

Investigating the possibility of hydraulic fracture in the core of earth dams with criteria based on critical pressure

Mostafa Zalnejad¹, Seyed Shahab Emamzadeh^{2*}

1- M.Sc. Student, Civil Engineering Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

ABSTRACT

One of the most important hazards that threaten earth dams is hydraulic failure. This phenomenon often occurs during the first flooding of the dam, when the water pressure rises suddenly. There are several ways to study hydraulic fracture and damage in a dam core. In this paper, the phenomenon of hydraulic fracture and seepage in Hajilerchai dam body in Tabriz has been investigated. For this purpose, first, using Geo-Studio, which is a program based on finite element, investigates the phenomenon of hydraulic failure in the two middle sections of the core and the upstream side of the dam core for two types of clay with low and high plasticity. The phenomenon has been identified. In modeling, layer-by-layer construction of the dam is also considered and the weight of the layers is taken into account in calculating stresses and deformations. As a result of these evaluations, high plasticity clay was selected as the selected soil and low plasticity clay was selected as the critical soil for use in the dam core. Also, Fukushima criteria and Ghanbari criteria had the most optimistic and conservative data, respectively, and the possibility of hydraulic failure in parts of the dam core was identified as possible.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 April 2022

Revise Date: 15 July 2022

Accept Date: 30 July 2022

Keywords:

Hydraulic Fracture

Hydraulic cracking

Earthen dam

Hajilerchai dam

Geo – Studio

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.333713.2755>

*Corresponding author: seyed shahab emamzadeh

Email address: shemamzadeh@khu.ac.ir

بررسی امکان وقوع شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی با معیارهای مبتنی بر فشار بحرانی

مصطفی زال نژاد^۱، سیدشهاب امامزاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، ایران، تهران

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 صورت ناگهانی افزایش می‌یابد، رخ می‌دهد. برای مطالعه ترک هیدرولیکی در هسته سد روش‌های مختلفی وجود دارد. در این راستا در مطالعه حاضر به بررسی پدیده شکست هیدرولیکی در سد تبریز پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از مجموعه *Geo-Studio* که برنامه‌ای مبتنی بر المان محدود است، به بررسی پدیده شکست هیدرولیکی در دو مقطع وسط هسته و وجه بالادست هسته سد برای دو نوع خاک رس با خاصیت خمیری کم و زیاد پرداخته و نواحی مستعد این پدیده شناسایی شده است. در شبیه‌سازی‌ها ساخت لایه به لایه سد نیز در نظر گرفته شده و وزن لایه‌ها در محاسبه تنش‌ها و تغییر شکل‌ها لحاظ گردیده است. در نتیجه این ارزیابی‌ها خاک رس با خاصیت خمیری زیاد به عنوان خاک منتخب و خاک رس با خاصیت خمیری کم به عنوان خاک بحرانی برای استفاده در هسته سد انتخاب گردیدند. جهت مقایسه بیشتر، ضریب اطمینان وقوع شکست هیدرولیکی برای هر یک از خاک‌ها محاسبه شده و نتایج نشان می‌دهد که میانگین مقادیر ضرایب اطمینان وقوع شکست هیدرولیکی در مراحل و مقاطع مختلف هسته برای خاک‌های *CL* و *CH* به ترتیب ۱٫۳۵ و ۱٫۵۸ است. همچنین مقادیر ضرایب اطمینان در مرحله آبیگری اولیه نسبت به مرحله تراوش پایدار کمتر بوده لذا آبیگری مخزن سد محتمل‌ترین زمان وقوع ترک هیدرولیکی است. به همین ترتیب با توجه به مقادیر ضرایب اطمینان حاصله برای سد مورد مطالعه نشان می‌دهد که احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در مقطع وسط هسته نسبت به مقطع کناری هسته بیشتر است. نهایتاً معیارهای فوکوشیما و قنبری به ترتیب خوش‌بینانه‌ترین داده‌ها و محافظه‌کارانه‌ترین داده‌ها را دارا بوده و احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در بخش‌هایی از هسته سد محتمل تشخیص داده شد.

کلمات کلیدی: شکست هیدرولیکی، ترک هیدرولیکی، سد خاکی، سد حاجیلرچای، نرم‌افزار ژئواستدیو

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.333713.2755	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.333713.2755	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۱/۰۵/۰۸	۱۴۰۱/۰۵/۰۸	۱۴۰۱/۰۴/۲۴	۱۴۰۱/۰۱/۱۶
			سیدشهاب امامزاده shemamzadeh@khu.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

پایداری سدها یکی از اصولی است که امروزه در اولین روزهای هر پروژه سدسازی روی آن بحث می‌شود. شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی به دلایل مختلفی از جمله ترک خوردگی، قوس زدگی و رگاب اتفاق می‌افتد [۱]. شکست هیدرولیکی می‌تواند در هسته‌ی ریزدانه سدهای خاکی نیز رخ دهد [۲]. این پدیده اغلب در زمان اولین آبیگری سد وقتی که فشار آب به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد، رخ می‌دهد. کاهش تنش مؤثر قائم در هسته سد تسهیل‌کننده وقوع این پدیده است. اغلب در سدهای خاکی مصالح هسته نسبت به مصالح پوسته سختی کمتری دارند 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 [۳].

قدیمی‌ترین تحقیقات پیرامون شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی مربوط به اوایل نیمه دوم قرن بیستم است. لوفکوئیست^۱ [۴] در سال ۱۹۵۵ احتمالاً اولین کسی است که مفهوم قوس زدگی در هسته سدهای خاکی را مطرح کرد و امکان وقوع ترک هیدرولیکی در هسته را به علت قوس زدگی که منجر به شکست هیدرولیکی می‌گردد مورد بحث قرار داد. پس از وی جارنسل^۲ و توربالا^۳ [۵] در سال ۱۹۶۸ به دنبال تحقیقاتی که پیرامون دلایل ترک خوردگی در سد هیته‌جووت داشتند مکانیسمی برای وقوع شکست هیدرولیکی پیشنهاد کردند. نهایتاً شرارد^۴ [۲] در سال ۱۹۷۲ ادعا کرد که فشار آب مخزن سد که در وجه بالادست هسته اثر می‌کند می‌تواند باعث باز شدن ترک‌های بسته و یا ایجاد ترک‌های جدید گردد. وی معتقد بود که شکست هیدرولیکی در هسته وقتی اتفاق می‌افتد که تنش کل اصلی حداقل (σ_3) در یک ارتفاع خاص از هسته کمتر از فشار آب مخزن در همان ارتفاع گردد. پس از ارائه نظرات پراکنده مذکور توسط محققین و با وقوع چندین ترک خوردگی هیدرولیکی در سدهای خاکی تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی پیرامون شکست هیدرولیکی از رونق بیشتری برخوردار گردید و چندین مطالعه گسترده در این زمینه صورت گرفت که از جمله می‌توان به مطالعات نوباری و همکاران^۴ [۶]، جروم^۵ [۷]، جاورسکی^۶ و همکاران [۸]، کمک پناه و یانایسوا^۷ [۹]، قنبری [۱۰] و خامسی^۸ [۱۱] اشاره نمود.

امروزه پایداری سدها یکی از اصولی است که در اولین روزهای هر پروژه سدسازی روی آن بحث می‌شود. شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی به دلایل مختلفی از جمله ترک خوردگی، قوس زدگی و رگاب اتفاق می‌افتد [۱۱]. شکست هیدرولیکی می‌تواند در هسته‌ی ریزدانه سدهای خاکی نیز رخ دهد [۱۲]. این پدیده اغلب در زمان اولین آبیگری سد وقتی که فشار آب به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد، رخ می‌دهد. کاهش تنش مؤثر قائم در هسته سد تسهیل‌کننده وقوع این پدیده است. اغلب در سدهای خاکی مصالح هسته نسبت به مصالح پوسته سختی کمتری دارند 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 [۱۳]. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی وقوع ترک هیدرولیکی در هسته سد وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در سه گروه کلی تقسیم‌بندی کرد [۱۴]. دسته اول استفاده از روابط تجربی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی یا میدانی است [۱۵]. این روابط، فشار آب ایجادکننده ترک را برحسب سطح تنش در خاک مشخص می‌کنند. با مقایسه این فشار با فشار آب در المان‌های بالادست هسته، می‌توان وقوع شکست را بررسی کرد. از این دسته روابط می‌توان به روابط قنبری [۱۰]، جاورسکی و همکاران [۸] و موری^۹ [۱۳] اشاره کرد. گروه دوم روابط تئوریک هستند که برای مدل‌های پیشنهادشده در نظریه خمیری

¹ Lofquist

² Kjaernsli and Torblla

³ Sherard

⁴ Nobari

⁵ Bjerrum

⁶ Jaworski

⁷ Yanagisawa

⁸ Satoh and Yamgichi

⁹ Mori

توسعه یافته‌اند. این روابط مانند روابط گروه اول، فشار آب بحرانی را ارائه می‌کنند [۱۴]. روابط کمک پناه [۹] و لو^{۱۰} [۱۵] در این دسته قرار می‌گیرند. دسته سوم استفاده از تئوری‌های مکانیک شکست است که موضوع بحث این مقاله نیست.

