

## تأثیر هندسه هسته ناتراوای سدهای خاکی در ضریب اطمینان شکست هیدرولیکی

مصطفی زال نژاد<sup>۱</sup>، سیدشهاب امامزاده<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران  
<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵، بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۱۷، نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۳/۱۷

### چکیده

هسته سدهای خاکی نه تنها در آب‌بندی سد، بلکه در احتمال رخداد شکست هیدرولیکی نقش مهمی دارند. بنابراین انتخاب ابعاد و نوع مصالح برای هسته سدهای خاکی بسیار مهم است. در تحقیق حاضر، هدف بررسی پدیده شکست هیدرولیکی و تأثیر ابعاد و شکل مقطع هسته رسی یک سد خاکی و محاسبه ضریب اطمینان در برابر شکست هیدرولیکی است. برای این منظور ابتدا با استفاده از مدل اجزای محدود به بررسی پدیده شکست هیدرولیکی در دو مقطع وسط هسته و وجه بالادست هسته برای دو نوع مصالح قرصه CL و CH پرداخته شده است. تحلیل‌ها در مراحل پایان ساخت، آگیری اولیه و تراوش پایدار صورت گرفته و همچنین در مدل‌سازی‌ها مراحل ساخت سد نیز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که خاک CL به‌عنوان خاک بحرانی و خاک CH به‌عنوان خاک منتخب برای استفاده در هسته سد است. همچنین احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در هسته‌های ضخیم‌تر و کف هسته نیز بررسی گردید. نتایج نشان داد معیارهای فوکوشیما و قنبری به‌ترتیب خوشبینانه‌ترین داده‌ها و محافظه‌کارانه‌ترین داده‌ها را دارا می‌باشد. با توجه به معیارهای به‌کار گرفته شده در تحقیق حاضر، خاک CH در برابر شکست هیدرولیکی ایمن بوده و احتمال وقوع شکست هیدرولیکی برای خاک بحرانی (CL) در نقاطی از پایین دست هسته سد محتمل تشخیص داده شد.

**کلیدواژه‌ها:** سدهای خاکی، شکست هیدرولیکی، مدل اجزای محدود، هسته ناتراوا، تراوش.

### ۱- مقدمه

مختلف وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در سه گروه کلی تقسیم-بندی کرد (Khamesi و Mirghasemi، ۲۰۰۸). دسته اول) استفاده از روابط تجربی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی یا میدانی است (Patel و همکاران، ۲۰۱۷). این روابط، فشار آب ایجادکننده ترک را برحسب سطح تنش در خاک ارائه می‌کنند. با مقایسه این فشار با فشار آب در المان‌های بالادست هسته، می‌توان وقوع شکست را پیش‌بینی نمود. از این دسته می‌توان به روابط قنبری، جاروسکی<sup>۱</sup>، فوکوشیما<sup>۲</sup> و موری<sup>۳</sup> اشاره کرد (Jaworski و همکاران، ۱۹۸۱؛ Mori و همکاران، ۱۹۸۷). گروه دوم) روابط تئوریک هستند که برای مدل‌های پیشنهاد شده در نظریه خمیری توسعه یافته‌اند. این روابط مانند روابط گروه اول، فشار آب بحرانی را ارائه می‌کنند (Lto، ۲۰۰۷).

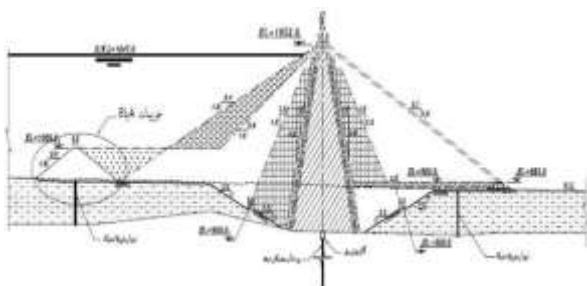
شکست هیدرولیکی می‌تواند در هسته ریزدانه سدهای خاکی اتفاق بیافتد. این پدیده اغلب در زمان اولین آگیری سد وقتی که فشار آب به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد، رخ می‌دهد. کاهش تنش مؤثر قائم در هسته سد تسهیل‌کننده وقوع این پدیده است. در سدهای خاکی، اغلب مصالح هسته نسبت به مصالح پوسته سختی کمتری دارند. از آنجاکه هسته به‌دلیل نیاز به نفوذپذیری بسیار کم الزاماً باید از مصالح ریزدانه ساخته شود، به ناچار مقاومت برشی آن کمتر از سایر قسمت‌های بدنه سد بوده و در نتیجه نشست مصالح هسته نسبت به پوسته بیشتر است. این موضوع سبب می‌شود که بخشی از تنش هسته به پوسته منتقل شود و در نتیجه سطح تنش در هسته کاهش یابد (Beiranvand، ۲۰۲۰). برای پیش‌بینی وقوع ترک هیدرولیکی در هسته سد، چندین روش

3. Mori

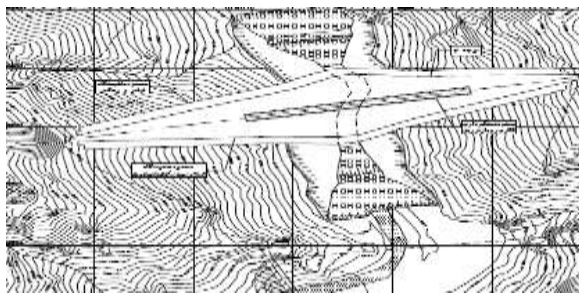
1. Jaworski  
2. Fukoshima



عمده ویژگی سدّ حاجی‌لر چای مصارف صنعتی بوده که با ظرفیت موجود، موجب بهره‌وری بالایی برای صنعت منطقه است و ۱۰ میلیون مترمکعب در سطح ۱۰۰۰ هکتار از اراضی دیه‌زار کم‌بازده را سیراب می‌کند. تأمین سالانه سه میلیون مترمکعب آب برای شرب، بهداشتی و کشاورزی شهرستان‌های ورزقان و خاروانا و روستاهای اطراف آن، تأمین نیازهای آبی حقابه‌بران و محیط زیست، کنترل سیلاب، جاذبه‌های گردشگری و اشتغال‌زایی در منطقه از دیگر مزایا و ویژگی‌های سدّ حاجی‌لر چای است (Bandab Consulting Engineering, ۲۰۰۸). شکل (۱) پلان و بزرگ‌ترین مقطع این سد را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) بزرگ‌ترین مقطع سدّ حاجی‌لر چای، ب) پلان سدّ حاجی‌لر چای (مهندسین مشاور بندآب، ۱۳۸۶)

### ۳- بسته نرم‌افزاری Geo-Studio

نرم‌افزار Geo-Studio از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر اجزای محدود بوده و از طرق آن می‌توان تحلیل‌هایی از قبیل تنش-کرنش، جریان، تراوش، زلزله و شرایط افت سریع را بررسی نمود (Armando و Nathan, ۲۰۲۲). این نرم‌افزار شامل قسمت‌های Sigma/W برای تحلیل تنش-کرنش، Seep/W برای تحلیل تراوش، Slope/W برای تحلیل پایداری شیب، Quake/W برای تحلیل دینامیکی، Temp/W برای تحلیل توزیع دما در خاک، Vadose/W برای آنالیز توزیع آلاینده‌ها در خاک و Ctran/W برای بررسی اثر شرایط محیطی از قبیل رشد گیاهان و بارندگی بر خاک است. البته در نسخه‌های جدید این نرم‌افزار به این برنامه

دسته سوم) استفاده از مکانیک شکست است که موضوع بحث این تحقیق نیست.

پدیده شکست هیدرولیکی اولین بار در صنعت نفت مورد توجه قرار گرفت. در این صنعت به‌منظور افزایش میزان بازدهی چاه‌های نفت اقدام به ایجاد ترک با استفاده از تزریق سیال تحت فشار بالا می‌نمایند. بنابراین شکست هیدرولیکی در برخی موارد به‌عنوان یک تکنیک برای نفوذ ماده تزریق در محیط یا تسهیل ورود سیال به درون چاه نفت استفاده می‌شود. ولی در سدهای خاکی این پدیده از نقش مخربی برخوردار است و طراحان سدهای خاکی در صدد جلوگیری از وقوع آن هستند (Jian و همکاران، ۲۰۲۲، Andrew و Gvbert, ۲۰۲۱).

