبت به

جناح راست موجب تقویت این فرضیه می‌شود که ذرات هسته در اثر فشار آب با سازوکار نشت متمرکز یا عقب‌رونده به داخل توده سنگی تکیه‌گاه چپ فرسایش یافته‌اند. با این حال، اظهارنظر قطعی در خصوص این مطلب نیازمند پژوهش‌های میدانی و آزمایشگاهی جامعی است، بدیهی است پیشنهاد هرگونه راه‌کار علاج بخشی برای این سد، نیازمند شناسایی علل ادامه و توسعه فرسایش است.

## ۶- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱- بررسی تغییرات داده‌های بدست‌آمده از ابزارهای نصب‌شده در بدنه و پی سد (به‌ویژه هم‌تراز شدن تراز پیزومتریک پیزومترهای نصب‌شده در هسته با آب مخزن در مقطع عرضی H مجاور به دیواره‌های دره) تأیید کردند که در بخش‌هایی از هسته در ترازهای تحتانی سد که مجاور به تکیه‌گاه جناح چپ هستند، فرسایش داخلی رخ داده است.

۲- شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی رفتار سد در دوران ساخت و آنگیری نشان داد که تأثیر شکل دره و اختلاف خواص تراکم-پذیری مصالح هسته و فیلتر (یا پوسته) سبب افزایش انتقال تنش از هسته و کاهش تنش اصلی حداقل در آن به‌ویژه در مجاورت دیواره‌های دره شده است.

۳- ارزیابی‌های انجام‌شده برای شناسایی مد گسیختگی ترک هیدرولیکی در هسته سد بیدواز بر اساس شاخص روانی نشان می‌دهد خاک هسته سد نه آن‌چنان خمیری است که پیدایش ترک‌های هیدرولیکی با سازوکار کششی در آن غیرمحتمل باشد و نه آن‌چنان ترد و شکننده است که به‌آسانی ترک‌های هیدرولیکی فقط با سازوکار کششی پیش از ترک‌های هیدرولیکی با سازوکار برشی در آن به وقوع پیوندد. وجود ترک‌های هیدرولیکی با سازوکارهای ترکیبی برشی-کششی نیز در هسته محتمل است.

۴- توزیع کنتوری کمیت ضریب اطمینان در برابر وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در وجه بالادست هسته‌ی مایل سد (با استفاده از روابط تجربی و نظری) نشان داد که در ترازهای تحتانی هسته - به‌ویژه در مجاورت دیواره‌های دره احتمال

the performance of high rockfill dams". Canadian Geotechnical Journal, 34(4), 1997, pp.489-497.

[14] Kulhawy, F.H., and Gurtowski, T.M., "Load transfer and hydraulic fracturing in zoned dams". Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT9),1976, pp.963-974.

[15]Nayebzadeh,R. and Mohammadi,M.,"The Effect of Impervious Clay Core Shape on the Stability of Embankment Dams", Geotech. Geol. Eng., 29(4),2011, pp.627-635.

[16] Loftquis, B.,"Earth pressure in a thin impervious core". Transaction 4th International Congress on Large Dams. NewDelhi.1,1951, pp, 99- 109.

[17] Kjærnsli, B., and Torblaa, I.,"Leakage through horizontal cracks in the core of Hyttejuvet Dam", Norwegian Geotechnical Institute, Publication 80, 1968,pp.39-47.

[18]Ng, A. K. L. & Small, J. C., "A case study of hydraulic fracturing using finiteelement methods". Canadian Geotechnical Journal,36(5),1999,pp.861-875.

[19] Vaughan, P.R., Kluth, D.J., Leonard, M.W., and Pradoura, H.H.M., "Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repairs" ,In Transactions of the 10th International Congress on Large Dams, Montréal, 1, 1970,pp. 73-93.

[20] Sherard, J. L.,Embankment Dam Cracking. In Embankment Dam Engineering-The Casagrande Volume. New York. John Wiley & Sons, 1973.