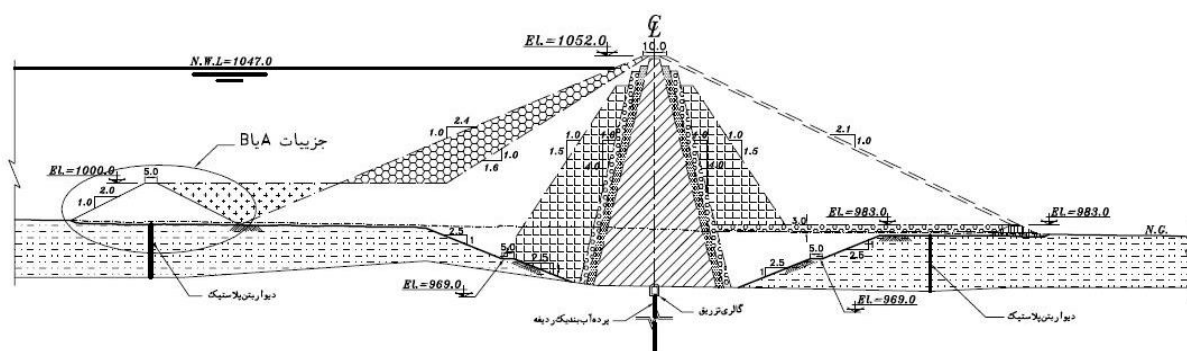
خوشبختانه در ایران گزارشی از خرابی کامل یک سد در اثر شکست هیدرولیکی منتشر نشده است، ولی واقعیت مطلب آن است که در بسیاری از موارد نشت آب از پی و بدنه سدها بیش از مقدار پیش‌بینی شده بوده که این مورد حکایت از وقوع خرابی در درون سد دارد. متأسفانه به‌رغم اهمیت زیاد شناسایی پدیده‌های محتمل در خرابی قسمت‌های آب‌بند سد و جلوگیری از وقوع ترک‌خوردگی هیدرولیکی، به‌اندازه کافی به این موضوع توجه نشده است. بر همین اساس هر از چند گاهی خبرهایی از وقوع اختلالاتی در بهره‌برداری این سدها به گوش می‌رسد. در تحقیق حاضر سعی بر آن است که از سناریوهای مختلفی برخلاف مطالعات محققان پیشین که معمولاً از یک معیار واحد استفاده می‌کنند، جهت پیش‌بینی شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی استفاده گردد. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار Geo - Studio شبیه‌سازی عددی سد خاکی حاجیلرچای واقع شده در استان آذربایجان شرقی برای مصالح قرصه (CH و CL) انجام گرفته و احتمال وقوع شکست هیدرولیکی و فشار متناظر با آن بررسی شده است. سپس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌ها با معیارهای ارائه‌شده توسط محققین مختلف مقایسه شده و احتمال وقوع شکست در هر یک از خاک‌ها بررسی شده است. در 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. در نهایت 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- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه موردی

سد مخزنی حاجیلرچای بر روی رودخانه‌ای به همین نام از سرشاخه‌های رودخانه ارس در مدت ۱۰ سال ساخته شده و مساحت حوضه آبریز تا محل سد ۵۳۶ کیلومترمربع است که در ۱۳۵ کیلومتری شمال تبریز و ۵۰ کیلومتری شمال غربی ورزقان و ۲ کیلومتری روستای قره‌قیه قرار دارد. سد مخزنی حاجیلرچای سد خاکی با هسته ناتراوای رسی و حجم مخزن با ظرفیت ۴۸/۹ میلیون مترمکعب است که ساخت آن از سال ۱۳۸۸ آغاز شد. عمده ویژگی سد حاجیلرچای مصارف صنعتی بوده که با ظرفیت موجود، موجب بهره‌وری بالایی برای صنعت منطقه شده است و ۱۰ میلیون مترمکعب در سطح ۱۰۰۰ هکتار از اراضی دیم کم بازده را سیراب می‌کند. تأمین سالانه سه میلیون مترمکعب آب شرب، بهداشتی و کشاورزی شهرستان‌های ورزقان و خاروانا و روستاهای اطراف آن، تأمین نیازهای آبی و محیط‌زیست، کنترل سیلاب، جاذبه‌های گردشگری و اشتغال‌زایی در منطقه از دیگر مزایا و ویژگی‌های سد حاجیلرچای است [۱۶]. شکل ۱ پلان و بزرگ‌ترین مقطع این سد را نشان می‌دهد.

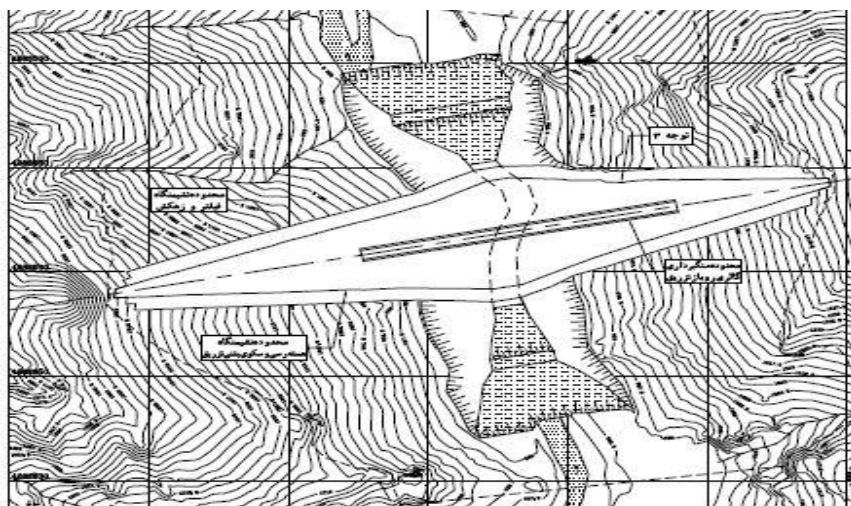
¹⁰ Lue



برش تیپ بدنه سد در امتداد بستر رودخانه

Scale=1:1000

الف



ب

شکل ۱: الف) بزرگ ترین مقطع سد حاجیلرچای ب) پلان سد حاجیلرچای

۲-۲- معرفی مدل نرم افزاری Geo-Studio

نرم افزار Geo-Studio یک برنامه عددی دو بعدی به روش اجزای محدود است که برای تحلیل مسائل مهندسی ژئوتکنیک نوشته شده است. در این نرم افزار امکان انجام تحلیل های تنش - کرنش، جریان و تراوش وجود دارد. همچنین تحلیل پایداری شیروانی ها، پایداری سدهای خاکی و تحلیل دینامیکی سازه های ژئوتکنیکی هم در این نرم افزار انجام می شود. در محیط این نرم افزار می توان مسائل چند جزئی را با تعریف هندسه هر قسمت و اختصاص مصالح به آن ها، شبیه سازی و تحلیل کرد. نرم افزار مذکور این توانایی را دارد تا مسائل را به روش های استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیکی تحلیل کند. همچنین این نرم افزار می تواند توابع رفتاری زمانی و مکانی مانند تخلیه و پر شدن سریع مخازن را شبیه سازی کند. این نرم افزار شامل قسمت های σ/w برای آنالیز تنش-کرنش، $Seep/w$ برای آنالیز جریان تراوش، $Slope/w$ برای آنالیز پایداری شیب، $Quake/w$ برای آنالیز دینامیکی، $Temp/w$ برای آنالیز توزیع دما در خاک، $Ctran/w$ برای آنالیز توزیع آلاینده ها در خاک و $Vadose/w$ برای آنالیز اثر شرایط محیطی (از قبیل خورشید، گیاهان، بارش و ...) خاک است. البته در نسخه های جدید این نرم افزار به این برنامه آنالیز Air/w نیز اضافه شده است که مربوط به مدل سازی جریان هوا است.

۲-۳- معیار کششی

در این معیار که ساده‌ترین مکانیسم بروز ترک هیدرولیکی است، چنانچه تنش کل حداقل (σ_3) از فشار آب حفره‌ای (U) 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 [۱۲].

۲-۴- معیار برشی

طبق این معیار مشخصات مکانیکی خاک در محاسبه فشار شکست هیدرولیکی وارد می‌شوند و مقدار فشار شکست دقیق‌تر از معیار کششی ساده است. قنبری [۱۰] با تحلیل نتایج آزمایش‌هایی فرمول تجربی زیر را ارائه نموده است.