خوشبختانه در ایران گزارشی از خرابی کامل یک سد در اثر شکست هیدرولیکی منتشر نشده است، ولی واقعیت مطلب آن است که در بسیاری از موارد نشت آب از پی و بدنه سدها بیش از مقدار پیش‌بینی شده بوده که این مورد حکایت از وقوع خرابی در درون سد می‌نماید. بر همین اساس هر از چندگاهی خبرهایی از وقوع اختلالاتی در بهره‌برداری این سدها به گوش می‌رسد.

مدل‌سازی پدیده شکست هیدرولیکی در سدهای مسأله‌دار مانند سد هیتنه-جویت<sup>۴</sup> (Faghihi و Haeri, ۲۰۰۸) با نرم‌افزار آباکوس و سد تتون<sup>۵</sup> آمریکا (Solvan و Delatte, ۲۰۰۳) به‌شکل دوبعدی و در شرایط کرنش مسطح بررسی شده است.

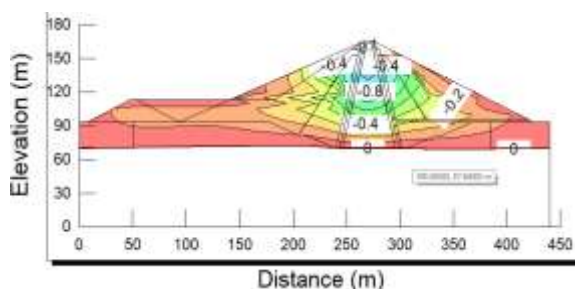
در پژوهش حاضر، جهت شبیه‌سازی‌های عددی، ساخت مرحله‌ای سد نیز در نظر گرفته شده و هر لایه به ارتفاع تقریبی ۵ متر (به تعداد ۲۱ لایه) فعال شده است. همچنین جهت شناسایی نواحی مستعد پدیده شکست هیدرولیکی در هسته سد، تحلیل‌ها و ارزیابی‌ها برای هر سه مرحله پایان ساخت، آنگیری اولیه و تراوش پایدار برای مصالح قرصه و در دو مقطع وسط هسته و وجه بالادست هسته صورت گرفته است. درنهایت ضریب اطمینان وقوع شکست هیدرولیکی به‌صورت کمی برای هر یک از خاک‌ها در مراحل و مقاطع و با معیارهای مختلف محاسبه شده و خاک مناسب برای استفاده در هسته سد پیشنهاد گردیده است.

### ۲- معرفی سدّ حاجی‌لر چای

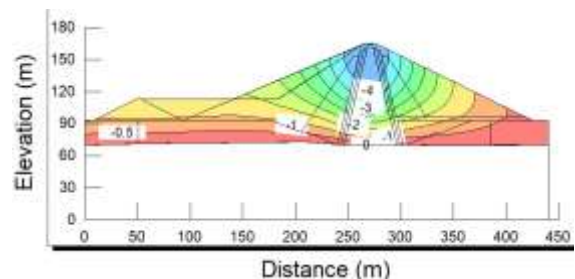
سدّ مخزنی حاجی‌لر چای بر روی رودخانه‌ای به همین نام از سرشاخه‌های رودخانه ارس در مدت ۱۰ سال ساخته شده و مساحت حوضه آبریز تا محل سد ۵۳۶ کیلومتر مربع است که در ۱۳۵ کیلومتری شمال تبریز و ۵۰ کیلومتری شمال غربی ورزقان و ۲ کیلومتری روستای قره‌قیه قرار دارد. سدّ مخزنی حاجی‌لر چای یک سدّ خاکی با هسته ناتراوای رسی با ظرفیت مخزن ۴۸/۹ میلیون مترمکعب است که ساخت آن از سال ۱۳۸۸ آغاز شد.

رفتار سد با نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی مناسب است (Ghanbari, ۲۰۱۵).

اگر تحلیل بدنه سد به صورت لایه به لایه انجام شود، حداکثر تغییر مکان قائم بدنه سد در میانه ارتفاع و در هسته اتفاق خواهد افتاد. این در حالی است که در تحلیل یک مرحله‌ای همواره حداکثر نشست و تغییر مکان قائم مربوط به تاج سد است. باتوجه به شکل (۴)، در صورتی که تحلیل یک سد خاکی نظیر یک ساختمان یا یک سد بتنی به صورت یک مرحله‌ای انجام شود، تنش‌ها و مخصوصاً تغییر مکان‌های حاصله غیرواقعی خواهند بود.



شکل ۳- کانتور تغییر مکان‌های قائم (بر حسب متر) در سدّ حاجی‌لر چای (ساخت مرحله به مرحله)



شکل ۴- کانتور تغییر مکان‌های قائم (بر حسب متر) در سدّ حاجی‌لر چای (ساخت تک‌مرحله‌ای)

#### ۵- نتایج حاصل از نرم افزار

##### ۵-۱- پایان مرحله ساخت

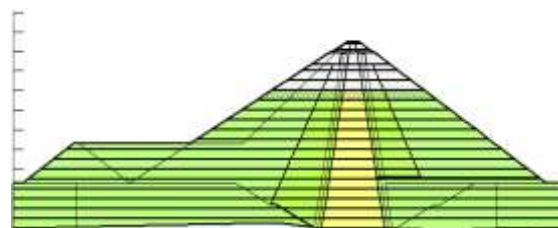
در این مرحله از تحلیل‌ها به دلیل این که مخزن هنوز آبگیری نشده است، از پارامترهای اشباع نشده و وزن مخصوص مرطوب برای کلیه مصالح استفاده می‌شود. اما در وجه پایین دست به دلیل بارندگی مصالح آبرفت دارای شرایط اشباع می‌باشند. در پایان مرحله ساخت به دلیل این که مخزن هنوز آبگیری نشده است و فشار آبی برای وقوع ترک هیدرولیکی وجود ندارد، احتمال وقوع شکست هیدرولیکی وجود نخواهد داشت. لذا این مرحله از تحلیل‌ها صرفاً برای بررسی وضعیت تنش‌ها و تغییر مکان‌های سد و در حالت تنش کل انجام می‌گیرد.

آنالیز Air/W نیز اضافه شده است که مربوط به مدل‌سازی جریان هوا است. کلیه بخش‌های این نرم‌افزار بر مبنای اجزای محدود بوده و تنها در بخش Slope/W این نرم‌افزار از روش‌های ترسیمی استفاده می‌شود. بخش Sigma/W این نرم‌افزار مربوط به آنالیزهای تنش- کرنش، آنالیز برجا و تحکیم است که می‌توان از طریق آن تنش‌های کل، مؤثر، بین ذره‌ای، فشار آب حفره‌ای و ... را به دست آورد و از طریق آن تغییر شکل‌های حاصل در خاک را مشاهده نمود.

#### ۴- مدل سدّ حاجی‌لر چای

از بزرگ‌ترین مقطع سدّ حاجی‌لر چای برای این مدل‌سازی استفاده شده است. تحلیل انجام شده برای این سد تحلیل کوپل تغییر شکل و فشار آب حفره‌ای است. بنابراین تحلیل در محیط تنش مؤثر انجام شده است.

پی این سد نیز به صورت تغییر شکل ناپذیر در نظر گرفته شده و درجات آزادی گره‌های مرز پایینی مدل در راستاهای افقی و قائم بسته شده‌اند. پوسته سد به صورت الاستیک مدل شده و هسته رسی سد با استفاده از مدل رفتاری مورکولمب، به صورت الاستیک- پلاستیک کامل مدل گردیده است. تحلیل سدّ حاجی‌لر چای در سه بخش پایان ساخت، آبگیری اولیه و تراوش پایدار انجام شده است. به دلیل نفوذپذیری بالای مصالح پوسته چنین فرض شده که در زمان ساخت فشار آب حفره‌ای در پوسته ایجاد نخواهد شد (Sadettin و Topcu, ۲۰۱۸). برای شبیه‌سازی ساخت مرحله‌ای سد، ۲۱ لایه در نظر گرفته شده است. شکل (۲) ساخت مرحله‌ای سد را در محیط نرم‌افزار نشان می‌دهد.



