

## بررسی شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی

سید امید خامسی<sup>۱</sup> و علی اصغر میرقاسمی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۶/۱۱/۱۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱۱/۱۶، تاریخ تصویب ۸۸/۱۲/۸)

### چکیده

یکی از مهم‌ترین خطرهایی که سدهای خاکی را تهدید می‌کند، شکست هیدرولیکی است. این پدیده اغلب در زمان اولین آبیگری سد، زمانی که فشار آب به طور ناگهانی در هسته افزایش می‌یابد، رخ می‌دهد. برای مطالعه ترک هیدرولیکی در هسته سد راه‌های مختلفی وجود دارد. در این مقاله سد هیته جووت<sup>۱</sup> در کشور نروژ که در اثر شکست هیدرولیکی آسیب دیده است، برای بررسی میزان کارآمدی روش‌های تعیین وقوع ترک هیدرولیکی انتخاب شده است. به این منظور با استفاده از روش اجزای محدود رفتار سد در زمان ساخت و اولین آبیگری مدلسازی شده است. سپس ترک‌خوردگی هیدرولیکی هسته این سد با استفاده از چند روش بررسی شده است. در مرحله بعد با استفاده از روابطی که پیش‌بینی درستی از ترک‌خوردگی سد هیته جووت ارائه کرده‌اند، شکست هیدرولیکی در هسته سد گلابر در استان زنجان مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این کار تحلیل کوپل<sup>۲</sup> تنش- فشار آب حفراهی برای سد انجام شده است. در نتیجه این ارزیابی‌ها مشخص شد روابط کمک پناه و قنبری پیش‌بینی درستی از ترک‌خوردگی هسته سد هیته جووت ارائه می‌کنند. همچنین وقوع شکست هیدرولیکی در سد گلابر غیر محتمل تشخیص داده شد.

**واژه‌های کلیدی:** ترک هیدرولیکی، شکست هیدرولیکی، اجزای محدود، سد خاکی، سد گلابر، قوس زدگی

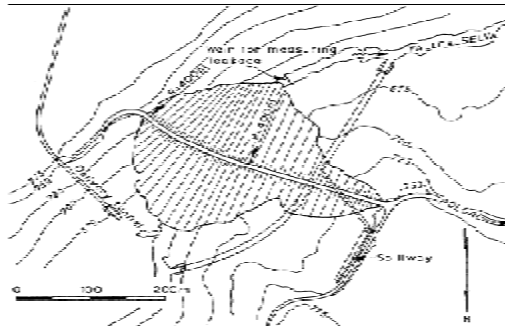
### مقدمه

قنبری، جاورسکی<sup>۳</sup>، فوکوشیما<sup>۴</sup> و موری<sup>۵</sup> اشاره کرد. گروه دوم روابطی تئوریک هستند که بر اساس مدل‌های پیشنهاد شده در نظریه خمیری توسعه یافته‌اند. این روابط مانند روابط گروه اول، فشار آب بحرانی را ارائه می‌کنند. روابط کمک پناه و لو<sup>۶</sup> در این دسته قرار می‌گیرند. دسته سوم استفاده از مکانیک شکست است که موضوع بحث ما در این مقاله نیست.

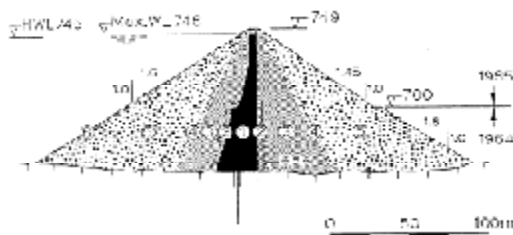
در این مقاله، تحلیلی عددی با استفاده از روش اجزای محدود به وسیله نرم‌افزار اباکوس<sup>۸</sup> برای سدهای هیته جووت در کشور نروژ و گلابر در استان زنجان انجام شده است. تحلیل کوپل انجام‌شده، رفتار سدها را طی دوران ساخت و اولین آبیگری مخزن مدل می‌کند. از آنجا که سد هیته جووت دچار شکست هیدرولیکی شده است، میزان کارایی شیوه‌های مختلفی که برای پیش‌بینی وقوع ترک‌خوردگی هیدرولیکی وجود دارند را می‌توان از راه بررسی شکست هیدرولیکی با استفاده از این شیوه‌ها برای هسته این سد، محک زد. در گام بعدی برای سد گلابر ابتدا با استفاده از اطلاعات ابزار دقیق طی دوران ساختمان، تحلیل‌های برگشتی انجام می‌شود تا عوامل واقعی مصالح سد به دست آیند. پس از آن توزیع تنش و

شکست هیدرولیکی می‌تواند در هسته ریزدانه سدهای خاکی اتفاق بیافتد. این پدیده اغلب در زمان اولین آبیگری سد وقتی که فشار آب به طور ناگهانی در هسته افزایش می‌یابد، رخ می‌دهد. کاهش تنش موثر قائم در هسته سد تسهیل‌کننده وقوع این پدیده است، بنابراین یکی از مهم‌ترین عواملی که خطر وقوع ترک هیدرولیکی در هسته را افزایش می‌دهد، قوس زدگی<sup>۳</sup> است. در سدهای خاکی اغلب مصالح هسته نسبت به مصالح پوسته سختی کمتری دارند و در نتیجه نشست مصالح هسته نسبت به پوسته بیشتر است. این موضوع سبب می‌شود بخشی از تنش هسته به پوسته منتقل شود و در نتیجه سطح تنش در هسته کاهش یابد. این پدیده قوس‌زدگی نامیده می‌شود. برای پیش‌بینی وقوع ترک هیدرولیکی در هسته سد، چندین روش مختلف وجود دارد که می‌توان آنها را در سه گروه کلی تقسیم‌بندی کرد. دسته اول استفاده از روابط تجربی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی یا میدانی است. این روابط، فشار آب ایجادکننده ترک را بر حسب سطح تنش در خاک ارائه می‌کنند. با مقایسه این فشار با فشار آب در المان‌های بالادست هسته، می‌توان وقوع شکست را تحقیق کرد. از این دسته می‌توان به روابط

سد ناشی از وقوع گسیختگی هیدرولیکی در هسته این سد بوده که به دلیل کاهش عرض ناگهانی دچار قوس زدگی شدید شده است. پس از وقوع این نشت شدید، تراز آب مخزن پایین آورده شد. وقتی تراز آب مخزن تا حدود ۷۱۷ متر رسید، میزان نشت دوباره به ۱ الی ۲ لیتر بر ثانیه کاهش یافت. شکل (۳) میزان نشت و تراز آب در مخزن را به شکل تابعی از زمان نشان می‌دهد.