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

در این رابطه P_f فشار آب بحرانی ایجادکننده ترک، σ_h تنش افقی (برحسب تنش کل) m و n عوامل تجربی متناسب با نوع خاک هستند. که پارامتر m بین ۱ تا ۱/۲ و پارامتر n بین ۰/۲ تا ۰/۴ با توجه به نوع خاک تغییر می‌نماید. مقدار این پارامتر برای انواع خاک‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: نحوه استخراج پارامترهای رابطه تجربی فشار شکست هیدرولیکی

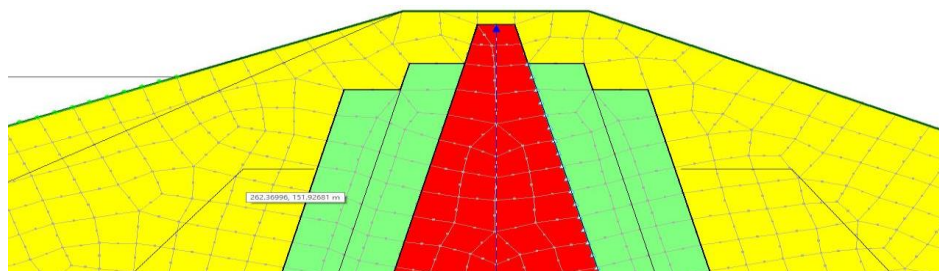
m	n (kg/cm ²)	نوع خاک
۱/۲	۰/۴	خاک‌های مخلوط درشت‌دانه با دانه‌بندی خوب، حاوی ریزدانه رسی
۱/۱۵	۰/۲۵	خاک‌های شنی حاوی ریزدانه سیلتی و رسی
۱/۰۵	۰/۲۵	خاک‌های ماسه‌ای با دانه‌بندی خوب، حاوی رس و سیلت
۱/۰	۰/۲	خاک‌های ماسه‌ای با دانه‌بندی بد، حاوی رس و سیلت
۱/۰	۰/۴	خاک‌های ریزدانه با خاصیت خمیری بالا (CH)
۱/۰۵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

در صورتی که تراکم به روش سبک (ASTM-D698) [۱۷] صورت پذیرد می‌توان مقدار m و n را به میزان ۰/۰۵ کاهش داد. همچنین در صورتی که نمونه پس از اشباع شدن مورد آزمایش قرار گرفته باشد می‌توان مقدار n را به میزان ۰/۱ تا ۰/۲ کاهش داد. در این معیار چنانچه فشار آب حفره‌ای در یک المان از مقدار فشار شکست هیدرولیکی P_f بیشتر شود، وقوع شکست هیدرولیکی محتمل است [۱۰].

۳- شبیه‌سازی عددی سد حاجیلرچای

شبیه‌سازی سد حاجیلرچای بر مبنای نرم‌افزار ژئواستدیو، به شکل دوبعدی و در شرایط کرنش مسطح انجام شده است. از بزرگ‌ترین مقطع سد برای این شبیه‌سازی استفاده شده است. مبنای حل مسئله در نرم‌افزار Geo-Studio حل معادله پیواسون حاصل از ترکیب معادله پیوستگی و قانون دارسی است. برای شبکه‌بندی مدل می‌توان از دو نوع شبکه‌بندی ساختاریافته و غیر ساختاریافته استفاده کرد. در تحقیق حاضر از شبکه‌بندی غیر ساختاریافته با المان‌های چهارضلعی و مثلثی استفاده شده است. در این حالت ابتدا المان‌های چهارضلعی توسط نرم‌افزار ایجاد می‌شود سپس هر جا که ضرورت داشته باشد نرم‌افزار از المان‌بندی مثلثی برای دقت بیشتر استفاده می‌کند. این نوع المان‌بندی برای نواحی مختلف برای هر نوع شکلی قابل استفاده است. اندازه المان‌ها ۲ متر بوده و مرتبه انتگرال‌گیری برای المان‌های چهارضلعی و مثلثی به ترتیب ۹ و ۳ است. البته باید به این نکته توجه داشت که برای المان‌های چهارضلعی با گره‌های ثانویه می‌توان از چهار نقطه نیز برای مرتبه انتگرال‌گیری استفاده نمود. معمولاً استفاده از چهار نقطه نیز نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. استفاده از

چهار نکته برای مرتبه انتگرال گیری، به صورت قابل توجهی میزان محاسبات و به تبع آن مدت زمان تحلیل را کاهش می دهد و به همین ترتیب استفاده از انتگرال گیری سه نقطه ای برای المان های مثلثی حتی اگر از گره های ثانویه استفاده نشود، می تواند موجب بهبود نتایج حاصل از نرم افزار شود. ذکر این نکته ضروری است که انتگرال گیری یک نقطه ای برای المان های مثلثی، عملکرد مناسبی برای المان ها بخصوص زمانی که المان ها در نواحی غیر اشباع واقع شده اند، ارائه نداده و لذا پیشنهاد نمی شود. شایان ذکر است که جهت همگرایی المان بندی، از گره های ثانویه نیز استفاده شده است. این کار باعث می شود که گره های ثانویه در وسط هر یک از لبه های المان های مختلف اعمال شود. همگرایی المان بندی زمانی اتفاق می افتد که با کاهش هر چه بیشتر اندازه المان ها دیگر تغییرات محسوسی در جواب مسئله مشاهده نشود. شکل ۲ المان بندی غیر ساختاریافته با گره های ثانویه را نشان می دهد.



شکل ۲: المان بندی غیر ساختاریافته با گره های ثانویه

تحلیل انجام شده برای این سد تحلیل کوپل تغییر شکل، فشار آب حفره ای است؛ بنابراین تحلیل در محیط تنش مؤثر انجام شده است. جدول های ۲ و ۳ خصوصیات مصالح بدنه سد را نشان می دهد.

جدول ۲: خصوصیات مصالح بدنه سد

پارامتر	پوسته	هسته	فیلتر	پی
وزن مخصوص (kN/m^3)	۱۸	۲۲/۲	۱۸	۲۴
چسبندگی (kPa)	۳	۱۵	۱	۱۰۰۰
زاویه اصطکاک داخلی	۳۶	۳۰	۳۴	۳۵
درصد رطوبت حجمی اشباع (W_c Saturated)	۰/۳	۰/۵	۰/۲۸	۰/۲۵
درصد رطوبت باقی مانده (Residual water content)	۱	۱۵	۰	۱

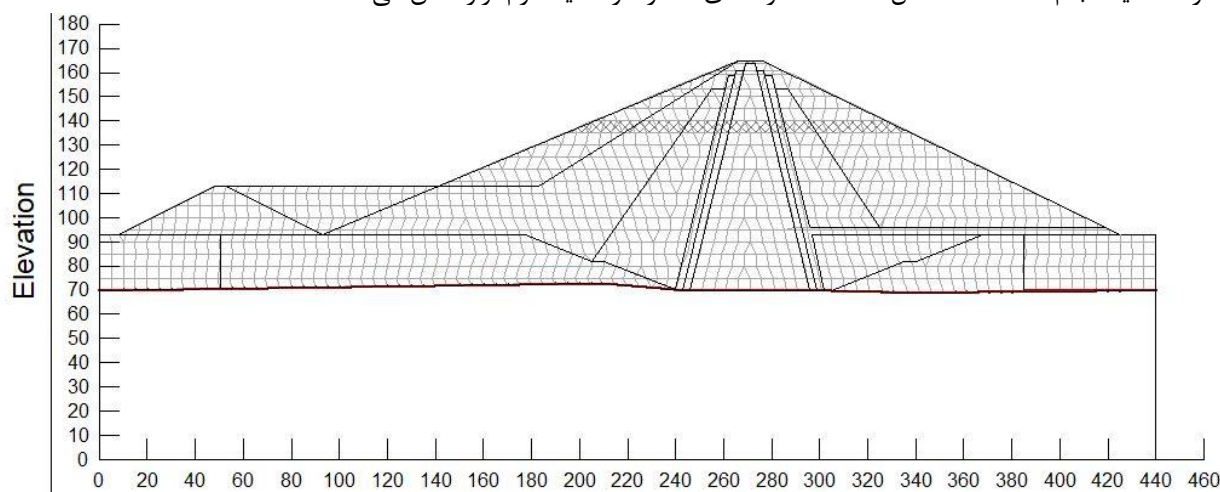
جدول ۳: ضریب نفوذ پذیری و مکش ماتریک مصالح بدنه سد

نفوذ پذیری				مکش ماتریک ^{۱۱}
(K_f)				
پی	زهکش	هسته	پوسته	
10^{-8}	$0/0001$	10^{-7}	10^{-5}	۰/۰۱
$10^{-9} 8x$	$10^{-5} 8x$	$10^{-8} 8x$	$10^{-6} 8x$	۰/۱۷۲
$10^{-10} 5x$	$10^{-6} 5x$	$10^{-9} 5x$	$10^{-7} 5x$	۳۱
10^{-11}	10^{-7}	10^{-10}	10^{-8}	۵۰۰