شکل ۲- مدل عددی پس از خاکریزی لایه ۱۴م

در عملیات اجرایی ساخت لایه به لایه سدهای خاکی بسته به نوع خاک از تعداد زیادی لایه که معمولاً ضخامت ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر دارند، استفاده می‌گردد. اما در مدل‌سازی عددی امکان در نظر گرفتن کبله این لایه‌ها به دلیل وقت‌گیر بودن فرآیند مدل‌سازی وجود ندارد. لذا مدل‌سازی عددی با استفاده از لایه‌های ضخیم‌تر و در مدت زمان کوتاه‌تر انجام می‌گیرد. مطالعات محققان نشان می‌دهد که در نظرگیری ۸ تا ۱۰ لایه برای انطباق عینی

چنین حالتی خاک هسته تحکیم یافته محسوب می‌شود و بارهای وارده شامل وزن بدنه سد و فشار آب مخزن می‌باشد که هسته در برابر آن زهکشی شده عمل می‌کند. از طرف دیگر در درون هسته فشار آب حفره‌ای به وجود آمده و با فشار آب مخزن در ارتباط می‌باشد. برای پایداری هسته در این شرایط معمولاً از روش تنش‌های مؤثر استفاده می‌شود و برای پارامترهای مقاومت برشی هسته  $\Phi'$  و  $C'$  انتخاب می‌گردد. این پارامترها از آزمایش‌های تحکیم یافته و زهکشی شده (CD) و یا از پوش تنش مؤثر آزمایش‌های تحکیم یافته و زهکشی نشده (CD) قابل استخراج هستند.

#### ۶- بررسی امکان وقوع شکست هیدرولیکی

وقوع ترک هیدرولیکی در هر المان از هسته سدهای خاکی همگن تابع وضعیت تنش‌های المان مذکور است، با این حال عواملی که منجر به کاهش تنش در توده خاک می‌گردند (Cornet و همکاران، ۲۰۰۳) شرایط وقوع ترک خوردگی را تسهیل می‌نمایند. بنابراین وجود ناهمگنی هندسی، بارگذاری و مصالح در این امر مؤثر هستند (Paudel, ۲۰۱۷). در این بخش برای بررسی احتمال وقوع شکست هیدرولیکی از دو معیار کششی ساده و معیار برشی قنبری استفاده می‌شود.

#### ۶-۱- معیار کششی ساده

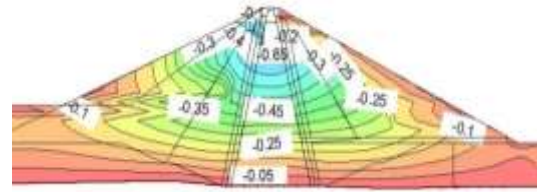
این معیار که ساده‌ترین مکانیزم بروز ترک هیدرولیکی می‌باشد، چنانچه در یک المان تنش کل حداقل ( $\sigma_3$ ) از فشار آب حفره‌ای (U) ایجاد شده در آن المان کمتر باشد ( $U > \sigma_3$ )، فرض می‌شود که در آن شکست هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. این شرایط ممکن است ترک‌هایی به صورت قائم یا مایل در هسته به وجود آورد. این معیار محافظه‌کارانه‌ترین معیار برای پیش‌بینی شکست هیدرولیکی است (Shamsrad و Ghanbari, ۲۰۱۳).

#### ۶-۲- معیار Ghanbari (۲۰۱۳)

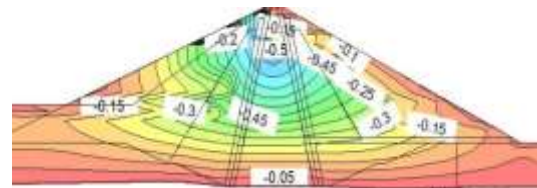
طبق این معیار مشخصات مکانیکی خاک هم در محاسبه فشار آب حفره‌ای شکست هیدرولیکی وارد می‌شوند. این معیار شکست دقیق‌تر از معیار کششی ساده است. Ghanbari با تحلیل نتایج آزمایش‌هایی رابطه (۱) را ارائه نمود (Shamsrad و Ghanbari, ۲۰۱۳).

$$P_f = m\sigma_h + n \quad (1)$$

که  $P_f$  فشار شکست هیدرولیکی،  $\sigma_h$  تنش افقی (برحسب تنش کل)، پارامتر  $m$  بین ۱ تا ۱/۲ و پارامتر  $n$  برحسب  $\text{kg/cm}^2$  بین ۰/۲ تا ۰/۴ با توجه به نوع خاک تغییر می‌نماید. مقدار این پارامتر برای انواع خاک‌ها در جدول (۱) آمده است.



شکل ۵- کانتورهای تغییر مکان قائم در پایان مرحله ساخت برحسب متر (خاک CL)



شکل ۶- کانتورهای تغییر مکان قائم در پایان مرحله ساخت برحسب متر (خاک CH)

#### ۵-۱-۱- تفسیر نتایج حاصل از تحلیل‌های پایان مرحله ساخت

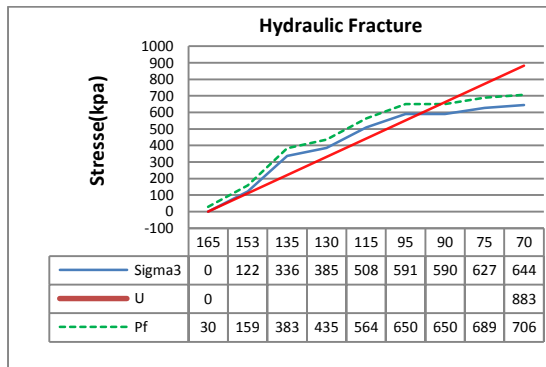
در مرحله پایان ساخت به دلیل این که مخزن هنوز آبیگری نشده است و فشار آبی برای وقوع ترک هیدرولیکی وجود ندارد، احتمال وقوع شکست هیدرولیکی وجود نخواهد داشت. لذا این مرحله از تحلیل‌ها صرفاً برای بررسی وضعیت تنش‌ها و تغییر مکان‌های سد انجام گرفت. از طرف دیگر با توجه به مدل سازی مرحله‌ای ساخت سد و شبیه‌سازی خاکریزی به صورت لایه به لایه در محیط نرم‌افزار، حداکثر تغییر مکان‌های قائم در هر دو نوع خاک CL و CH تقریباً در مرکز هسته اتفاق افتاد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌ها مشاهده گردید که حداکثر تغییر مکان قائم برای خاک CH کمتر از خاک CL می‌باشد.

#### ۵-۲- مرحله آبیگری اولیه و تراوش پایدار

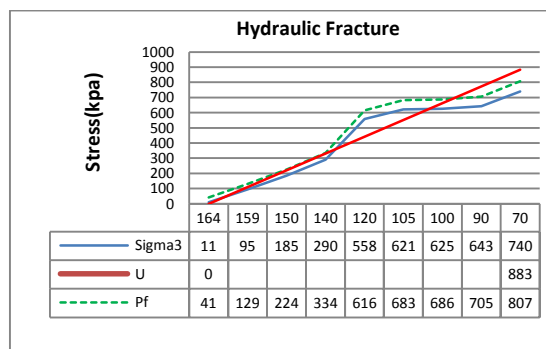
باتوجه به این که آبیگری مخزن غالباً در طول یک فصل بارندگی صورت می‌گیرد و لذا هسته سد همچنان زمان کافی برای تحکیم کامل خاک را ندارد و از طرف دیگر، سرعت آبیگری شرایط زهکشی نشده را در هسته به وجود می‌آورد، با این تفاسیر برای شبیه‌سازی رفتار سدهای خاکی در تحلیل آبیگری اولیه پارامترهای خاک هسته چیزی بین UU و CD در نظر گرفته می‌شود. برای پیش‌بینی وقوع ترک، هر دو روش تحلیل تنش کل و تنش مؤثر در این مرحله قابل استفاده است. ولی از آنجایی که روش تنش مؤثر از پیچیدگی بیشتری برخوردار است لذا تحلیل‌ها در حالت تنش کل انجام گرفته است.