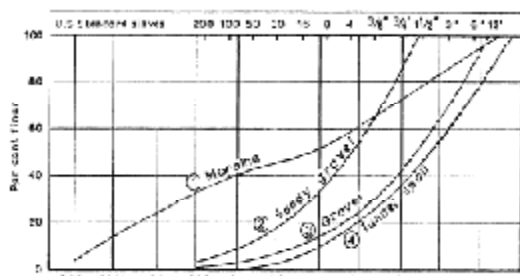


الف



ب

شکل ۱: الف) پلان سد هیته جوت ب) بزرگ‌ترین مقطع سد هیته جوت [۱].



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی مصالح تشکیل‌دهنده سد [۱].

## مدل‌سازی سد هیته جوت با استفاده از روش اجزای محدود

مدل‌سازی این سد به شکل دوبعدی و در شرایط کرنش مسطح انجام شده است. از بزرگ‌ترین مقطع سد هیته جوت برای این مدل‌سازی استفاده شده است. شکل (۴) شبکه اجزای محدود که برای تحلیل استفاده

فشار آب حفره‌ای در سد محاسبه می‌شود و بدین ترتیب امکان بررسی وقوع قوس‌زدگی و به دنبال آن وقوع ترک هیدرولیکی در هسته سد فراهم می‌شود. سپس با بهره‌گیری از شیوه‌هایی که ترک‌خوردگی در سد هیته جوت را پیش‌بینی کرده‌اند، پتانسیل وقوع شکست هیدرولیکی در سد گلابر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## معرفی سد هیته جوت

سد هیته جوت سدی سنگریزه‌ای به ارتفاع ۹۳ متر و طول تاج ۴۰۰ متر است که به عنوان بخشی از یک پروژه نیروگاهی در کشور نروژ ساخته شده است. حجم مخزن این سد ۲۹۰ میلیون متر مکعب است. احداث آن در ماه نوامبر سال ۱۹۶۵ به پایان رسید. شکل (۱) پلان و بزرگ‌ترین مقطع این سد را نشان می‌دهد. پوسته سد از شن و سنگریزه تشکیل شده است و بین آنها ناحیه انتقالی از جنس نخاله‌های حاصل از حفاری تونل<sup>۹</sup> قرار گرفته است. جنس هسته از مصالح یخ‌رفت<sup>۱۰</sup> است. شکل (۲) منحنی دانه‌بندی مصالح تشکیل‌دهنده سد را نشان می‌دهد.

آبگیری مخزن سد در ماه مه سال ۱۹۶۶ آغاز شد و بعد از ۵ ماه سطح آب به بالاترین تراز خود رسید. طی سال ۱۹۶۴ ساخت سد تا تراز ۱ که در شکل (۱) نشان داده شده است، انجام شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، عرض هسته پس از نخستین دوره ساخت به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. به طوری که که بین تراز ۶۹۶ تا ۷۰۰ متر عرض هسته از ۱۵/۵ به حدود ۱۰ متر کاهش یافته و پس از آن در تراز ۷۲۹ متر به حدود ۴ متر رسید. این تغییر در طراحی اولیه، به این دلیل بود که فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده در هسته، بسیار بالاتر از حد انتظار بود. بنابراین عرض هسته کاهش یافت تا امکان زهکشی و در نتیجه زایل شدن سریع‌تر فشار آب حفره‌ای اضافه فراهم شود [۱].

هنگام آبگیری تا زمانی که تراز آب در مخزن به میزان حدود هفت متر پایین‌تر از بالاترین تراز پیش‌بینی شده رسید، میزان نشت به مقدار ناچیزی حدود ۱ الی ۲ لیتر بر ثانیه بود، اما وقتی که تراز آب به بالاتر از این مقدار افزایش یافت، افزایش چشمگیری در میزان نشت مشاهده شد. محققان به این نتیجه رسیدند که نشت بالا در این

شده را نشان می‌دهد.

پوسته کاملاً زهکشی شده در نظر گرفته شده و فشار آب حفره ای در گره های این ناحیه صفر (شرایط زهکشی آزاد) تعیین می‌شود.

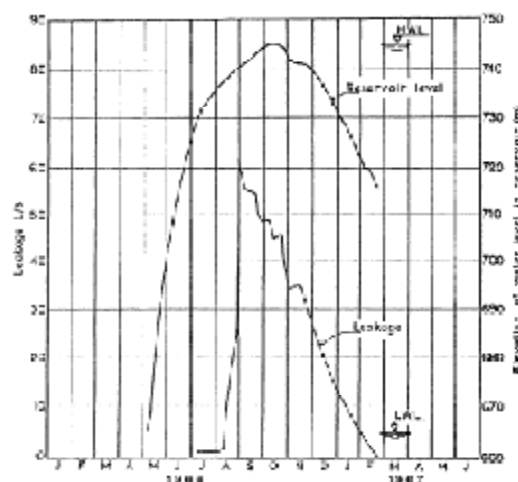
برای مدلسازی ساخت مرحله‌ای سد، چنین فرض می‌شود که ساخت سد در ۱۴ لایه انجام شده است. در مدل اجزای محدود هر لایه با یک ردیف المان مدل شده است. مدت زمان ساخت هر لایه با استفاده از اطلاعات شکل (۵) تخمین زده شد. مطابق این اطلاعات، ساخت سد پس از حدود ۵۲۰ روز به پایان رسید. این سد ۱۷۷ روز پس از پایان ساخت آبیگری شد. زمان آبیگری حدود ۱۳۷ روز در نظر گرفته شد. سرعت آبیگری را می‌توان از روی شکل (۳) تخمین زد.

جدول ۱: مشخصات مصالح سد هیته جوت.

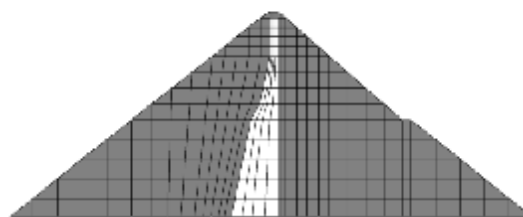
Core (Moraine)	
Unit weight, $\gamma$ , .....	22.66 kN/m <sup>3</sup>
Permeability, $K_x, K_y$ , .....	7E-10 m/s
Young's modulus, E, .....	10E3 Kpa
Cohesion, C', .....	10 Kpa
Undrained Cohesion, $C_u$ , .....	60 Kpa
Angle of internal friction, $\phi'$ , .....	37.6°
Undrained Angle of friction, $\phi_u$ , .....	0°
Plasticity index, PI, .....	6%
Degree of saturation (compacted soil), $S_r$ , .....	90%
Initial Void ratio, $e_0$ , .....	26%
Poison's ratio, $\nu$ , .....	0.3
Shoulders (Rock fill)	
Unit weight, $\gamma$ , .....	22 kN/m <sup>3</sup>
Permeability, $K_x, K_y$ , .....	2.25E-2 m/s
Young's modulus, E, .....	50E3 Kpa
Degree of saturation (compacted soil), $S_r$ , .....	10%
Initial Void ratio, $e_0$ , .....	49%
Poison's ratio, $\nu$ , .....	0.3

### مقایسه مقادیر محاسبه شده از تحلیل برای فشار آب حفره ای با نتایج ابزار

شکل (۶) توزیع فشار آب حفره‌ای را در مقطع مورد



شکل ۳: تغییرات میزان نشت و تراز آب با زمان [۱].