پی این سد صلب در نظر گرفته شده و درجات آزادی گره های مرز پایینی مدل در راستاهای افقی و قائم بسته شده اند. پوسته سد به صورت الاستیک و هسته رسی با مدل رفتاری مور- کولمب، به صورت الاستیک-پلاستیک کامل مدل گردیده است. تحلیل سد

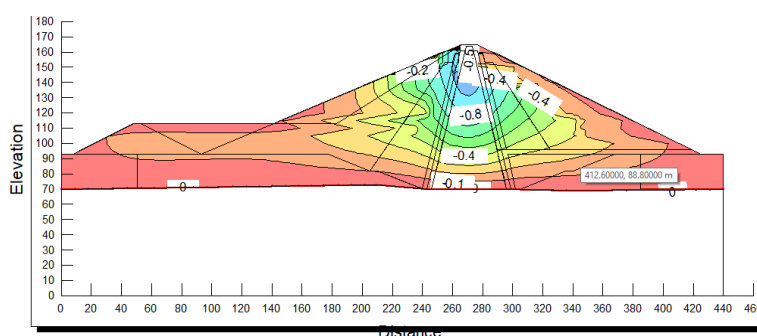
¹¹ Matric suction

حاجیلرچای در سه بخش پایان ساخت، آبدگیری اولیه و تراوش پایدار انجام گردید. به دلیل نفوذپذیری بالای مصالح پوسته چنین فرض شده که در زمان ساخت فشار آب حفره‌ای در پوسته ایجاد نخواهد شد [۱۶]. برای مدل‌سازی ساخت مرحله‌ای سد، چنین فرض می‌شود که ساخت سد در ۲۱ لایه انجام شده است. شکل ۳ ساخت مرحله‌ای سد را در محیط نرم‌افزار نشان می‌دهد.



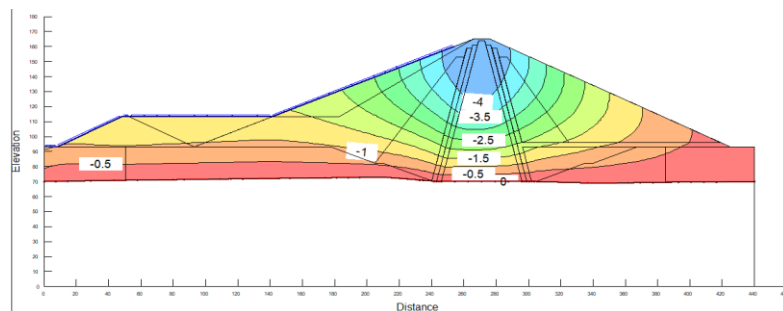
شکل ۳: مدل عددی ساخته شده در محیط نرم‌افزار Geo-Studio پس از فعال شدن خاک‌ریزی لایه ۱۴ م

نکته قابل توجه در این مرحله آن است که بدنه سد باید با تعداد مناسبی لایه‌بندی گردد. در واقع سدهای خاکی بسته به نوع خاک از تعداد زیادی لایه که معمولاً ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر ضخامت دارند، اجرا می‌شوند. با این حال در مدل عددی، امکان در نظر گرفتن کلیه این لایه‌ها به دلیل وقت‌گیر بودن فرآیند شبیه‌سازی وجود ندارد. لذا حل عددی با استفاده از لایه‌های ضخیم‌تر و در مدت‌زمان کوتاه‌تر انجام می‌گیرد. اولین بار کلاف و وودوارد^{۱۲} [۱۸] اثر ساخت لایه به لایه را برای سدهای خاکی بررسی کردند. مطالعات محققان بعدی نشان داد که در نظریه ۸ تا ۱۰ لایه کافی است. شیردل و قنبری [۱۹] نشان دادند که تعداد ۱۰ لایه برای انطباق عینی رفتار سد با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی مناسب است. اگر تحلیل بدنه سد به‌صورت 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.



شکل ۴: تغییرات نشست قائم در مدل ساخت مرحله‌به‌مرحله

¹² Clough and Woodward



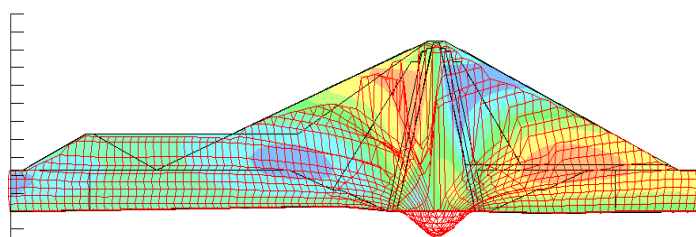
شکل ۵: تغییرات نشست قائم در مدل ساخت تک مرحله‌ای

با توجه به شکل ۴، مشخص می‌شود که حداکثر تغییر مکان قائم تقریباً در ارتفاع میانی هسته اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در مدل ساخت تک مرحله‌ای (شکل ۵)، حداکثر نشست قائم در تاج سد رخ داده و مقدار آن ۴ متر است که غیرمنطقی است. لذا جهت بررسی تنش‌ها و تغییر شکل‌ها بایستی شبیه‌سازی مرحله‌ای ساخت سد در نظر گرفته شود. البته باید به این نکته توجه داشت که ساخت سدها در واقعیت با تعداد لایه‌های بیشتری صورت می‌گیرد اما بر اساس مطالعات انجام شده در شبیه‌سازی‌های عددی تعداد لایه‌های کمتر (معمولاً ۱۰ لایه) نیز کفایت می‌کند. بنابراین در شبیه‌سازی‌های عددی سازه‌هایی همچون سدهای خاکی بایستی ساخت مرحله‌ای سد نیز در نظر گرفته شود. در صورتی که تحلیل یک سد خاکی نظیر یک ساختمان یا یک سد بتنی به صورت یک مرحله‌ای انجام شود، تنش‌ها و مخصوصاً تغییر شکل‌های حاصله غیرواقعی خواهند بود.

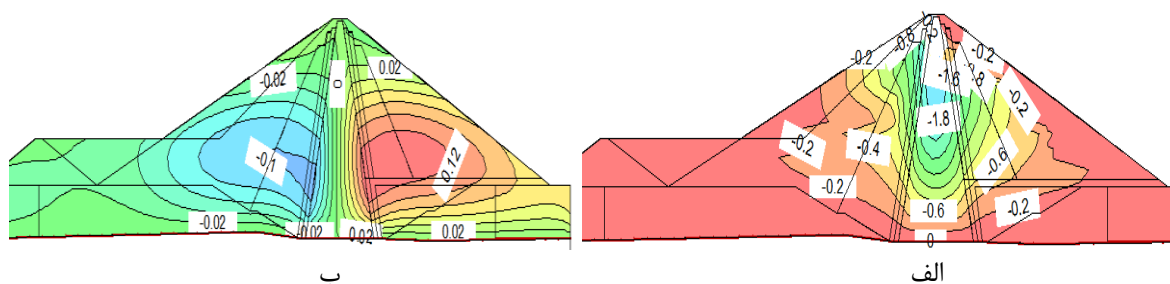
۴- نتایج تحلیل عددی

۴-۱- پایان مرحله ساخت

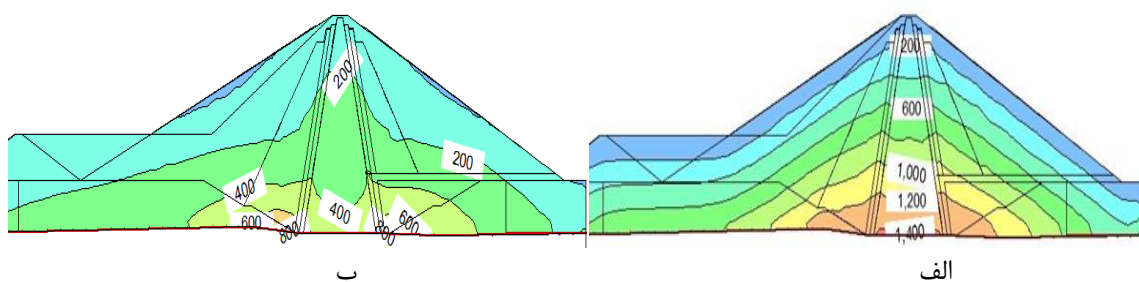
در این مرحله از تحلیل‌ها به دلیل این که مخزن هنوز آبیگیری نشده است، از پارامترهای اشباع نشده و وزن مخصوص مرطوب برای کلیه مصالح استفاده می‌شود. اما در وجه پایین دست به دلیل بارندگی مصالح می‌توانند شرایط اشباع داشته باشند. در پایان مرحله ساخت به دلیل اینکه مخزن هنوز آبیگیری نشده است و فشار آبی برای وقوع ترک هیدرولیکی وجود ندارد، احتمال وقوع شکست هیدرولیکی وجود نخواهد داشت. لذا این مرحله از تحلیل صرفاً برای بررسی وضعیت تنش‌ها و تغییر مکان‌های سد در حالت تنش کل انجام می‌گیرد. طبق طبقه‌بندی متحد یا یونیفاید USCS، دو نوع خاک برای هسته در نظر گرفته شده است رس با خاصیت خمیری کم CL که حد روانی آن کمتر از ۵۰ است و دیگری رس با خاصیت خمیری زیاد CH که حد روانی آن بیش از ۵۰ است. در شکل‌های ۶ تا ۱۱ نتایج تحلیل‌ها در پایان مرحله ساخت برای خاک CL و CH نشان داده شده است.