پس از گذشت چندین سال از آبیگری مخزن سد، هسته به طور کامل اشباع شده و خط آزاد آب در درون آن تکمیل می‌گردد. در

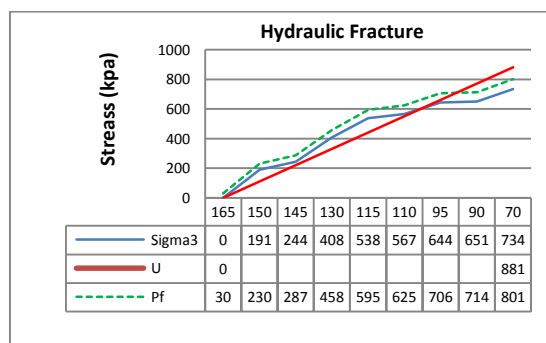
مقایسه می‌گردد. در این بخش  $P_f$  فشار آب حفره‌ای در شکست هیدرولیکی،  $\Sigma 3$  تنش کل حداقل و  $U$  معرف فشار آب حفره‌ای محاسبه شده است.



شکل ۹- نمودار تغییرات تنش (برحسب کیلوپاسکال) برای خاک CL مقطع A-A در مرحله آگیری اولیه معیار کششی ساده و برشی



شکل ۱۰- نمودار تغییرات تنش (برحسب کیلوپاسکال) برای خاک CL مقطع B-B در مرحله آگیری اولیه معیار کششی ساده و برشی



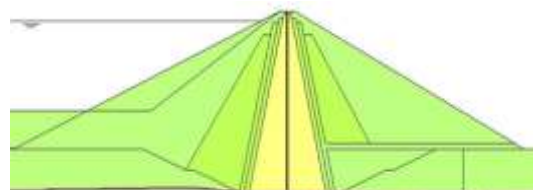
شکل ۱۱- نمودار تغییرات تنش (برحسب کیلوپاسکال) برای خاک CL مقطع A-A در مرحله تراوش پایدار معیار کششی ساده و برشی

جدول ۱- نحوه استخراج پارامترهای رابطه تجربی فشار شکست هیدرولیکی

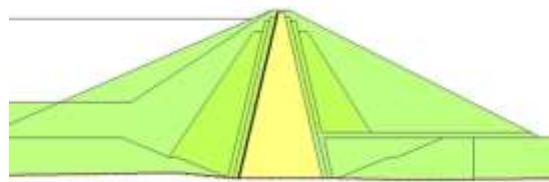
$m$	$n$	نوع خاک
kg/cm <sup>2</sup>		
۱/۲	۰/۴	خاک‌های مخلوط درشت‌دانه با دانه‌بندی خوب، حاوی ریزدانه رسی
۱/۱۵	۰/۲۵	خاک‌های شنی حاوی ریزدانه سیلتی و رسی
۱/۰۵	۰/۲۵	خاک‌های ماسه‌ای با دانه‌بندی خوب، حاوی رس و سیلت
۱	۰/۲	خاک‌های ماسه‌ای با دانه‌بندی بد، حاوی رس و سیلت
۱	۰/۴	خاک‌های ریزدانه با پلاستیسیته بالا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

در صورتی که تراکم به‌روش (ASTM-D698) صورت پذیرد می‌توان مقدار  $m$  و  $n$  را به‌میزان ۰/۰۵ کاهش داد. در صورتی که نمونه پس از اشباع شدن مورد آزمایش قرار گرفته باشد می‌توان مقدار  $n$  را به‌میزان ۰/۱ تا ۰/۲ کاهش داد. بر اساس این معیار چنانچه فشار آب حفره‌ای در یک المان از مقدار فشار شکست هیدرولیکی  $P_f$  بیشتر باشد، وقوع شکست هیدرولیکی محتمل است (قنبری و شمس‌راد، ۱۳۹۱).

برای مراحل آگیری اولیه و تراوش پایدار برای هر دو نوع مصالح، امکان وقوع شکست هیدرولیکی در دو مقطع وسط هسته و خط مایل کنار هسته که به‌صورت شماتیک در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است، ارائه می‌گردد.



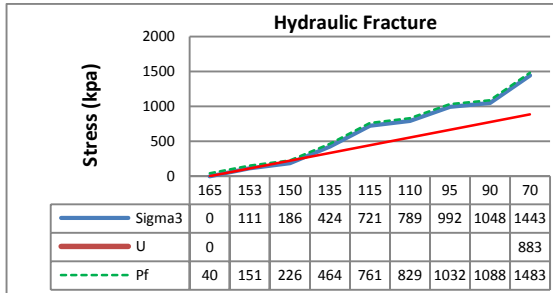
شکل ۷- مقطع وسط هسته (A-A)



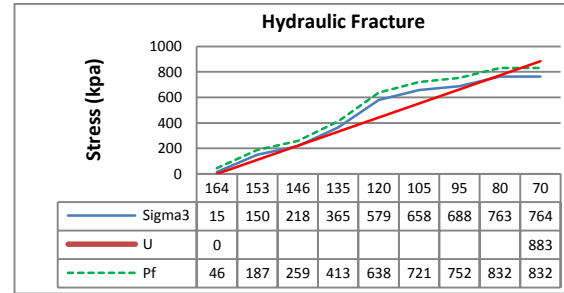
شکل ۸- مقطع خط مایل کنار هسته (B-B)

### ۳-۶- وضعیت شکست هیدرولیکی در خاک CL

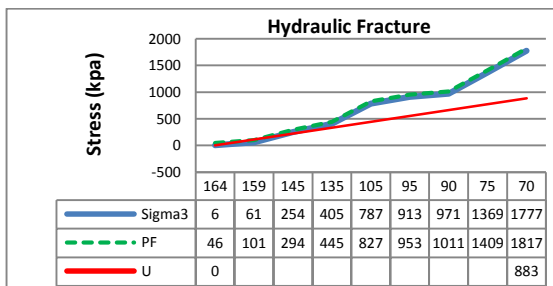
در این بخش با استفاده از معیار کششی ساده و معیار برشی به بررسی احتمال شکست هیدرولیکی در مقاطع مختلف سدّ حاجی‌لر چای برای خاک CL پرداخته شده و با فشار آب حفره‌ای



شکل ۱۵- نمودار تغییرات تنش (برحسب کیلوپاسکال) برای خاک CH مقطع A-A در مرحله تراوش پایدار معیار کششی ساده و برشی

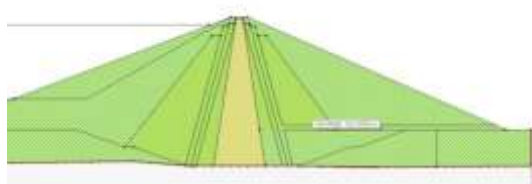


شکل ۱۲- نمودار تغییرات تنش (برحسب کیلوپاسکال) برای خاک CL مقطع B-B در مرحله تراوش پایدار معیار کششی ساده و برشی

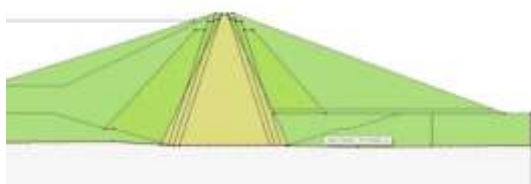


شکل ۱۶- نمودار تغییرات تنش (برحسب کیلوپاسکال) برای خاک CH مقطع B-B در مرحله تراوش پایدار معیار کششی ساده و برشی

۷- بررسی تأثیر هندسه هسته بر فشار شکست هیدرولیکی در این بخش با تغییر هندسه هسته، تحلیل‌ها برای هسته ضخیم‌تر و باریک‌تر از هسته اصلی برای خاک CH انجام گردیده و با مقایسه نتایج تحلیل‌ها اثر هندسه هسته بر امکان وقوع شکست هیدرولیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸)، هندسه هسته سدّ حاجی‌لر چای در مقطع باریک‌تر و ضخیم‌تر نشان داده شده است.