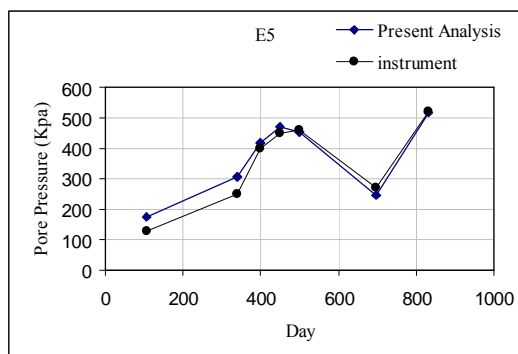


شکل ۴: شبکه اجزا محدود سد هیته جوت.

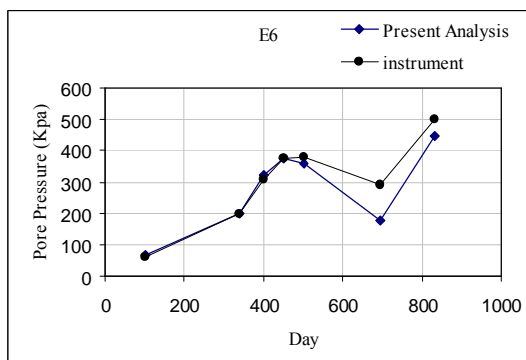
تحلیل انجام شده برای این سد، تحلیل کوپل تغییرشکل - فشار آب حفره‌ای است و بنابراین تحلیل در محیط تنش موثر انجام گرفته است. از آنجا که اطلاعات جامعی درباره مصالح تشکیل دهنده پوسته سد در دست نبود، به جهت سادگی پوسته سد همگن در نظر گرفته شد. همچنین پی این سد نیز به دلیل نبود اطلاعات کافی به صورت تغییر شکل ناپذیر در نظر گرفته شده و درجات آزادی گره‌های مرز پایینی مدل در راستاهای افقی و عمودی بسته شده اند. بنابراین اجزای اصلی که برای این سد مدل شده اند پوسته و هسته است. پوسته سد به صورت الاستیک مدل شده و هسته رسی سد با استفاده از مدل رفتاری مور-کولمب، به صورت الاستیک - پلاستیک کامل مدل گردیده است. جدول (۱) مشخصات مصالح سد که تحلیل بر مبنای آنها انجام شده را نشان می‌دهد.

تحلیل سد هیته جوت در دو بخش پایان ساخت و اولین آبیگری انجام می‌شود. به دلیل نفوذپذیری بالای مصالح پوسته چنین فرض شد که در زمان ساخت فشار آب حفره ای در پوسته ایجاد نخواهد شد لذا مرز پایینی

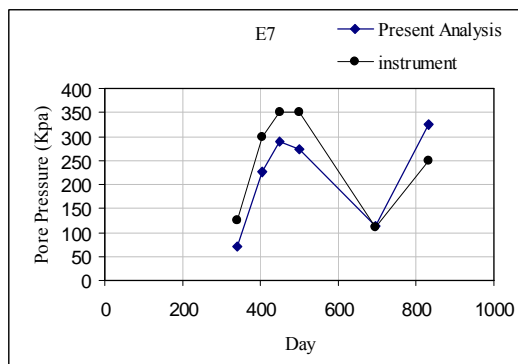
بنابراین برای کنترل درستی تحلیل‌های انجام‌شده مقایسه‌ای بین مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده برای فشار آب حفره‌ای در هسته سد انجام شده است. شکل (۷) مقطع ابزارگذاری شده هسته را نشان می‌دهد. فشار آب حفره‌ای در پنج تراز در هسته اندازه‌گیری می‌شود. شکل‌های (۸) تا (۱۲) مقایسه این مقادیر اندازه‌گیری شده را با مقادیر محاسباتی نشان می‌دهند.



شکل ۸: مقایسه بین فشار آب حفره‌ای محاسباتی و اندازه‌گیری شده در پیزومتر E5.

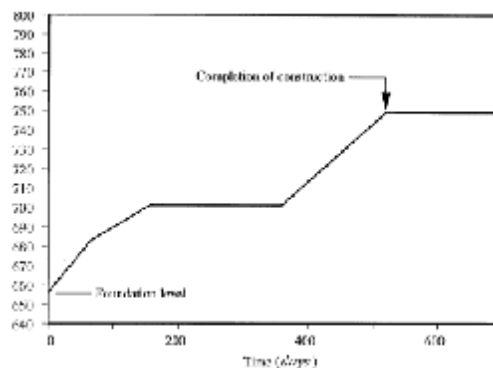


شکل ۹: مقایسه بین فشار آب حفره‌ای محاسباتی و اندازه‌گیری شده در پیزومتر E6.

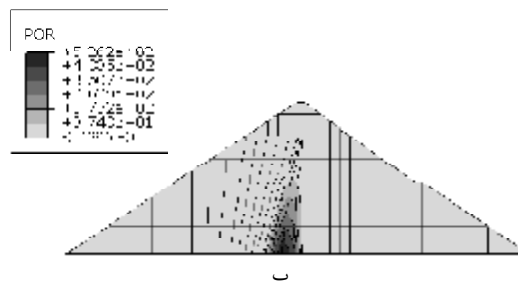
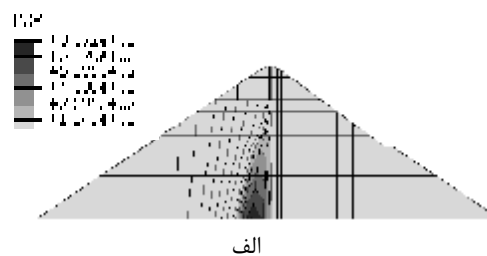


شکل ۱۰: مقایسه بین فشار آب حفره‌ای محاسباتی و اندازه‌گیری شده در پیزومتر E7.