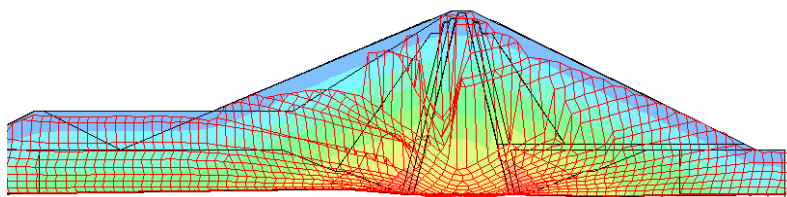
شکل ۶: شبکه‌بندی تغییر شکل یافته با بزرگنمایی ۴۵ برابر (خاکی CL)



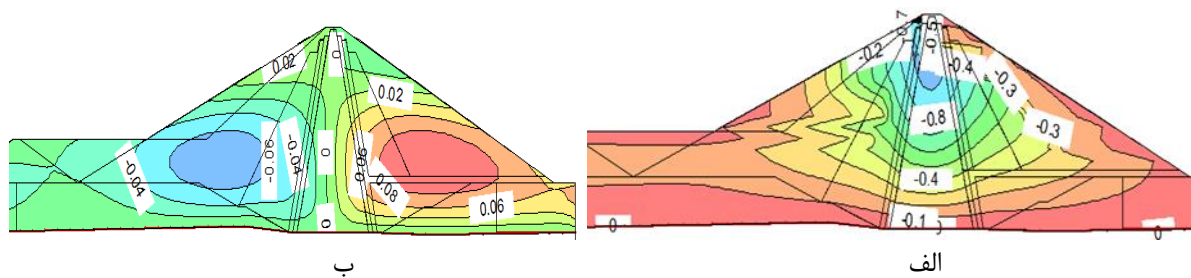
شکل ۷: تغییر شکل (الف قائم، ب) افقی در پایان مرحله ساخت برحسب متر (خاک CL)



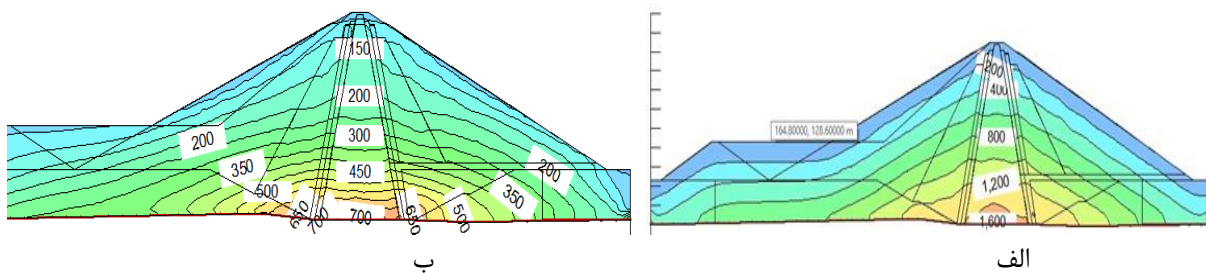
شکل ۸: تغییرات تنش‌های (الف قائم، ب) افقی در پایان مرحله ساخت (خاک CL)



شکل ۹: شبکه بندی تغییر شکل یافته با بزرگنمایی ۴۵ برابر (خاک CH)



شکل ۱۰: تغییر شکل (الف قائم، ب) افقی در پایان مرحله ساخت برحسب متر (خاک CH)

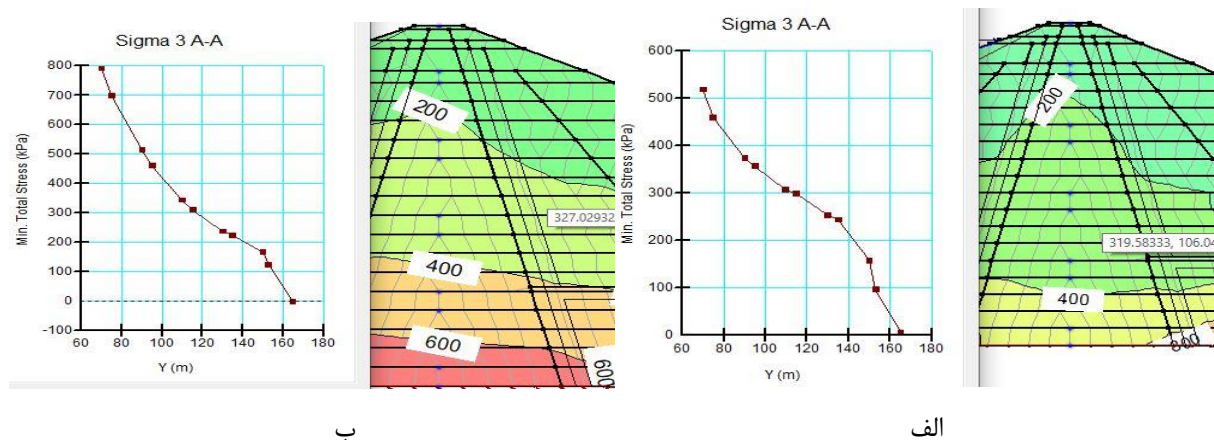


شکل ۱۱: تغییرات تنش‌های (الف قائم، ب) افقی در پایان مرحله ساخت (خاک CH)

از نقطه نظر هیدرولیکی، منظور از پدیده شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی وقوع ترک خوردگی در یک توده خاکی در اثر افزایش فشار سیال (که عموماً آب است) روی مرزهای این محیط و لبه ترک‌های موجود است. یعنی شکست هیدرولیکی به واسطه غلبه فشار سیال بر تنش مؤثر در یک توده خاکی، ایجاد می‌شود. بنابراین هر عاملی که فشار سیال را تقویت کند و یا موجب کاهش سطح تنش مؤثر گردد و یا اینکه به‌طور موضعی در خاک فرسایش ایجاد نماید، زمینه‌ساز بروز شکست هیدرولیکی است. لذا جهت رخداد شکست هیدرولیکی حضور سیال ضروری است. حال در مرحله پایان ساخت (شکل‌های ۶ تا ۱۱) به دلیل اینکه مخزن هنوز آبیگری نشده است و فشار آبی برای وقوع ترک هیدرولیکی وجود ندارد، بر اساس تحلیل هیدرولیکی 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 شبیه‌سازی مرحله‌ای ساخت سد و خاک‌ریزی به‌صورت 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 است.

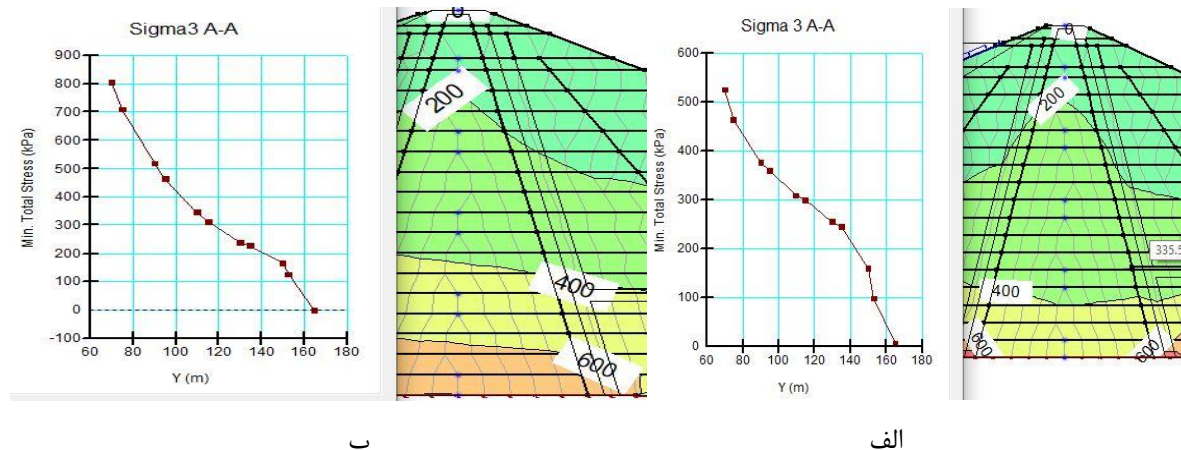
۴-۲- مرحله آبیگری اولیه و تراوش پایدار

با توجه به اینکه آبیگری مخزن غالباً در طول یک‌فصل 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 می‌شوند. 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. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تغییرات تنش کل حداقل برای خاک‌های CL و CH در مرحله آبیگری اولیه و تراوش پایدار جهت بررسی شکست هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۱۲: تغییرات تنش کل کوچکتر در مرحله آبیگری اولیه در مقطع وسط هسته الف (خاک CL)، ب (خاک CH)