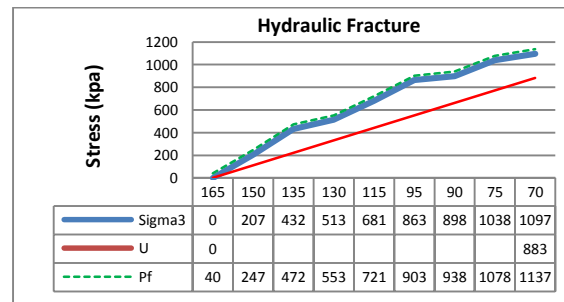
شکل ۱۷- هندسه هسته سد در مقطع باریک‌تر



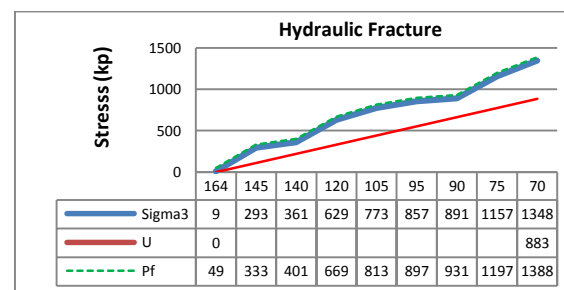
شکل ۱۸- هندسه سد در مقطع ضخیم‌تر

#### ۴-۶- وضعیت شکست هیدرولیکی در خاک CH

در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) نمودارهای رسم شده تغییرات فشار شکست هیدرولیکی، تنش اصلی حداقل و فشار آب حفره‌ای در ارتفاع سد را با یکدیگر مقایسه نموده و امکان شناسایی نقاط محتمل برای شکست هیدرولیکی را فراهم می‌سازد. همچنین نمودار تغییرات تنش همه‌جانبه نیز برای مراحل و مقاطع مختلف هسته ترسیم شده است.

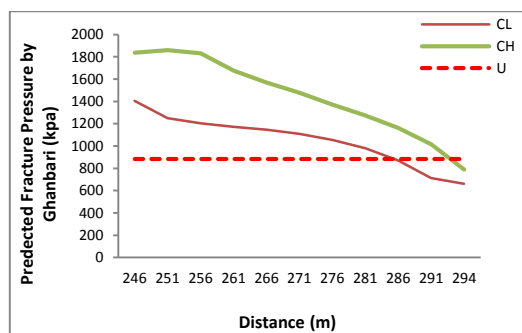


شکل ۱۳- نمودار تغییرات تنش (برحسب کیلوپاسکال) برای خاک CH مقطع A-A در مرحله آگیری اولیه معیار کششی ساده و برشی



شکل ۱۴- نمودار تغییرات تنش (برحسب کیلوپاسکال) برای خاک CH مقطع B-B در مرحله آگیری اولیه معیار کششی ساده و برشی

می‌باشد. این در حالی است که برای خاک CH تنها در یک نقطه در پایین‌دست، احتمال شکست وجود دارد.



شکل ۲۱- بررسی امکان وقوع شکست هیدرولیکی در کف هسته بر اساس معیار برشی قنبری (۱۳۸۱)

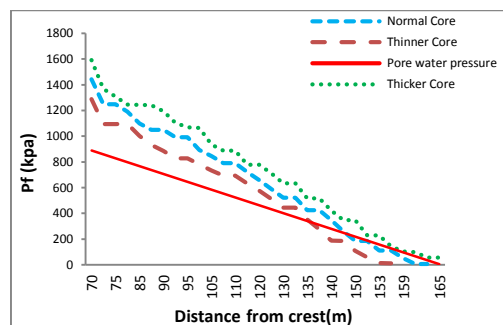
۹- مقایسه و جمع‌بندی نتایج حاصل از شکست هیدرولیکی با توجه به تحلیل‌ها و نمودارها مشاهده می‌گردد که در تمام مراحل آنگیری اولیه و تراوش پایدار و برای تمام مقاطع، احتمال وقوع شکست هیدرولیکی برای خاک CL نسبت به خاک CH بیشتر است. از طرف دیگر برای خاک CL نسبت به خاک CH در کف هسته نیز در نقاط بیشتری پدیده شکست هیدرولیکی مشاهده می‌شود. این امر باعث می‌گردد که خاک CL به‌عنوان خاک بحرانی و خاک CH به‌عنوان خاک منتخب برای ساخت و اجرای هسته انتخاب گردد.

برای اطمینان از صحت گزینه‌های انتخاب شده به‌عنوان قرضه بحرانی و منتخب، نتایج به‌دست آمده از معیار کششی ساده و معیار قنبری (۱۳۸۱) برای این دو قرضه، با نتیجه تحقیقات سایر محققین از جمله Fukushima (۱۹۸۶) و Yamaguchi (۲۰۰۹) مقایسه می‌شود. در این مقایسه فشار شکست هیدرولیکی در مرحله آنگیری اولیه و مرحله تراوش پایدار برای مقطع وسط هسته بر اساس روابط پیشنهاد شده برای هر دو نوع خاک CL و CH محاسبه و مقایسه می‌گردد.

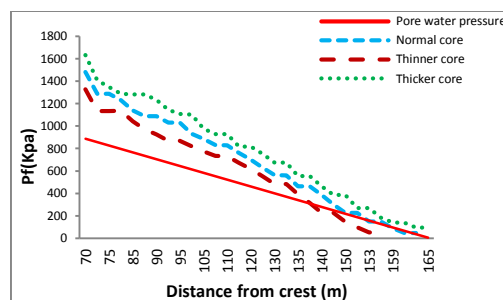
#### ۹-۱- مطالعات Fukushima (۱۹۸۶)

Fukushima از جمله محققین آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی می‌باشد. وی پس از انجام یک سری آزمایش روی خاک‌های چسبیده متراکم از مقایسه تنش‌های کل و مؤثر به این نتیجه رسید که مقاومت کششی خاک‌های چسبیده متراکم در تنش‌های مؤثر قابل صرف‌نظر کردن است. نمونه‌های مورد استفاده شکل استوانه توخالی داشتند و در نتیجه‌گیری مذکور این فرض را مورد نظر داشت که توزیع تنش‌ها در جهت شعاعی به‌صورت خطی است. همچنین با استفاده از معیار موهرکلمب رابطه فشار

در شکل‌های زیر، برای خاک CH، فشار شکست هیدرولیکی بر اساس معیار کششی ساده و معیار برشی قنبری (۱۳۸۱) با در نظر گرفتن هندسه نرمال، باریک و ضخیم برای هسته سد ارائه شده است.



شکل ۱۹- مقایسه فشار شکست (kpa) در سد با در نظر گرفتن هسته باریک‌تر و ضخیم‌تر بر اساس معیار کششی ساده (CH)

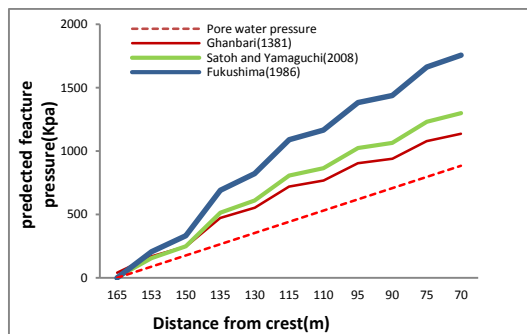


شکل ۲۰- مقایسه فشار شکست (kpa) در سد با در نظر گرفتن هسته باریک‌تر و ضخیم‌تر بر اساس معیار برشی قنبری (CH)

با توجه به شکل‌های (۱۹) و (۲۰) می‌توان نتیجه گرفت که با باریک‌تر شدن هسته فشار شکست هیدرولیکی کاهش یافته و لذا احتمال وقوع شکست هیدرولیکی نیز بیشتر خواهد شد. مقایسه نمودارهای فوق نشان می‌دهد که روند مشابهی برای تغییرات فشار شکست هیدرولیکی با باریک‌تر و ضخیم‌تر شدن هسته وجود دارد و با افزایش ضخامت هسته فشار شکست هیدرولیکی نیز افزایش یافته و لذا احتمال وقوع شکست هیدرولیکی نیز کمتر می‌شود. بنابراین می‌توان ضخیم‌تر کردن هسته را یک راهکار برای پیشگیری از وقوع شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی پیشنهاد نمود.