[21] Vestad, H.,"Viddalsvatn Dam, a history of leakages and investigations", In Transactions of the 12th International Congress on Large Dams, Mexico City, Vol. 2,1976, pp. 369-390.

[22]Seed, H.B., Leps, T.M., Duncan, J.M., and Bieber, R.E. 1976. "Hydraulic fracturing and its possible role in the Teton Dam failure".Report to U.S. Department of the Interior and State of Idaho on Failure of Teton Dam by Independent Panel, U.S. GovernmentPrinting Office, Washington, D.C., Appendix D.

[23]Itasca Consulting Group, Inc. FLAC3D, 2012. User's manuals Minneapolis, Minnesota.

[24] Khorasan Regional Water Authority, Borrowing sources for dam and buildings construction, designing stage of Bidwaz dam, technical report, Appendix No. 5, November, 1997. (In Persian)

[25] Ekramifard, A., "*Study of internal erosion and hydraulic fracturing in earth and rockfill dam- case study: Bidwaz dam*". M.S. theses, Ferdowsi University of Mashhad, Department of Civil Engineering, Geotechnical, 2016. (In Persian)

[26] Khorasan Regional Water Authority, Alluvial foundation, designing stage of Bidwaz dam, technical report, Appendix No. 6, December, 1999. (In Persian)

[27] Khorasan Regional Water Authority, geology and geological engineering, designing stage of Bidwaz dam, technical report, Appendix No. 3, December, 1999. (In Persian)

[28]Hazen, A., Physical properties of sands and gravels with reference to their use in filtration, Report of the Massachusetts State Board of Health,1982.

وقوع پدیده‌ی شکست هیدرولیکی وجود دارد. پس این پدیده می‌تواند یکی از علل شروع فرسایش داخلی به وقوع پیوسته در ترازهای تحتانی هسته‌ی سد مجاور به دیواره‌ی جناح چپ دره باشد.

## References

## ۷- مراجع

[1] International Commission on Large Dams (ICOLD). Deterioration of Dams and Reservoirs: Examples and Their Analysis. Paris: International Commission on Large Dams, 1984.

[2] International Commission on Large Dams (ICOLD). Dam Failures Statistical Analysis, Bulletin 99. Paris: International Commission on Large Dams. ICOLD,1995.

[3] Foster, M., Fell, R. & Spannagle, M. (2000),"The statistics of embankment damfailures and accidents". Canadian Geotechnical Journal, 37(5), 2000, pp.1000-1024.

[4] Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D. & Bell, G., Geotechnical engineering of dams. Balkema, Leiden, ISBN 041536440x, 2005.

[5] Sherard, J. "Hydraulic Fracturing in Embankment Dams", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. 112(10),1986 , pp. 905-927.

[6]Jaworski, G. W., Duncan, J. M. and Seed, H. B., "Laboratory study of Hydraulic fracturing", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT6),1981, pp.713-732.

[7]Chang,M., Huang ,R.C. ,"Observations of hydraulic fracturing in soils through field testing and numerical simulations",Canadian Geotechnical Journal, 53(2), , 2016, pp.343-359.

[8] Xu, T. , Ranjith, P.G., Au,A.S.K., Wasantha , P.L.P. , Yang ,T.H. ,Tang, C.A. , Liu ,H.L. ,Chen, C.F. , "Numerical and experimental investigation of hydraulic fracturing in Kaolin clay", Journal of Petroleum Science and Engineering, 134, 2015, pp. 223-236.

[9]Ghanbari,A. and Rad,S.S., "Development of an empirical criterion for predicting the hydraulic fracturing in the core of earth dams", Acta Geotechnica,10(2),2015, pp.243-254.

[10] Tavakoli, A. "Investigation of stress transferring phenomena in clay core of earth dams constructed in narrow valley". M.S. theses, Civil Engineering, Geotechnical, Technical Faculty of Tehran University, 1997. (In Persian)

[11] Lefebvre, Duncan and Wilson(1973), "Three dimensional finite element analyses of dams", Journal of soil mech. and found. Div. ASCE , 99(7), 1973, pp. 495-507.