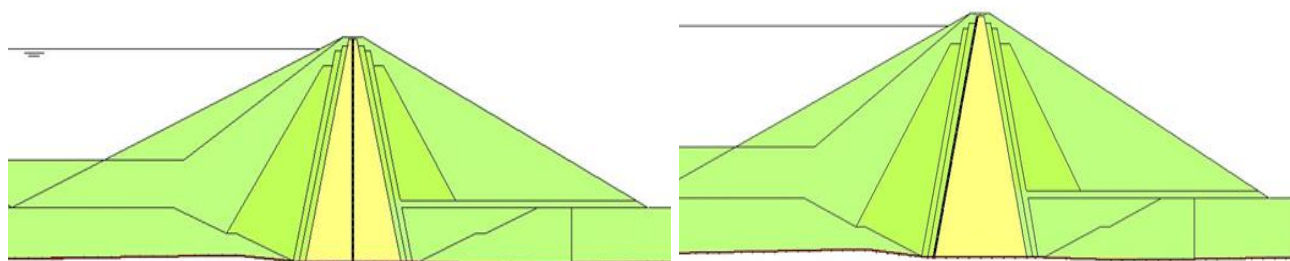
پس از گذشت چندین سال از آبیگری مخزن سد هسته به‌طور کامل اشباع شده و خط آزاد آب در درون آن تشکیل می‌گردد. در این وضعیت خاک هسته تحکیم یافته محسوب می‌شود. در این وضعیت، بارهای وارده شامل وزن بدنه سد و فشار آب مخزن است. از طرف دیگر در درون هسته فشار آب حفره‌ای به وجود آمده و با فشار آب مخزن در ارتباط است. برای پایداری هسته در این شرایط معمولاً از روش تنش‌های مؤثر استفاده می‌شود و برای پارامترهای مقاومت برشی هسته C' ، Φ' انتخاب می‌گردد. این پارامترها از آزمایش‌های تحکیم یافته زهکشی شده (CD) و یا از پوش تنش مؤثر از آزمایش‌های تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) قابل استخراج هستند.



شکل ۱۳: تغییرات تنش کل کوچک تر در مرحله تراوش پایدار در مقطع وسط هسته الف) خاک CL، ب) خاک CH

۵- بررسی امکان وقوع شکست هیدرولیکی

وقوع ترک هیدرولیکی در هر المان از هسته سدهای خاکی همگن تابع وضعیت تنش‌های المان مذکور است، باین حال عواملی که منجر به کاهش تنش در توده خاک می‌گردند [۲۰ و ۲۱] شرایط وقوع ترک خوردگی را تسهیل می‌نمایند. بنابراین وجود ناهمگنی هندسی، بارگذاری و مصالح در این امر مؤثر هستند. در این بخش برای بررسی احتمال وقوع شکست هیدرولیکی از دو معیار کششی و معیار برشی استفاده شده است. برای مراحل آبیگری اولیه و تراوش پایدار برای هر دو نوع مصالح، امکان وقوع شکست هیدرولیکی در دو مقطع وسط هسته و خط مایل کنار هسته که به صورت شماتیک در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است، ارائه می‌گردد.

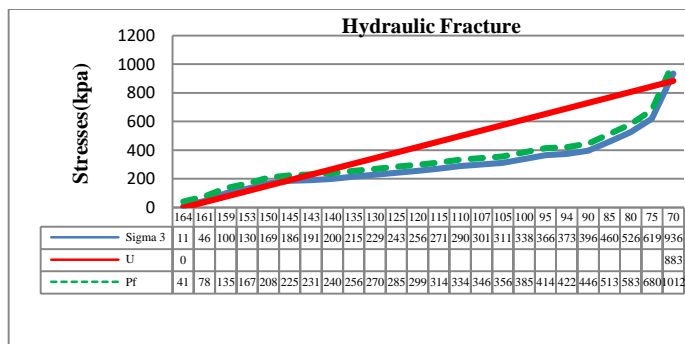


شکل ۱۴: مقطع وسط هسته (A-A)

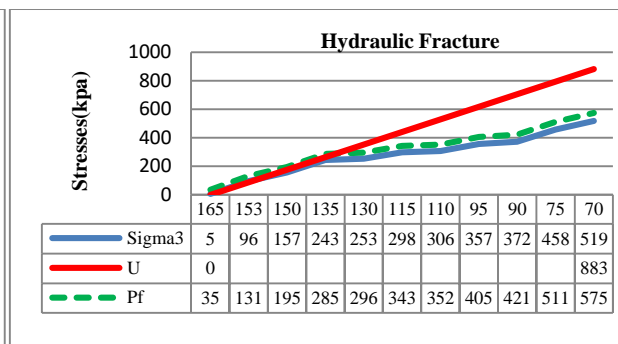
شکل ۱۵: مقطع خط مایل کنار هسته (B-B)

۵-۱- 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 سد حاجیلر برای خاک CL پرداخته شده و با فشار آب حفره‌ای مقایسه می‌گردد. در این بخش P_f فشار شکست هیدرولیکی، σ_3 تنش کل حداقل و U معرف فشار آب حفره‌ای است.

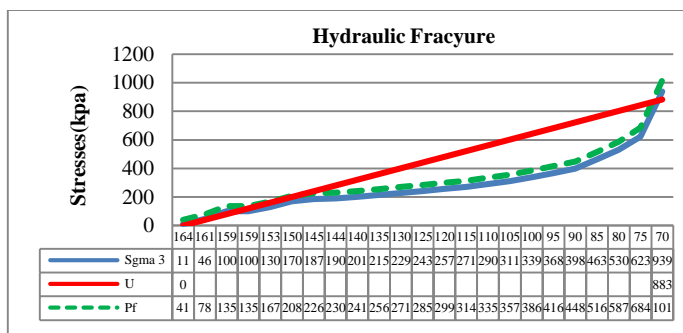


ب

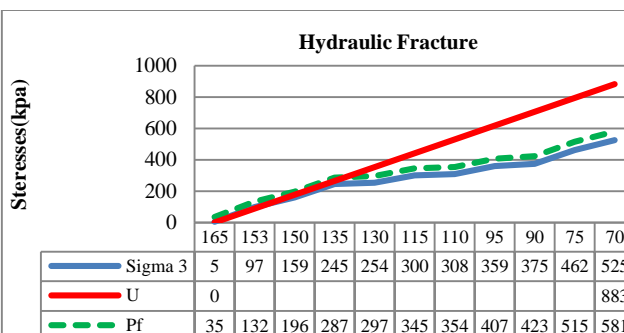


الف

شکل ۱۶: نمودار تغییرات تنش برای خاک CL در مرحله آگیری اولیه معیار کششی ساده و برشی الف (مقطع A-A، ب) مقطع B-B



ب



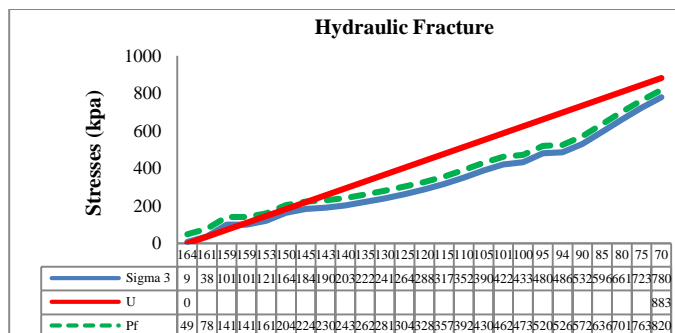
الف

شکل ۱۷: نمودار تغییرات تنش برای خاک CL در مرحله تراوش پایدار معیار کششی ساده و برشی الف (مقطع A-A، ب) مقطع B-B