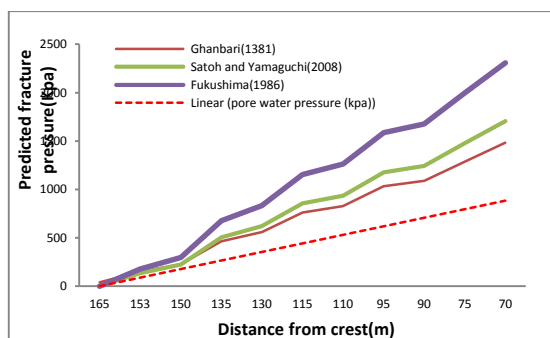
#### ۸- احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در کف هسته

در شکل (۲۱) امکان وقوع شکست هیدرولیکی برای هر دو خاک CH و CL در کف هسته بر اساس معیار برشی قنبری (۱۳۸۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بخش نسبتاً قابل-توجهی از کف هسته برای خاک CL، مستعد شکست هیدرولیکی



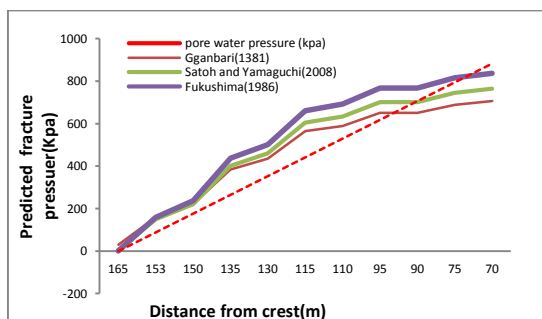
شکل ۲۲- مقایسه فشار شکست هیدرولیکی برای خاک CH در

مرحله آبیگری اولیه در مقطع A-A



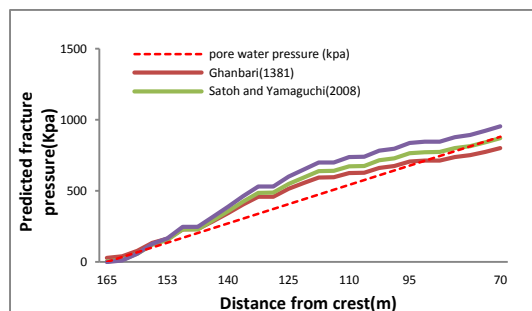
شکل ۲۳- مقایسه فشار شکست هیدرولیکی برای خاک CH در

مرحله تراوش پایدار در مقطع A-A



شکل ۲۴- مقایسه فشار شکست هیدرولیکی برای خاک CL در

مرحله آبیگری اولیه در مقطع A-A



شکل ۲۵- مقایسه فشار شکست هیدرولیکی برای خاک CL در

مرحله تراوش پایدار در مقطع A-A

شکست هیدرولیکی را به صورت زیر بیان کرد (Fukushima, ۱۹۸۶):

$$P_f = m\sigma_c \quad (۲)$$

که در آن  $\sigma_c$  تنش همه‌جانبه است و ضریب  $m$  بین ۱٫۳ تا ۱٫۶ تغییر می‌کند. در این تحقیق برای خاک بحرانی (CL) مقدار  $m$  برابر ۱٫۳ و برای خاک منتخب (CH) مقدار  $m$  برابر ۱٫۶ در نظر گرفته شده است.

### ۹-۲- مطالعات Satoh و Yamaguchi (۲۰۰۹)

این محققین از مصالح یک سد در حال ساخت برای انجام آزمایش‌های شکست هیدرولیکی استفاده نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که فشار شکست هیدرولیکی با فشار دورگیر دارای رابطه خطی بوده و در نهایت این محققین رابطه زیر را برای محاسبه فشار شکست هیدرولیکی پیشنهاد نمودند.

$$P_f = m\sigma_3 + n \quad (۳)$$

که در این رابطه  $m$  و  $n$  ثابت‌هایی هستند که مقادیر آن‌ها برای شرایط مختلف متفاوت است. در جدول (۲) خلاصه نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۲- ضرایب  $m$  و  $n$  برای خاک‌های مختلف

$n$ (KN/m <sup>2</sup> )	$m$	نوع خاک
-۱۴	۱/۷۲	بزرگ مقیاس با حداکثر اندازه ۲ میلی‌متر
۳۴	۱/۲۹	بزرگ مقیاس با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر
-۰/۸	۱/۱۷	مقیاس متوسط با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر
۴/۶	۱/۱۸	مقیاس متوسط با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر

در این پژوهش با توجه به اندازه دانه‌ها، برای هر دو خاک منتخب و بحرانی مقادیر  $m$  و  $n$  به ترتیب برابر ۱/۱۸ و ۴/۶ در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (۲۲) تا (۲۵) فشار شکست هیدرولیکی بر اساس روابط ارائه شده توسط محققین مختلف برای هر دو نوع خاک CH و CL محاسبه شده است (Satoh و Yamaguchi, ۲۰۰۹).

همان‌گونه که در نمودارهای فوق نیز مشاهده می‌شود، برای خاک CL هم در مرحله آبیگری اولیه و هم در مرحله تراوش پایدار، نقاطی از پایین دست هسته مستعد شکست هیدرولیکی می‌باشد در حالی که با توجه به معیارهای سایر محققین نیز خاک CH از احتمال شکست هیدرولیکی چندانی برخوردار نمی‌باشد.



۲) احتمال گسیختگی شکست هیدرولیکی در مقطع A-A (وسط هسته) نسبت به مقطع B-B (خط مایل کنار هسته) برای هر دو خاک CL و CH در مرحله آبیگری اولیه و تراوش پایدار بیشتر است.

۳) برای اطمینان از صحت کار مدل‌سازی‌ها، نتایج به‌دست آمده برای خاک بحرانی (CL) و خاک منتخب (CH) با استفاده از معیارهای دیگر مثل Fukushima (۱۹۸۶) و Yamaguchi (۲۰۰۹) مقایسه شد و نتایج این مقایسه نیز نشان داد که احتمال شکست هیدرولیکی در خاک بحرانی نسبت به خاک منتخب بیشتر است.

۴) مقایسه معیارهای استفاده شده در پیش‌بینی فشار شکست هیدرولیکی نشان داد که در اغلب موارد معیار Fukushima خوشبینانه‌ترین و معیار قنبری محافظه‌کارانه‌ترین نتایج را داراست. نکته قابل توجه آن است که معیار Satoh و Yamaguchi (۲۰۰۹) برای تنش‌های کم، نتایج درستی به‌دست نمی‌دهد زیرا ضریب  $n$  برای خاک‌های ریزدانه منفی بوده و در تنش‌های کم، فشار شکست هیدرولیکی منفی می‌باشد که صحیح نیست.

۶) با باریک‌تر شدن هسته فشار شکست هیدرولیکی کاهش یافته و لذا احتمال وقوع شکست هیدرولیکی نیز بیشتر خواهد شد.

#### ۱۱- مراجع

- Bandab Consulting Engineering, "Development of Water Resource of Hajilar Dam River in 2th Phase Studies", Regional Water Company of East Azarbayjan, 2008.
- Beiranvand B, "Study of hydraulic failure mechanism in the core of Eyvashan earth dam with the effect of pore water pressure and arching", Journal of Stress Analysis, 2020, 4 (2). <https://doi.org/55-67, 10.22084/JRSTAN.2020.20022.1110>.
- Cornet FH, Doan ML, Fontbonne F, "Electrical imaging and hydraulic testing for a complete stress determination, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40, 2-6. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00109-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00109-6)
- Fukushima S, "Hydraulic fracturing criterion in the core of fill dam", Report of Fujita Kogyo Technical Institute, 1986, 22, 131-136.
- Ghanbari A, Shams Rad SH, "Development of an empirical criterion for predicting the hydraulic fracturing in the core of earth dams", Acta Geotechnica 10(2), 243-254 2015. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0263-2>
- Ghanbari A, "Principles of Earth Dams Engineering", Kharazmi University Publisher, Tehran, 2015.
- Gybert B, Andrew P, "Simulating hydraulic fracturing preconditioning in mines with the material point method", Journal of Applied Geophysics, 2021, 195, 104471. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104471>.
- Haeri SM, Faghihi D, "Predicting hydraulic fracturing in Hyttejuvet dam", Sixth International Conference on

لذا با در نظر گرفتن معیارهای سایر محققین نیز، خاک CL به‌عنوان خاک بحرانی و در نقاطی مستعد شکست هیدرولیکی شناخته شده و استفاده از آن در هسته سد توصیه نمی‌شود. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که معیار Fukushima (۱۹۸۶) خوشبینانه‌ترین معیار ارائه شده برای تخمین فشار شکست هیدرولیکی می‌باشد. معیارهای قنبری (۱۳۸۱) و Satoh و Yamaguchi (۲۰۰۹) نیز تقریباً مقادیر مشابهی را برای فشار شکست به‌دست می‌دهد. نکته قابل توجه آن است که معیار Satoh و Yamaguchi (۲۰۰۹) برای تنش‌های کم نتایج درستی به‌دست نمی‌دهد زیرا ضریب  $n$  برای خاک‌های ریزدانه منفی بوده و در تنش‌های کم فشار شکست هیدرولیکی منفی می‌باشد که صحیح نیست.