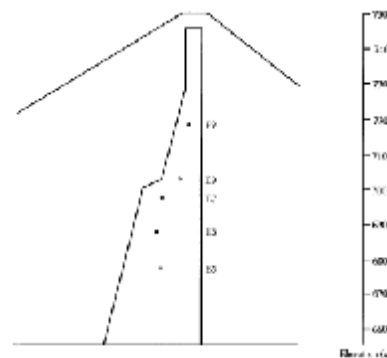
مطالعه سد در زمان‌های پایان ساخت و پیش از آغاز آبیگری (۱۷۷ روز پس از پایان ساخت) نشان می‌دهد.



شکل ۵: تغییر ارتفاع سد هیته جوت در برابر زمان [۱].



شکل ۶: الف) توزیع فشار آب حفره‌ای در پایان ساخت ب) توزیع فشار آب حفره‌ای در آستانه آبیگری.



شکل ۷: موقعیت قرارگیری پیزومترها در هسته سد [۱]

با توجه به اینکه در هسته این سد پیزومترهایی برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای کار گذاشته شده است،

چند شیوه به ارزیابی وقوع شکست هیدرولیکی در هسته سد می‌پردازیم.

روابط نظری و تجربی گوناگونی از سوی محققان مختلف برای بررسی گسیختگی هیدرولیکی ارائه شده‌اند. این روابط فشار آبی که می‌تواند ایجادکننده ترک باشد را بر حسب سطح تنش در توده خاک و عوامل مقاومت برشی خاک یا عوامل به دست آمده از آزمایش‌های تجربی ارائه می‌کنند. با مقایسه فشار آب در هر المان با مقادیر ارائه‌شده توسط این روابط می‌توان خطر وقوع ترک را برآورد کرد. جدول (۲) تعدادی از این روابط را نشان می‌دهد.

در این جدول روابط جاورسکی و همکاران [۲]، موری و تامورا [۳]، فوکوشیما [۴] و قنبری [۵] روابطی تجربی هستند و بر اساس مطالعات آزمایشگاهی روی نمونه‌های خاک به دست آمده‌اند. روابط کمک پناه- یانایساوا [۶] و لو-کانیارو [۷] روابطی تئوریک هستند.

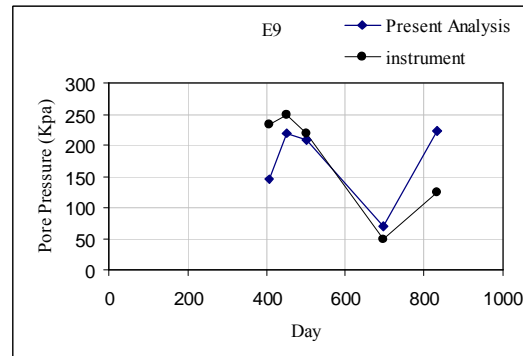
در این بخش از روابط کمک پناه، قنبری و موری- تامورا برای برآورد خطر شکست هیدرولیکی استفاده شده است. علت استفاده نکردن از روابط دیگر این است که برای مصالح هسته سد مورد مطالعه، نتایج آزمایشگاهی برای مشخصاتی از خاک که در این روابط مورد استفاده قرار گرفته‌اند یا عوامل روابط تجربی بر اساس آنها تعیین می‌شوند، وجود ندارد.

### رابطه کمک پناه و یانایساوا

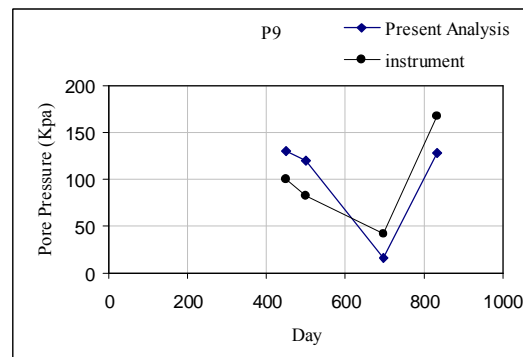
این محققان با استفاده از معیار گسیختگی مور- کولمب فشار شکست هیدرولیکی را برای نمونه‌های استوانه‌ای شکل به صورت رابطه ذکر شده در جدول (۲) ارائه کردند.

جدول ۲: روابط ارائه‌شده برای تخمین فشار ایجادکننده ترک هیدرولیکی توسط محققان مختلف.

$P_f = m\sigma_h + \sigma_t$	Jaworski et al
$P_f = \sigma_{\min} + q_u$	Mori and Tamura
$P_f = m\sigma_c$	Fukushima
$P_f = \left(\frac{b^2}{b^2 + a^2 \sin^2 \phi}\right) \left\{ \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) \left[ (1 + \sin \phi) \frac{\sigma_t}{2} + C \cos \phi \right] + p_0 (1 + \sin \phi) \right\}$	Lo and Kaniaru
$P_f = \frac{b^2 (1 + \sin \phi_u)}{b^2 + a^2 \sin^2 \phi_u} \sigma_h + \frac{c_u (b^2 - a^2) \cos \phi_u}{b^2 + a^2 \sin^2 \phi_u}$	Komakpanah and Yanagisawa
$P_f = m\sigma_h + n$	Ghambari



شکل ۱۱: مقایسه بین فشار آب حفره‌ای محاسباتی و اندازه‌گیری شده در پیزومتر E9.



شکل ۱۲: مقایسه بین فشار آب حفره‌ای محاسباتی و اندازه‌گیری شده در پیزومتر P9.

همان طور که ملاحظه می‌شود همخوانی به نسبت خوبی بین نتایج تحلیل و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد.