[12]Singh, R. P., Singh Bharat and Saini, S. S.,"Three-Dimensional Analysis of Embankment Dams: Effect of Valley Shape", Indian Geotechnical Journal, 20(2),1990,pp.77-100.

[13]Zhang, L. and Du, J.,"Effects of abutment slopes on

- [41] Andersen, K. H., Rawlings, C. G., Lunne, T. A., and By, T. H., "Estimation of hydraulic fracture pressure in clay", *Can. Geotech. J.*, 1994, 31(6), pp.817–828.
- [42] Medeiros, C. H., and Moffat, A. I. B., "A hydraulic fracturing test based on radial seepage in the Rowe consolidation cell", *Proc., Int. Conf. on Advances in Site Investigation Practice*, Thomas Telford, London, 1996, pp. 828–839.
- [43] Mitchell, J. K., and Soga, K., *Fundamentals of soil behavior*, 3rd Ed., Wiley, London, 2005.
- [44] Yanagisawa, E., and Panah, A. K., "Two dimensional study of hydraulic fracturing criteria in cohesive soil", *Soils Found.*, 34(1), 1994, pp.1–9.
- [45] Atkinson, J. H., Charles, J. A., and Mhach, H. K., "Undrained hydraulic fracture in cavity expansion tests", *Proc., 13th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, Oxford & IBH, New Delhi, India, 1994, pp.1009–1012.
- [46] Zervos, A., Papanastasiou, P., and Vardoulakis, I., "Shear localization in thick-walled cylinders under internal pressure based on gradient elastoplasticity", *J. Theor. Appl. Mech.*, 38(1–2), 2008, pp.81–100.
- [47] Vallejo, L. E., "Shear stresses and the hydraulic fracturing of earth dam soils". *Soils and Foundations*, 33(3), 1993, pp.14–27.
- [48] Djarwadi, D., Suryolelono, K.B., Suhendro, B., and Hardiyatmo, H.C., "Failure Criterion of Soils during Hydraulic Fracturing Test". *Proceedings 1st International Conference on Sustainable Infrastructure and Build Environment in Developing Country*. Bandung 2-3, 2009. pp.G.30-G.35
- [49] Marchi, M.; Gottardi, G. and Soga, K., "Fracturing Pressure in Clay", *Journal of Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE*, 4(12), 2014, 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001019.
- [50] Vaughan, P. R. (1971). "The use of hydraulic fracturing tests to detect crack formation in embankment dam cores", *Interim Rep., Dept. of Civil Engineering*, Imperial College, London.
- [51] Wang, J.-J., *Hydraulic fracturing in earth-rock fill dams*. John Wiley & Sons, 2014.
- [52] Khamesi, O., and Mirghasemi, A.A., "Investigation on Hydraulic Fracturing in Embankment Dams". *Journal of civil and surveying engineering*, 44(2), 2010, pp. 181-191. (In Persian)
- [29] Biot, M.A. "General theory of three dimensional consolidation". *Journal of Applied Physics*, 12, 1941, 155–164.
- [30] Nobari, E. and J.M. Duncan, *Effect of Reservoir Filling on Stresses and Movement in Earth and Rockfill Dams*. A Report of an Investigation. 1972, DTIC Document.
- [31] U. S. Department of the Interior Teton Dam Failure Review Group (USDITDFRG). *Failure of Teton Dam: A Report of Findings*. Washington, D. C.: U. S. Department of the Interior Teton Dam Failure Review Group, 1977.
- [32] Wang, J. J., and Zhu, J. G., "Review on computing theories of hydraulic fracturing in soil". *Proceedings of the 2nd National Symposium on Geotechnical Engineering of China*, 2, 2006, 231-237. Wuhan: Science Press. (in Chinese)
- [33] Mori, A., and Tamura, M., "Hydrofracturing pressure of cohesive soils", *Soils Found.*, 27(1), (1987), pp.14–22.
- [34] Panah, A. K., and Yanagisawa, E., "Laboratory studies on hydraulic fracturing criteria in soil". *Soils Found.*, 29(4), 1989, pp. 14–22.
- [35] Murdoch, L.C., "Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments, Part 1 Methods and observations", *Geotechnique*, 43 (2), 1993, pp. 255–266
- [36] Bjerrum, L., Nash, J. K. T. L., Kennard, R. M., and Gibson, G. E., "Hydraulic fracturing in field permeability testing", *Geotechnique*, 22(2), 1972, pp.319–332.
- [37] Nobari, E., K.L. Lee, and J.M. Duncan, *Hydraulic Fracturing in Zoned Earth and Rockfill Dams: A Report of an Investigation*. 1973, DTIC Document.
- [38] Decker, R. A., and Clemence, S. P., "Laboratory study of hydraulic fracturing in clay", *Proc., 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 1981, pp.573–575, Balkema, Rotterdam, Netherlands,
- [39] Fukushima, S., "Hydraulic fracturing criterion in the core of fill dam", *Report of Fujita Kogyo Technical Institute*, 22, 1986, pp.131-136.
- [40] Lo, K. Y., and Kaniaru, K., "Hydraulic fracture in earth and rock fill dams", *Can. Geotech. J.*, 27(4), 1990, pp. 496–506.