در این قسمت جهت مقایسه بیشتر، ضریب اطمینان وقوع شکست هیدرولیکی بر اساس معیار برشی قنبری برای هر یک از خاک‌ها در مرحله آبیگری اولیه و تراوش پایدار محاسبه شده و متوسط مقادیر آن در جدول (۳) ارائه شده است. این ضریب اطمینان در واقع نسبت فشار شکست به فشار آب حفره‌ای بوده و برای خاک‌های مختلف در مراحل مختلف و در معیارهای مختلف متفاوت است. محاسبه این ضریب اطمینان برای مقایسه نتایج به‌دست آمده از مطالعات محققین مختلف و بررسی امکان وقوع شکست هیدرولیکی کاربرد دارد.

#### جدول ۳- متوسط مقادیر ضریب اطمینان وقوع شکست

هیدرولیکی بر اساس معیار قنبری (۱۳۸۱) برای سد حاجی‌لر

نوع خاک	آبیگری اولیه			
	مقطع		تراوش پایدار	
	B-B	A-A	B-B	A-A
CL	۲/۵۸	۱/۹۴	۲/۴۵	۱/۳۶
CH	۲/۷	۲/۰۴	۲/۶۲	۱/۷۳

با توجه با جدول (۳) مشاهده می‌شود که مقادیر ضرایب اطمینان در مرحله آبیگری اولیه نسبت به مرحله تراوش پایدار کمتر بوده و احتمال شکست هیدرولیکی بیشتر است. لذا زمان آبیگری مخزن سد محتمل‌ترین زمان وقوع ترک هیدرولیکی است. همچنین احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در مقطع وسط هسته (A-A) نسبت به مقطع کناری هسته (B-B) بیشتر است.

#### ۱۰- نتیجه‌گیری

(۱) مقایسه نشان داد که در خاک CL بیشترین امکان وقوع شکست وجود داشته و همچنین مرحله آبیگری اولیه از تراوش پایدار بحرانی‌تر است.

- Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri University of Science and Technology, 2008.
- Jaworski GW, Duncan JM, Seed HB, "Laboratory study of hydraulic fracturing", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1981, ASCE, 107 (6), 713-732. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001147>
- Jian CH, Kuaga Sheng ZH, Han L, "Laboratory investigation on hydraulic fracture propagation in sandstone-mudstone-shale layers", *Petroleum Science*, 2022, 19 (4), 1664-1673. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.03.018>
- Khamesi O, Mirghasemi A, "Investigation of hydraulic fracturing in the core of earth dams", *Civil and Survey Engineering*, 2008, 44 (2), 181-191.
- Lto T, "Effect of pore pressure gradient on fracture initiation in fluid saturated porous media", *Institute of Fluid Science*, 2007, Tohoku University, 1-4.
- Mori A, Tamura M, "Hydrofracturing pressure of cohesive soils, *Soils and Foundations*", Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1987, 14-22. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.27.14>
- Nathan SH, Armando D, "A three-dimensional generalized finite element method for simultaneous propagation of multiple hydraulic fracture from a wellbore", *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 108360 <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108360>
- Patel SM, Sandergeld CS, Rai, "Laboratory Study of Hydraulic Fracturing by Cyclic Injection", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2017, 95, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.03.008>
- Poudel S, Abby SJ, Ngambi S, "Mechanism of hydraulic fracturing in cohesive zone of embankment dam core-A Review", *International of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 2017, 8 (7), 1202-1213.
- Sadettin, Topchu, "Estimation of Hydraulic Fracturing Potential for Clay-Core Rockfill Dams and an Example: Çınarcık Dam", *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology*, 2018.
- Satoh H, Yamaguchi Y, "Laboratory hydraulic fracturing tests for core materials using large size hollow cylindrical specimens", *The International Symposium on Rockfill Dams*, 2009.
- Shams Rad Shima, "Numerical study of hydraulic fracturing phenomena in the core of earth dams", MSc Thesis, Kharazmi University, Tehran, 2011.
- Solava, Delatte, "Teton Dam Failure Case Study", *Proceedings of the 3th ASCE Forensice Congress*, San Diego, California, 2003.

## EXTENDED ABSTRACT

# Effect of Dimensions and Shape of Clay Core Section of Earth Dams on Reliability Coefficient of Hydraulic Failure

Mostafa Zalnejad <sup>a</sup>, Seyed Shahab Emamzadeh <sup>b,\*</sup>,

<sup>a</sup> MSc Student of Civil Engineering, University of Kharazmi, Tehran, 1491115719, Iran

<sup>b</sup> Faculty of Civil Engineering, University of Kharazmi, Tehran, 1491115719, Iran

**Received:** 04 February 2023; **Review:** 16 May 2023; **Accepted:** 07 June 2023

### Keywords:

Earth dams, Hydraulic fracturing, Finite element, Impermeable core, Seepage.

## 1. Introduction

Hydraulic fracturing can occur in the fine-grained core of earthen dams. This phenomenon often occurs during the first water intake of the dam when the water pressure suddenly increases. Hydraulic fracturing in Erath dam has investigated laboratory by many researchers (Jaworski, 1981; Jian, 2022; Patel, 2017). In this research, the aim is to investigate numerically the phenomenon of hydraulic fracture and the effect of the dimensions and shape of the clay core section of the Hajiler Chai Dam (an earthen dam with impermeable clay core) located in East Azarbayjan province on the reliability coefficient of hydraulic fracture. For this purpose, first, using Geo-Studio, the phenomenon of hydraulic fracturing has been investigated in two sections in the middle of the core (A-A) and the upstream side of the core (B-B) of the dam for two types of materials CL and CH. Analyzes have been done in the stages of the end of construction, initial dewatering and steady state seepage, and the stages of dam construction have also been considered in the modeling. Also, the possibility of hydraulic fracture in thicker cores and the bottom of the core was also investigated. Finally, the reliability coefficient of hydraulic failure occurrence has been quantitatively calculated for each of the soils in stages and sections and with different criteria, and the suitable soil has been suggested for use in the dam core.

## 2. Methodology

### 2.1. Modeling

The modeling of this dam has been done in Geo-Studio software in two-dimensional form and in plane strain conditions. The analysis performed for this dam is Couple analysis of deformation and pore water pressure. The foundation of this dam is considered to be non-deformable. The dam shell is modeled elastically and the clay core of the dam is modeled fully elastic-plastic using the Mohr-Coulomb behavior model. Due to the high permeability of the shell material, it is assumed that pore water pressure will not be created in the shell during construction. In the following, 21 layers have been considered to simulate the staged construction of the dam.

### 2.2. End of the construction phase

At this stage of the analysis, because the reservoir has not yet been dewatering, unsaturated parameters and wet specific gravity are used for all materials. At this stage, because there is no water pressure for hydraulic

cracking, there is no possibility of hydraulic failure. Therefore, this stage of analysis is done only to check the state of stresses and changes in the dam locations and in the state of total stress.

### 2.3. Initial dewatering stage and steady state

Considering that reservoir dewatering often takes place during a rainy season and on the other hand, the rate of dewatering creates undrained conditions in the core, with these interpretations it is useful to simulate the behavior of earthen dams in the initial dewatering analysis of core soil parameters. It is considered between UU and CD.