### بررسی وقوع ترک هیدرولیکی در هسته سد هیته جوت

پس از کنترل درستی تحلیل عددی انجام‌شده با استفاده از نتایج ابزار دقیق، در این قسمت با استفاده از

$$P_f = \sigma_{\min} + q_u \quad (۳)$$

در این رابطه  $\sigma_{\min}$  تنش اصلی حداقل و  $q_u$  مقاومت فشاری محدود نشده خاک است. در محاسبات  $q_u$  یعنی مقاومت فشاری محدود نشده دو برابر  $C_u$  در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: عوامل تجربی رابطه قنبری بر حسب نوع خاک [۵].

m	n (kg/cm <sup>2</sup> )	نوع خاک
۱/۲	۰/۴	خاک‌های مخلوط درشت دانه با دانه بندی خوب، حاوی ریزدانه رسی
۱/۱۵	۰/۲۵	خاک‌های شنی حاوی ریزدانه سیلتی و رسی
۱/۰۵	۰/۲۵	خاک‌های ماسه ای با دانه بندی خوب، حاوی رس و سیلت
۱/۰	۰/۲	خاک‌های ماسه ای با دانه بندی بد، حاوی رس و سیلت
۱/۰	۰/۴	خاک‌های ریزدانه با پلاستیسیته بالا (CH)
۱/۰۵	۰/۳	خاک‌های ریزدانه با پلاستیسیته پایین (CL)

برای پی بردن به اینکه آیا هسته دچار ترک خوردگی خواهد شد، مقادیر فشار آب بحرانی حاصل از روابط کمک پناه و یاناگیساوا، قنبری و موری و تامورا را برای المان‌های بالادست هسته، با فشار آب در المان‌های متناظر مقایسه می‌کنیم، نتایج این مقایسه در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

با دقت در این شکل نتیجه می‌شود که روابط کمک پناه و قنبری در ترازهایی بین ۶۹۵ تا ۷۰۵ متر ترک خوردگی در هسته را پیش‌بینی می‌کنند. این ناحیه محلی است که عرض هسته سد با شیبی تند کاهش یافته است.

چنانکه مشاهده می‌شود، رابطه موری و تامورا مقادیر بزرگی را برای فشار آب بحرانی ایجادکننده ترک ارائه می‌کند و بنابراین وقوع ترک در هسته را پیش‌بینی نمی‌کند.

### مطالعات انجام شده برای سد گلابر

در این بخش از تحقیق، رفتار سد گلابر در استان زنجان به عنوان مطالعه موردی در زمان ساخت و اولین آگیری تحلیل می‌شود. برای اینکه رفتار سد درست‌تر مدل شود، باید عوامل مصالح سد که از آنها در تحلیل

در این رابطه  $P_f$  فشار آب بحرانی ایجادکننده ترک  $\sigma_h$  تنش کل اصلی حداقل،  $C_u$  و  $\Phi_U$  عوامل مقاومت برشی خاک حاصل از آزمایش  $CU$ ،  $a$  و  $b$  به ترتیب شعاع‌های داخلی و خارجی نمونه استوانه‌ای هستند.

از آنجا که در سدهای خاکی واقعی  $b$  در قیاس با  $a$  بسیار بزرگ‌تر است، رابطه کمک پناه و یاناگیساوا می‌تواند شکل ساده‌تری به خود بگیرد و به شکل رابطه ۱ نوشته شود.

$$P_f = (1 + \sin \phi_u) \sigma_h + c_u \cos \phi_u \quad (۱)$$

### رابطه قنبری

قنبری در رساله دکترای خود به مطالعه آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی پرداخته است. او دستگاهی را برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی توسعه داد و سه نوع خاک را به وسیله آن مورد آزمایش قرار داد و فشار آب ایجادکننده ترک را برای آنها محاسبه کرد. سپس بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های خود رابطه‌ای تجربی برای به دست آوردن فشار آب ایجادکننده ترک ارائه کرده است:

$$P_f = m \sigma_h + n \quad (۲)$$

در این رابطه،  $P_f$  فشار آب بحرانی ایجادکننده ترک،  $\sigma_h$  تنش کل اصلی حداقل،  $m$  و  $n$  عوامل تجربی متناسب با نوع خاک هستند. چگونگی انتخاب عوامل تجربی رابطه قنبری در جدول (۳) آمده است. با توجه به مشخصات دانه‌بندی مصالح هسته سد هیته جووت که در شکل (۲) نشان داده شده است، جنس مصالح آن شن حاوی ریزدانه سیلتی و رسی است. بنابراین عوامل تجربی رابطه از روی جدول مربوط به آن متناسب با این نوع خاک انتخاب شده‌اند. همچنین در این تحقیق آمده است که در صورت اشباع بودن هسته، مقدار  $n$  به میزان ۰/۲ کاهش می‌یابد. در این تحقیق برای اطمینان، هسته در زمان آگیری اشباع در نظر گرفته شده است.

### رابطه موری - تامورا

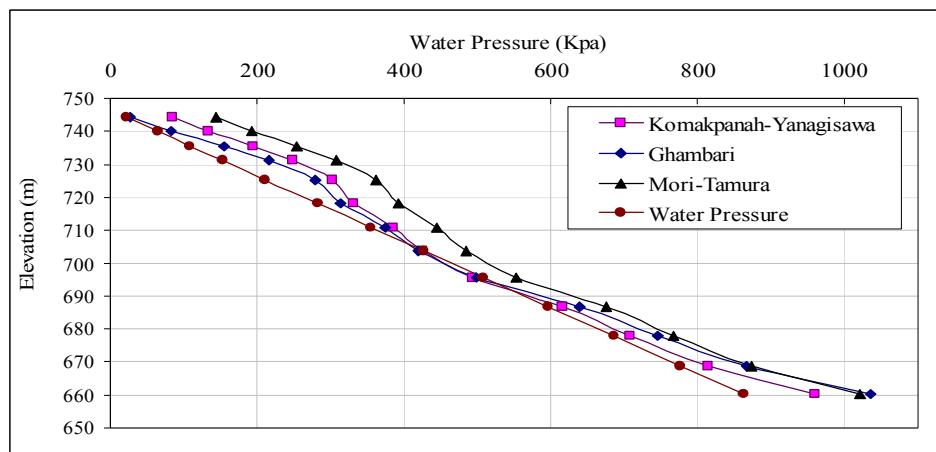
این محققان آزمایش‌های خود را روی نمونه‌های استوانه انجام دادند. آنها با تغییر اندازه نمونه‌های مورد آزمایش نشان دادند که اندازه نمونه تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نتایج آزمایش ندارد. سپس بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های خود رابطه (۳) را برای تخمین فشار ایجادکننده ترک ارائه دادند.