# Occurrence of Hydraulic Fracturing in Inclined Clay Core of a High Rockfill Dam, Located in a Narrow Valley

M. Salari, A. Akhtarpour<sup>2\*</sup>, A. Ekrami Fard<sup>3</sup>

1- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2- Assistant Professor, Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3- Student of M.Sc. of Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

\*Aktarpour@um.ac.ir

## Abstract:

From a statistical perspective, internal erosion and piping are among the main causes of failure in earth-rockfill dams. If these dams are located in a narrow valley, the steep slopes of the valley walls can cause increase in stress transfer in the core. Therefore, the occurrence of hydraulic fracturing phenomenon in this kind of dams is more probable. Bidvaz dam is an earth-rockfill dam with a thin inclined clay core. The dam is located in the Northeast of Iran, at a distance of twenty kilometers from the Esfayen city. It has a height of 66 meters from the foundation and is constructed in a narrow valley with the width of 40 meters on river bed, and a wall slope of more than 60 degrees relative to horizontal direction. After about seven and a half years from the beginning of the first filling, a subsidence was observed at the upstream slope surface of this dam. The initial assessments, based on the data recorded in instruments which were installed inside the body and dam foundation, show at the lower level of the core and adjacent to left abutment, pore water pressure has gradually been increasing and has finally reached to the reservoir water pressure. At the same time, effective stress reduced to zero, with an abnormal rate. These observations confirm the occurrence of internal erosion in the lower levels of the core adjacent to the left abutment. Due to the steep valley walls and noticeable difference of compressibility properties between the core and shell materials, the occurrence of significant stress transfer in the core is expected, especially adjacent to the valley walls. Therefore, the hydraulic fracturing can be considered as a main cause initiating the process of internal erosion in this dam. The main objective of this paper is to assess the validity of this hypothesis. To achieve this goal, a three-dimensional numerical model was used to simulate the behavior of the dam during construction and reservoir filling. This model has improved in the environment of a finite difference software, called FLAC3D. In the formulation of numerical model, the flow and mechanical equations have been solved simultaneously. The 3D model has been calibrated based on the recorded data from the instruments. Using a number valid suggested theoretical and empirical relationships, hydraulic fracturing potential have been calculated and the contour distribution of fracturing pressure at upstream side of the core has been presented. Also, the contour distributions safety factor against the occurrence of hydraulic fracturing phenomenon were determined for all of the suggested relationships, at the upstream side of the core. The findings show that, as expected, the steep slopes of valley walls and the difference of the compressibility properties of the core and the shell materials caused significant stress transfer at lower parts of the core and adjacent to the valley walls. Moreover, the values of safety factors against the occurrence of hydraulic fracturing phenomenon in upstream side of the core are less than unity near the walls. So, the hydraulic fracturing phenomenon is one of the main causes initiating the process of internal erosion in the core.

**Keywords:** Embankment dams, Internal erosion, Arching, Hydraulic fracturing