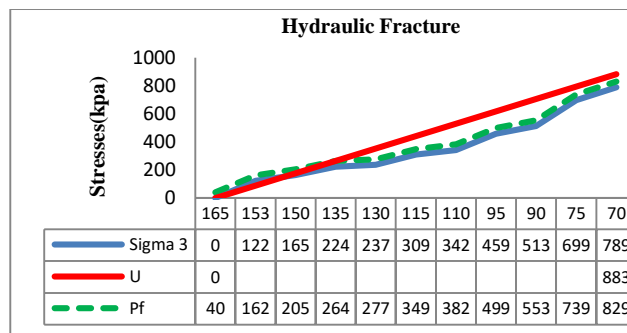
شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نتایج تحلیل‌ها برای خاکی CL را نشان می‌دهد. نمودارهای رسم شده تغییرات فشار شکست هیدرولیکی، تنش اصلی حداقل و فشار آب حفره‌ای در ارتفاع سد را با یکدیگر مقایسه نموده و امکان شناسایی نقاط محتمل برای شکست هیدرولیکی را فراهم می‌سازد. بر اساس معیار کششی ساده هر جا فشار آب حفره‌ای بر تنش کل حداقل غلبه کرده باشد آنگاه شکست هیدرولیکی در آن نقطه محتمل خواهد بود. به همین ترتیب بر اساس معیار برشی چنانچه فشار آب حفره‌ای در یک المان از مقدار فشار شکست بیشتر شود، وقوع شکست هیدرولیکی محتمل است. همان‌طور که در شکل‌های بالا نشان داده شده است به دلیل غلبه فشار آب حفره‌ای بر تنش کل حداقل و فشار شکست، عمده شکست هیدرولیکی در ترازهای پایینی و نزدیکی کف هسته اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در ترازهای بالایی به تدریج از شدت شکست هیدرولیکی کاسته شده و از یک تراز به بعد احتمال وقوع شکست هیدرولیکی به صفر می‌رسد. همچنین با مقایسه شکل‌های بالا مشخص می‌شود که احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در مقطع وسط هسته به دلیل عدم امکان زایل شدن سریع فشار آب حفره‌ای نسبت به وجه بالادست هسته، بیشتر است.

۵-۲- وضعیت شکست هیدرولیکی در خاک CH

در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ 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.

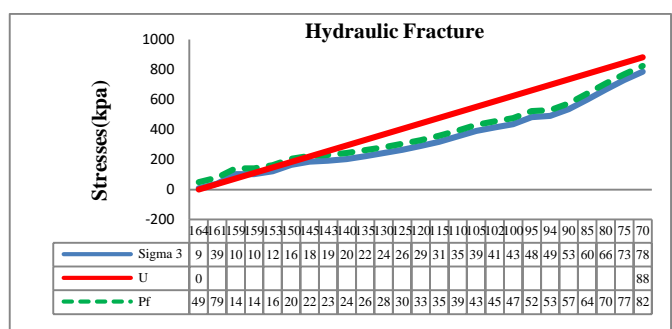


ب

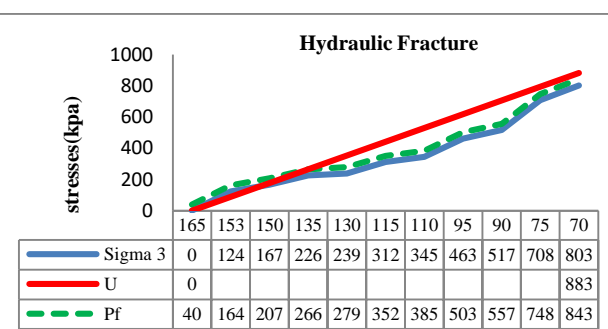


الف

شکل ۱۸: نمودار تغییرات تنش برای خاک CH در مرحله آگیری اولیه معیار کششی ساده و برشی الف) مقطع A-A، ب) مقطع B-B



ب



الف

شکل ۱۹: نمودار تغییرات تنش برای خاک CH در مرحله تراوش پایدار معیار کششی ساده و برشی الف) مقطع A-A، ب) مقطع B-B

۶- مقایسه و جمع بندی نتایج حاصل از شکست هیدرولیکی

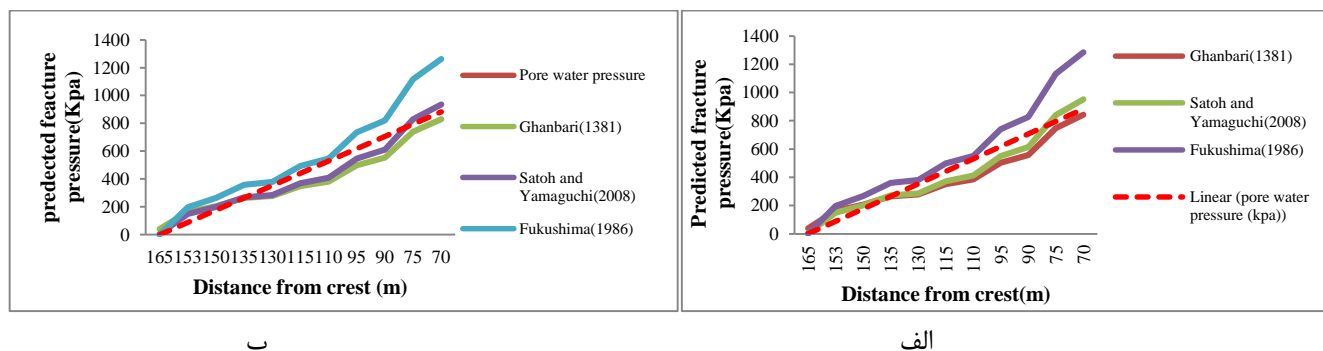
با توجه به تحلیل‌ها و نمودارها مشاهده می‌گردد که در تمام مراحل آگیری اولیه و تراوش پایدار و برای تمام مقاطع، احتمال وقوع شکست هیدرولیکی برای خاک CL نسبت به خاک CH بیشتر است. این امر باعث می‌گردد که خاک CL به عنوان خاک بحرانی و خاک CH به عنوان خاک منتخب برای ساخت و اجرای هسته انتخاب گردد. برای اطمینان از صحت گزینه‌های انتخاب شده به عنوان قرضه بحرانی و منتخب، نتایج به دست آمده از معیار کششی ساده و برشی قنبری [۱۰] برای این دو قرضه، با نتیجه تحقیقات سایر محققین از جمله فوکوشیما [۲۲]، ساتو و یاماگوچی [۲۳] مقایسه می‌شود. در این مقایسه فشار شکست هیدرولیکی در مرحله آگیری 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.

در این تحقیق بر اساس مدل فوکوشیما [۲۲] برای خاک بحرانی (CL) مقدار m برابر $1/3$ و برای خاک منتخب (CH) مقدار m برابر $1/6$ در نظر گرفته شده است. جدول ۴ نیز خلاصه‌ی نتایج به دست آمده بر اساس مدل یاماگوچی را نشان می‌دهد.

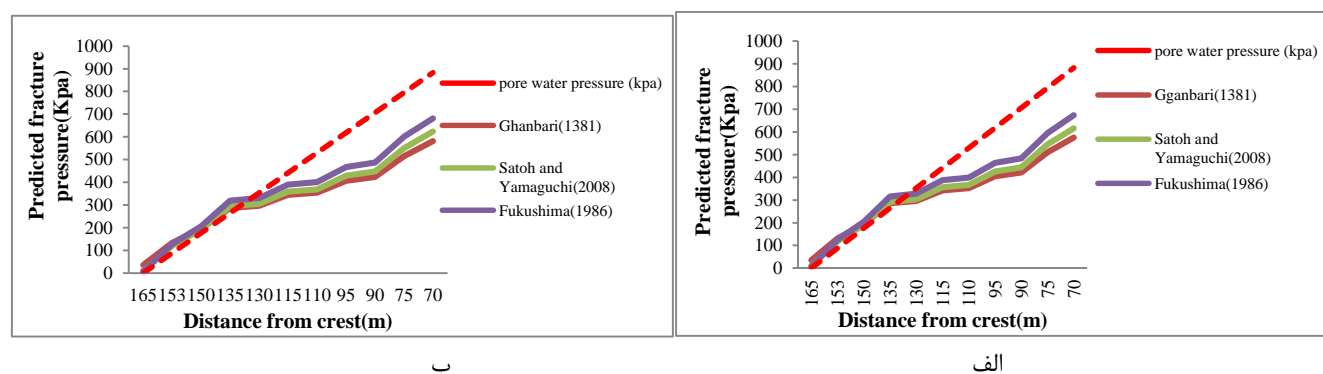
جدول ۴: ضرایب m و n برای خاک‌های مختلف

n (kN/m ²)	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 اندازه‌ی دانه‌ها، برای هر دو خاک منتخب و بحرانی مقادیر m و n به ترتیب برابر $1/18$ و $4/6$ در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ فشار شکست هیدرولیکی بر اساس روابط ارائه شده توسط محققین مختلف برای هر دو نوع خاک CH و CL محاسبه شده است [۲۳].