رود و تأمین آب مصرفی زمین‌های کشاورزی دشت زرین‌آباد و صنایع پتروشیمی شهرستان ایجرود استان زنجان تعریف شده است. ساختگاه مناسب برای احداث سد در یک کیلومتری شرق روستای گلابر علیا واقع در شهرستان ایجرود تعیین شده است. ارتفاع حداکثر سد از سنگ کف ۸۲ متر بوده و طول تاج آن حدود ۲۴۵ متر است. پوسته سد گلابر به شکل ترکیبی از مصالح سنگریزه‌ای حاصل از معادن سنگ و مصالح شن و ماسه رودخانه‌ای است. هسته این سد از نوع رسی است. تکیه‌گاه‌ها و بستر سنگی سد گلابر در امتداد محور سد از سنگ‌های آندزیتی تشکیل یافته است. در بالادست و پایین‌دست، این آندزیت‌ها و در زیر پی آبرفتی سنگ‌های توف قرار دارند، به گونه‌ای که سنگ آندزیتی به صورت یک بلوک در داخل سنگ‌های توف احاطه شده است. [۸]

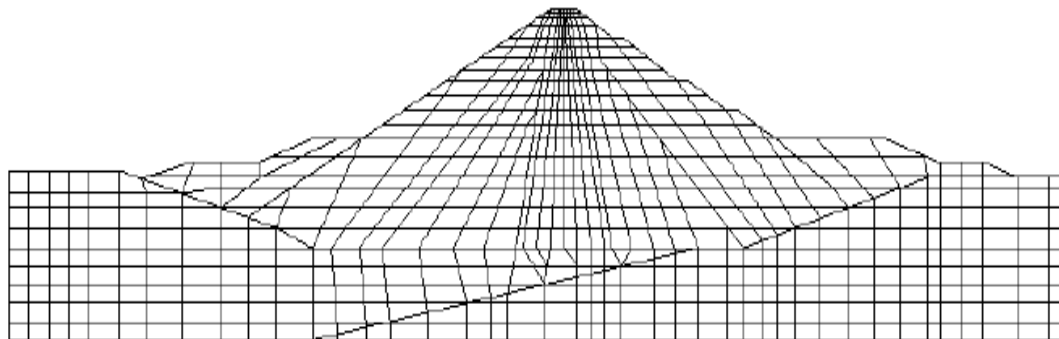
استفاده می‌شود به عوامل واقعی سد اجراشده نزدیک باشد. به این دلیل باید با توجه به اطلاعات حاصل از ابزار دقیق برای سد، تحلیل برگشتی انجام گیرد. برای انجام تحلیل برگشتی ابتدا اطلاعات این ابزار مورد غربالگری قرار گرفته است و اطلاعات نادرست کنار گذاشته شده و از اطلاعات صحیح برای به دست آوردن عوامل واقعی مصالح استفاده شده است. در مرحله بعد اولین آبیگری سد با استفاده از عوامل تصحیح‌شده مصالح مدل شده و با استفاده از نتایج حاصل از آن و با کمک گرفتن از روش‌هایی که برای سد قبلی شکست هیدرولیکی را پیش‌بینی کرده بودند، پتانسیل وقوع ترک در این سد مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج ارائه شده است.

### معرفی سد گلابر

پروژه سد مخزنی گلابر برای مهار آب رودخانه سجاس



شکل ۱۳: مقایسه فشار آب ایجادکننده ترک حاصل از روابط مختلف با فشار آب در المان‌های بالادست هسته در زمان اولین آبیگری.

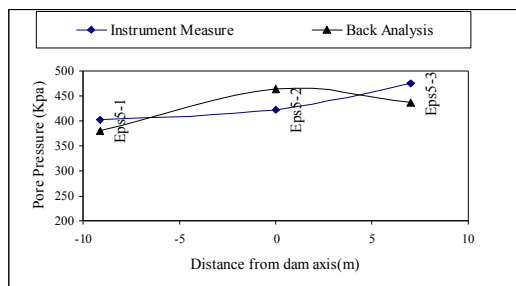


شکل ۱۴: شبکه اجزای محدود مورد استفاده برای تحلیل سد گلابر.

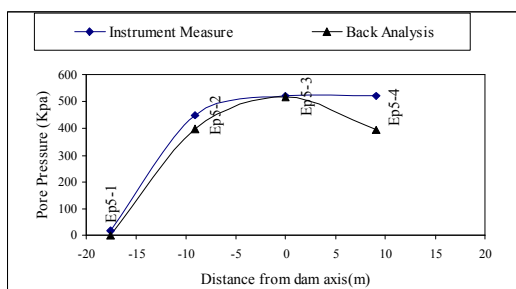
جدول ۴: مقادیر اولیه عوامل مصالح پی و بدنه سد گلابر.

Material Types	$e_0$	K (m/s)	$\Phi^\circ$	C (kpa)	$\nu$	E (Mpa)	$\gamma_d(t/m^2)$
Clay Core	0.54	1E -9	27	10	0.3	25	1.7
Filter and Transition Zones	0.18	1E -5	35	0	0.3	33	2
Gravel and sand shell	0.18	1E -5	42	0	0.3	48	2
Rockfill shell	0.11	1E -5	46	0	0.3	60	2.2
Alluvial Foundation	0.66	1E -5	23	0	0.35	10	1.55
Andozite Foundation	0.25	1E -7	45	1000	0.2	9000	2.4
Toof Foundation	0.25	1E -7	27	100	0.28	130	2.2

نگرفته‌اند، مورد بررسی بیشتر نیز قرار نگرفتند. همچنین پس از بررسی قرائت‌های پیژومترهای Eps5-4 در تراز ۱۶۲۹ متر و Ep5-5 در تراز ۱۶۳۹ متر چنین نتیجه‌گیری شد که این پیژومترها، عملکرد صحیحی ندارند، بنابراین اطلاعات مربوط به آنها کنار گذاشته شد.



شکل ۱۶: مقایسه بین مقادیر فشار آب حفره ای محاسباتی و اندازه گیری شده در پیژومترهای الکتریکی تراز ۱۶۲۹.



شکل ۱۷: مقایسه بین مقادیر فشار آب حفره‌ای محاسباتی و اندازه‌گیری شده در پیژومترهای الکتریکی تراز ۱۶۳۹.

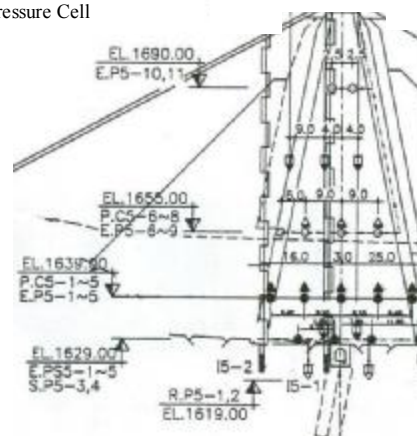
شکل (۱۹) نشان‌دهنده مقایسه میان نشست اندازه‌گیری شده و محاسباتی حاصل از تحلیل برگشتی در هسته سد است. با توجه به همخوانی به نسبت خوبی که میان مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی برای نشست و فشار آب حفره‌ای وجود دارد، می‌توان نتیجه گرفت که عوامل به دست آمده از تحلیل برگشتی برای مصالح نزدیک به مقادیر واقعی آنها است. جدول (۵) مقادیر این عوامل را نشان می‌دهد.