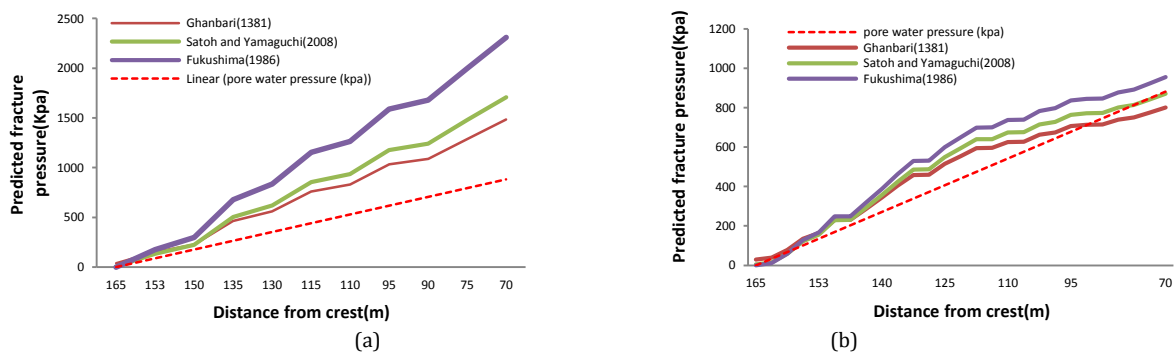
### 2.4. Hydraulic fracture criteria

Based on the simple tensile criterion, if the total stress in an element is at least ( $3\sigma$ ) less than the pore water pressure (U) created in that element ( $U > 3\sigma$ ), it is assumed that hydraulic failure occurs in that element. The following experimental relationship shows the shear criterion of Ghanbari (2001) for predicting hydraulic fracture:

$$P_f = m\sigma_h + n \tag{1}$$

## 3. Results and discussion

The occurrence of hydraulic cracks in each element of the core of homogeneous earthen dams depends on the stress state of the mentioned element. Therefore, the presence of geometric heterogeneity, loading and materials are effective in this matter. According to the analyzes and graphs, it was observed that the probability of hydraulic failure is higher for CL soil than for CH soil. Therefore, CL soil should be selected as critical soil and CH soil as selected soil for the construction and implementation of the core. To ensure the correctness of the selected options as critical and selected borrows, the results obtained for these two borrows have been compared with the results of research by other researchers, including Fukushima (1986) and Satoh (2009).



**Fig. 1.** (a) Comparison of hydraulic fracture pressure for CH soil in the stage of steady state in section A-A, (b) Comparison of hydraulic fracture pressure for CL soil in the stage of steady state in section A-A

As can be seen in the above graphs, for CL soil, some points downstream of the core are prone to hydraulic failure. While according to the criteria of other researchers, CH soil does not have much possibility of hydraulic failure. Therefore, taking into account the criteria of other researchers, CL soil is known as critical soil and prone to hydraulic failure, and its use in the dam core is not recommended.

In this part, for further comparison, the reliability coefficient of hydraulic failure occurrence is calculated based on the Ghanbari shear criterion for each of the soils in the stage of initial dewatering and steady state, and its average values are presented in Table 1. This reliability factor is actually the ratio of fracture pressure to pore water pressure and it is different for different soils in different stages and in different criteria.

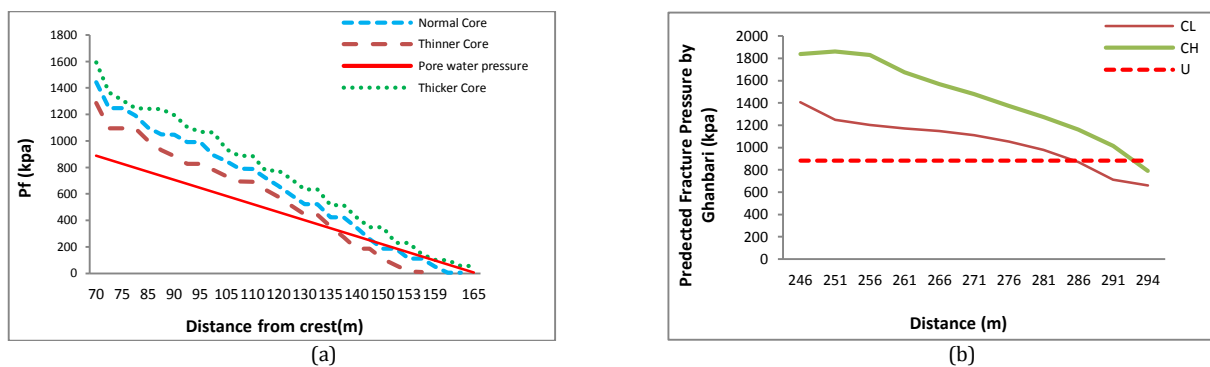
**Table 1.** Average values of reliability coefficient of hydraulic failure occurrence based on Ghanbari criteria (2001) for Hajiler Dam in Tabriz

Steady state	Initial		dewatering	Soil type
	Section			
B-B	A-A	B-B	A-A	
2.58	1.94	2.45	1.36	CL
2.7	2.04	2.62	1.73	CH

According to Table 1, it can be seen that the values of reliability coefficients in the initial dewatering stage are lower compared to the steady state and the probability of hydraulic fracturing is higher. Therefore, dewatering of the dam reservoir is the most likely time of hydraulic fracturing.

### 3.2. Investigating the effect of core geometry on hydraulic fracture pressure

In this section, by changing the geometry of the core, analyzes have been performed for thicker and thinner core than the main core for CH soil. According to Fig. (2-a), it can be concluded that with the thinning of the core, the hydraulic fracture pressure will decrease and therefore the probability of hydraulic fracture will also increase. Also, in Fig. (2-b), the possibility of hydraulic failure for both CH and CL soils at the bottom of the core is presented based on the simple tensile criterion. As can be seen, a relatively significant part of the core floor for CL soil is prone to hydraulic failure. However, for CH soil, there is a possibility of failure at only one point in the downstream.



**Fig. 2.** (a) Comparison of fracturing pressure (kpa) in the dam considering thinner and thicker core based on simple tensile criterion (CH), (b) Investigating the possibility of hydraulic failure at the bottom of the core based on the Ghanbari shear criterion (2009)

## 4. Conclusions

The comparison showed that in CL soil there was the highest possibility of failure and also the initial dewatering stage is more critical than steady state. The probability of hydraulic fracture rupture in the A-A section (middle of the core) is higher than in the B-B section (oblique line next to the core) for both CL and CH soils in the stage of initial dewatering and steady state. To ensure the correctness of the modeling work, the results obtained for critical soil (CL) and selected soil (CH) were compared using other criteria such as Fukushima (1986) and Yamaguchi (2009) and the results of this comparison also showed that the probability Hydraulic fracture in critical soil is more than selected soil. The comparison of the criteria used in predicting the hydraulic fracture pressure showed that in most cases the Fukushima criterion has the most optimistic results and the Ghanbari criterion has the most conservative results. It is noteworthy that the criterion of Sato and Yamaguchi (2009) does not give correct results for low stresses because the coefficient n is negative for fine-grained soils and in low stresses, the hydraulic fracture pressure is negative, which it's not correct. Also, the results showed that with the narrowing of the core, the hydraulic fracture pressure is reduced and therefore the probability of hydraulic fracture will also increase.

## 5. References

- Jaworski GW, Duncan JM, Seed HB, "Laboratory study of hydraulic fracturing", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1981, ASCE, 107 (6), 713-732. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001147>
- Jian CH, Kuaga Sheng ZH, Han L, "Laboratory investigation on hydraulic fracture propagation in sandstone-mudstone-shale layers", *Petroleum Science*, 2022, 19 (4), 1664-1673. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.03.018>
- Patel SM, Sandergeld CS, Rai, "Laboratory Study of Hydraulic Fracturing by Ciclic Injection", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2017, 95, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.03.008>
- Satoh H, Yamaguchi Y, "Laboratory hydraulic fracturing tests for core materials using large size hollow cylindrical specimens", *The International Symposium on Rockfill Dams*, 2009.
- Fukushima S, "Hydraulic fracturing criterion in the core of fill dam", *Report of Fujita Kogyo Technical Institute*, 1986, 22, 131-136.