شکل ۲۰: مقایسه فشار شکست هیدرولیکی برای خاک CH در مقطع A-A الف) مرحله آبیگری اولیه، ب) مرحله تراوش پایدار



شکل ۲۱: مقایسه فشار شکست هیدرولیکی برای خاک CL در مقطع A-A الف) مرحله آبیگری اولیه، ب) مرحله تراوش پایدار

همان‌گونه که در نمودارهای بالا نیز مشاهده می‌شود، برای خاک CL هم در مرحله آبیگری اولیه و هم در مرحله تراوش پایدار بخش قابل توجهی از هسته مستعد شکست هیدرولیکی است، درحالی‌که با توجه به معیارهای سایر محققین نیز خاک CH از احتمال شکست هیدرولیکی کمتری برخوردار است. لذا با در نظر گرفتن معیار سایر محققین نیز، خاک CL به‌عنوان خاک بحرانی و مستعد شکست هیدرولیکی شناخته شده و استفاده از آن در هسته سد توصیه نمی‌شود. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که معیار فوکوشیما [۲۲] خوش‌بینانه‌ترین معیار ارائه شده برای تخمین فشار شکست هیدرولیکی است. معیار قنبری [۱۰] و معیار ساتو و یاموگوچی [۲۳] نیز تقریباً مقادیر مشابهی را برای فشار شکست به دست می‌دهد. نکته قابل توجه آن است که معیار ساتو و یاموگوچی (۲۰۰۹) برای تنش‌های کم نتایج درستی به دست نمی‌دهد زیرا ضریب n برای خاک‌های ریزدانه منفی بوده و در تنش‌های کم فشار شکست هیدرولیکی منفی است که صحیح نیست.

در این قسمت جهت مقایسه بیشتر، ضریب اطمینان وقوع شکست هیدرولیکی بر اساس معیار برشی قنبری [۱۰] برای هر یک از خاک‌ها در مرحله آبیگری اولیه و تراوش پایدار در معیار قنبری [۱۰] محاسبه شده و متوسط مقادیر آن در جدول ۵ 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 به دست آمده از مطالعات محققین مختلف و بررسی امکان وقوع شکست هیدرولیکی کاربرد دارد.

جدول ۵: متوسط مقادیر ضریب اطمینان وقوع شکست هیدرولیکی بر اساس معیار قنبری [۱۰] برای سد حاجیلرچای تبریز

نوع خاک	آبگیری اولیه		تراوش پایدار	
	مقطع A-A	مقطع B-B	مقطع A-A	مقطع B-B
CL	۰/۹۱	۱/۴۴	۱/۰۱	۲/۰۴
CH	۱/۰۴	۲/۰۳	۱/۰۵	۲/۲۲

با توجه با جدول ۵ مشاهده می شود که، مقادیر ضرایب اطمینان در مرحله آبگیری اولیه نسبت به مرحله تراوش پایدار کمتر بوده احتمال شکست هیدرولیکی بیشتر است. لذا آبگیری مخزن سد محتمل ترین زمان وقوع ترک هیدرولیکی است. همچنین با توجه به مقادیر ضرایب اطمینان حاصله برای سد مورد مطالعه نشان می دهد که احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در مقطع وسط هسته (A-A) نسبت به مقطع کناری هسته (B-B) بیشتر است.

۷- نتیجه گیری

با در نظر گرفتن حالت های مختلف شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی و همچنین بررسی و ارزیابی پدیده مذکور در مراحل و مقاطع مختلف هسته سد و همچنین معیارهای مختلف شکست، می توان به نتایج زیر دست یافت.

- نتایج حاصل از مدل سازی ها در نرم افزار Geo-Studio نشان داد که اگر تحلیل بدنه سد به صورت لایه به لایه انجام شود، حداکثر تغییر مکان قائم تقریباً در میانه ارتفاع و در هسته اتفاق خواهد افتاد. این در حالی است که در تحلیل یک مرحله ای همواره حداکثر نشست و تغییر مکان قائم مربوط به تاج سد است.
- مقایسه نشان داد که در خاک CL بیشترین امکان وقوع شکست وجود داشته و همچنین مرحله آبگیری اولیه از تراوش پایدار بحرانی تر است.
- 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 آبگیری اولیه و تراوش پایدار بیشتر است.
- برای اطمینان از صحت مدل عددی، نتایج به دست آمده برای خاک بحرانی (CL) و خاک منتخب (CH) با معیارهای دیگر مثل فوکوشیما [۲۲]، ساتو و یاماگوچی [۲۳] مقایسه شدند. نتایج این مقایسه نیز نشان داد که احتمال شکست هیدرولیکی در خاک بحرانی نسبت به خاک منتخب بیشتر است.
- مقایسه معیارهای استفاده شده در پیش بینی فشار شکست هیدرولیکی نشان داد که در اغلب موارد معیار فوکوشیما [۲۲] خوش بینانه ترین و معیار قنبری [۱۰] محافظه کارانه ترین نتایج را دارد.
- نکته قابل توجه آن است که معیار ساتو و یاماگوچی [۲۳] برای تنش های کم نتایج درستی به دست نمی دهد زیرا ضریب n برای خاک های ریزدانه منفی بوده و در تنش های کم، فشار شکست هیدرولیکی منفی می شود که صحیح نیست.

مراجع

- Nobakht, F. and Zahermand, S. (2014). Investigation of hydraulic fracturing of the core of earth dams. *The Frist National Conference of Seismology and Earthquake Engineering*. Yazd, Iran.
- Sherard, J.L., Decker, R.S and Ryker, N.L. (1972). Hydraulic fracturing in low dams of dispersive clay. *Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*. Purdue University, Lafayette, Indiana, United States, 653-689.
- Komasi, M. and Beiranvand, B. (2020). 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*. 4(2), 55-67.
- Lofquist, B. (1955). Discussion of cracking in dams. In: *Proceedings 5th ICOLD Congress*. Paris. Vol.III, 21-22.
- Kjaernsli, B. and Torblaa, I. (1968). *Leakage through horizontal cracks in the core of Hyttejuvet dam*. Norwegian Geotechnical Institute Publication, Volume 80.

- [6] Nobari, E.S., Lee, K.L. and Duncan, J.M. (1973). *Hydraulic fracturing in zoned earth and rockfill dams: A Report of an Investigation*. Office of Research Services, University of California, Berkely, Report No. TE-73-1, 9(8), 17-23.
- [7] Bjerrum, L., Nash, J.K.L., Kennard, R.M. and Gibson, R.E. (1972). Hydraulic fracturing in field permeability testing. *Geotechnique*, 22(2), 319-32.
- [8] Jaworski, G.W., Duncan, J.M. and Seed, H.B. (1981). Laboratory study of hydraulic fracturing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE*, 107(6), 713-732.
- [9] Komakpanah, and Yanagisawa, E. (1989). Laboratory study on Hydraulic fracturing Criteria in soil. *Journal of Soils & Foundations*, 29(4), 14-22.
- [10] Ghanbari, A. and ShamsRad, Sh. (2015). Development of an empirical criterion for predicting the hydraulic fracturing in the core of earth dams. *Acta Geotechnica*, 10 (2), 243-254.
- [11] Khamesi, S.O., and Mirghasemi, A. (2010). Investigation on Hydraulic Fracturing in Embankment Dams. *Civil Engineering Infrastructures Journal (CEIJ)*, 44(2), 181-191. (In Persian)
- [12] Patel, S.M, Sandergeld, C.H. and Rai, C.S. (2017). Laboratory Study of Hydraulic Fracturing by Cyclic Injection. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 95, 8-15.
- [13] Mori, A. and Tamura, M. (1987). *Hydrofracturing pressure of cohesive soils*, *Soils and Foundations*. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 14-23.
- [14] Lto, T. (2007). *Effect of pore pressure gradient on fracture initiation in fluid saturated porous media*. Institute of Fluid Science, Tohoku University. 1-4.
- [15] Lo, K.Y. and Kaniaru, K. (1990). Hydraulic fracture in earth and rock-fill dams. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(4), 496-506.
- [16] Bandab Consulting Engineering. (2008). *Development of Water Resource of Hajilarchai Dam River in 2th Phase Studies*. Regional Water Company of East Azarbayjan.
- [17] ASTM D698-12, (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*. American Society for Testing and Materials.
- [18] Clough, G. W. and R. J. Woodward. (1967). Analysis of Embankment Stress and Deformation. Proceedings Paper, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division., ASCE*, 93(4), 529-549.
- [19] Shirdel, M., Ghanbari, A. and Davodi, M. (2015). Evaluation of the reservoir water level effect on seismic behavior of embankment dams. *Modares Civil Engineering journal*, 11(3), 123-123.
- [20] Cornet F.H., Doan M., Fontbonne F. (2003). Electrical imaging and hydraulic testing for a complete stress determination. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 40, 2-6.
- [21] Poudel, S., Abby. S.J. and Ngambi, S. (2017). Mechanism of hydraulic fracturing in cohesive zone of embankment dam cores – A Review. *International of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 8(7), 1202-1213.
- [22] Fukushima, S. (1986). *Hydraulic fracturing criterion in the core of fill dam*. Report of Fujita kogyo Technical Institute. No.22, 131-136.
- [23] Satoh, H. and Yamaguchi, Y. (2009). *Laboratory hydraulic fracturing tests for core materials using large size hollow cylindrical specimens*. The 1st International Symposium on Rockfill Dams, Chengdu China.