### نتایج حاصل از انجام تحلیل‌های برگشتی برای سد

هدف اصلی از انجام تحلیل‌های برگشتی، رسیدن به عوامل واقعی مصالح تشکیل‌دهنده سد است تا بدین ترتیب مدل‌سازی رفتار واقعی سد با دقت بیشتری انجام گیرد. این کار با استفاده از اطلاعات ابزار دقیق انجام می‌گیرد، اما قبل از انجام تحلیل برگشتی، باید مطمئن شد که اطلاعات به دست آمده از ابزار صحیح است. بنابراین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق مورد کنترل قرار گرفته و اطلاعات صحیح و منطقی جدا و استفاده شده است. شکل (۱۵) مقطع (۵-۵) از سد گلابر را با ابزارهای کار گذاشته شده در آن نشان می‌دهد.

● Electric Pizometer

▲ Pressure Cell



شکل ۱۵: نقشه جانمایی ابزار در مقطع (۵-۵) سد گلابر [۹].

شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) مقایسه میان مقادیر محاسباتی حاصل از تحلیل برگشتی برای فشار آب حفره‌ای و اندازه‌گیری شده در پیژومترهای الکتریکی قرار گرفته در ترازهای ۱۶۲۹، ۱۶۳۹ و ۱۶۵۵ را نشان می‌دهند. گفتنی است پیژومترهای تراز ۱۶۹۰ مقادیری نزدیک به صفر را نشان می‌دهند و چون تحت تأثیر قرار

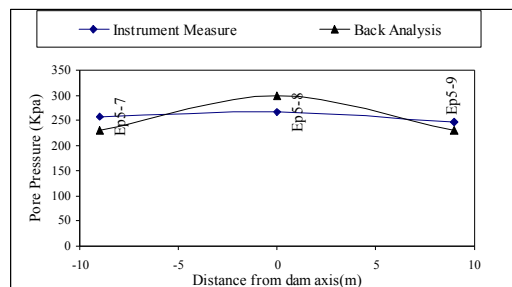


## ارزیابی وقوع شکست هیدرولیکی در هسته سد گلابر

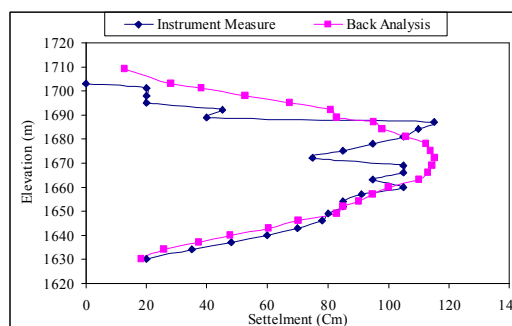
در این بخش با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌سازی اولین آبگیری سد، به بررسی وقوع ترک هیدرولیکی در هسته پرداخته شده است. شکل (۲۱) توزیع فشار آب حفره‌ای در سد را در پایان اولین آبگیری نشان می‌دهد. برای برآورد خطر ترک خوردگی هیدرولیکی هسته سد گلابر از روش‌هایی که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، استفاده شده است. برای این هدف از روابط کم‌پناه و قنبری کمک گرفته می‌شود. از رابطه موری-تامورا به این دلیل که برای شکست هیدرولیکی سد هیته جووت پیش‌بینی درستی ارائه نکرد، در این بخش استفاده نشده است. عوامل استفاده‌شده در رابطه کم‌پناه یعنی  $\Phi_{II}$  و  $C_{II}$  برای مصالح هسته به ترتیب برابر با ۶ درجه و ۷۰ کیلوپاسکال است. عوامل تجربی رابطه قنبری از روی جدول (۳) برای مصالح هسته انتخاب شده‌اند. با توجه به دانه‌بندی مصالح هسته و مقادیر نشانه خمیری و حد مایع به ترتیب برابر با ۲۱ و ۴۲ این خاک در رده رس با خاصیت خمیری پایین (CL) قرار می‌گیرد و انتخاب ضرایب تجربی نیز برای این نوع خاک انجام شده است.

جدول ۵: عوامل حاصل از تحلیل برگشتی برای مصالح پی و بدنه سد گلابر.

Material Types	$e_0$	K(m/s)	$\Phi^\circ$	C (kpa)	$\nu$	E (Mpa)	$\gamma_d(t/m^2)$
Clay Core	0.54	6E -10	27	25	0.3	15	1.7
Filter and Transition Zones	0.18	1E -5	35	0	0.3	28	2
Gravel and sand shell	0.18	1E -5	42	0	0.3	40	2
Rockfill shell	0.11	1E -5	46	0	0.3	54	2.2
Alluvial Foundation	0.66	1E -5	23	0	0.35	10	1.55
Andozite Foundation	0.25	1E -7	45	1000	0.2	9000	2.4
Toof Foundation	0.25	1E -7	27	100	0.28	130	2.2



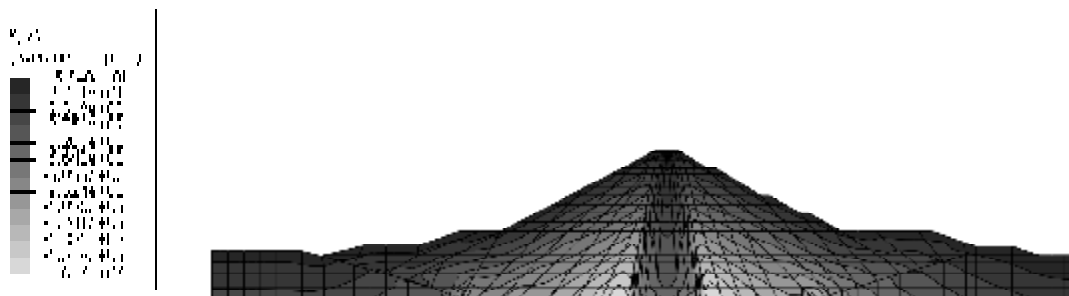
شکل ۱۸: مقایسه بین مقادیر فشار آب حفره ای محاسباتی و اندازه گیری شده در پیزومترهای الکتریکی تراز ۱۶۵۵.

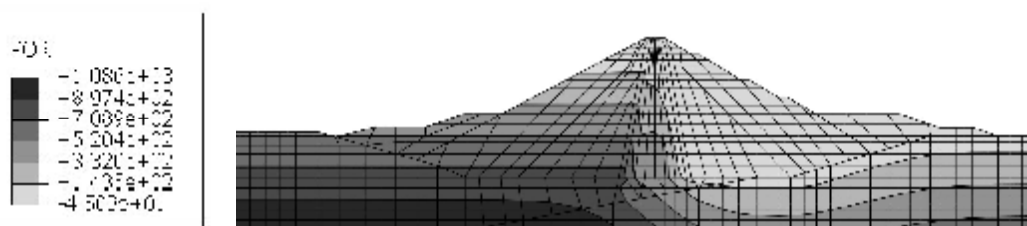


شکل ۱۹: مقایسه بین مقادیر نشست محاسباتی و اندازه‌گیری شده در هسته.

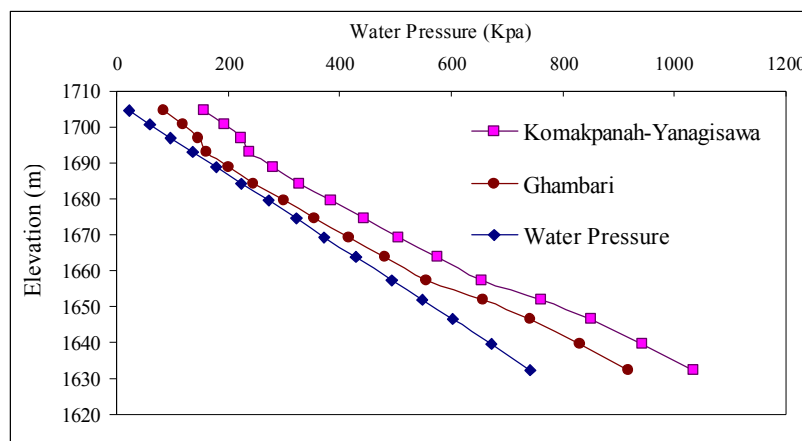
شکل (۲۰) توزیع تنش قائم مؤثر را در سد گلابر در پایان ساخت نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود، قوس‌زدگی در هسته سد اتفاق افتاده است و افت تنش زیادی در محل اتصال هسته و پوسته مشاهده می‌شود.

شکل ۲۰: توزیع تنش مؤثر قائم در سد گلابر در پایان ساخت.





شکل ۲۱: توزیع فشار آب حفره‌ای در سد گلابر در پایان اولین آبیگری.



شکل ۲۲: مقایسه فشار آب ایجادکننده ترک حاصل از روابط با فشار آب در المان‌های بالادست هسته در زمان اولین آبیگری.

- بررسی احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در هسته سد گلابر با شیوه‌های مختلف بیانگر این است که وقوع ترک خوردگی محتمل نیست. البته به دلیل عرض زیاد هسته حتی در صورت باز شدن ترک‌هایی در وجه بالادست هسته احتمال گسترش این ترک‌ها به سمت پایین‌دست و وقوع نشت شدید بسیار پایین است و بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که خطری سد گلابر را از ناحیه شکست هیدرولیکی تهدید نمی‌کند.

- روابط ارائه شده توسط محققان مختلف برای تعیین فشار آب بحرانی که سبب ایجاد شکست هیدرولیکی می‌شود، می‌توانند برای ارزیابی وقوع ترک هیدرولیکی در مرحله طراحی مورد استفاده قرار گیرند. اما قبل از استفاده از آنها باید مشخصاتی از خاک که برای محاسبه فشار بحرانی در این روابط نیاز است با آزمایش‌هایی تعیین شوند. از آنجا که اندازه‌گیری دقیق بعضی از این عوامل امکان‌پذیر نیست و با توجه به فرضیه‌هایی که در به دست آوردن این روابط وجود دارد، نمی‌توان به نتایج حاصل از آنها به طور قطعی استناد کرد.

برای پی بردن به اینکه هسته دچار ترک خوردگی خواهد شد یا خیر، مقادیر فشار آب بحرانی حاصل از دو رابطه ذکر شده را با فشار آب در المان‌های متناظر مقایسه می‌کنیم. نتایج این مقایسه در شکل (۲۲) نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود فشار آب همواره از فشار آب بحرانی که می‌تواند سبب ایجاد ترک شود، کمتر است. بنابراین احتمال وقوع ترک هیدرولیکی در هسته وجود ندارد.

### نتیجه‌گیری

- از میان روابط استفاده شده برای تعیین فشار آب بحرانی ایجادکننده ترک هیدرولیکی، رابطه موری-تامورا قادر به پیش‌بینی شکست هیدرولیکی سد هیته جووت نیست، اما روابط کمک‌پناه و قنبری ترک خوردگی هسته این سد را پیش‌بینی می‌کنند.

- تأیید شد که عامل نشت شدید از سد هیته جووت در زمان اولین آبیگری همان طور که دیگر محققان اعلام کرده‌اند، شکست هیدرولیکی هسته سد بوده است. این ترک خوردگی به ویژه در ترازای که عرض هسته با شبی تند کاهش یافته است، اتفاق افتاده است.

## مراجع

- 1 - Kjaernsli, B. and Torblaa, I. (1968). "Leakage through horizontal cracks in the core of Hyttejuvet Dam." *NGI*, publication No. 80, PP. 39-47.
- 2 - Jaworski, G. W., Duncan, J. M. and Seed, H. B. (1981). "Laboratory study of Hydraulic fracturing." *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.107, PP. 713-731.
- 3 - Mori, A. and Tamura, M., (1987). "Hydro fracturing Pressure of cohesive soils." *Journal of Soil and Foundation Japanese society of soil mechanics and foundation engineering*, Vol. 27, No. 1, PP. 14-22.
- 4 - Fukoshima, S. (1986). "Hydraulic fracturing criterion in the core of fill dam." *Report of Fujita Kogyo Technical Institute*, No. 22, PP. 131-136.
- 5 - Ghambari, A. (2002). *Laboratory study on Hydraulic fracturing in embankment dams*. thesis for PHD degree in geotechnique engineering, Environment and civil faculty, Amirkabir University of technology, Tehran, Iran
- 6 - Komakpanah, and Yanagisawa, E. (1989). "Laboratory study on Hydraulic fracturing Criteria in soil." *Journal of Soils & Foundations*, Vol. 29, No. 4, PP. 14-22.
- 7 - Lo, K. Y. and Kaniaru, K. (1990). "Hydraulic fracture in earth and rock-fill dams." *Canadian Geotechnical Journal* 27, PP. 496-506.
- 8 - Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, (2001). *Design report for foundation and body of Glabar Dam*.
- 9 - Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, (2007). *Report of instruments information for Glabar Dam*.

## واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Hyttejuvet
- 2 -Coupled analysis
- 3 -Arching
- 4 - Jaworski
- 5 - Fukoshima
- 6 - Mori
- 7 - Lo
- 8 - Abaqus
- 9 -Tunnel spoils
- 10 - Moraine