



فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۱، سال ششم، شماره ۲۲

doi 10.22077/JT.2023.6168.1152

آنالیز امکان گسلش در زیر بدنه سد عمارت در اثر آبگیری، با استفاده از روش مدل سازی عددی

حجت اله صفری^{۱*}، رسول یازرلو^۲

۱- دانشیار تکنونیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

۲- دکتری زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

چکیده:

برای تکمیل مطالعات در مورد اثر تغییرات تنش ناشی از آبگیری بر گسیختگی پی و پایداری کلی در سدهای بزرگ، لازم است که تحلیل امکان شکست پی در اثر آبگیری سد انجام گیرد. به همین دلیل، سد در حال ساخت عمارت در استان اردبیل به عنوان مورد مطالعاتی جهت مدل سازی دو بعدی عددی مبتنی بر روش اجزای محدود با روش آنالیز غیرخطی انتخاب گردید. برای انجام این کار مطالعات دقیق زمین شناسی مهندسی ساختگاه و دریاچه سد بررسی شده و به این ترتیب پارامترهای لازم جهت مدل سازی نظیر وضعیت مقاومت فشاری و تک محوری قبل و بعد از اشباع استخراج گردید. سپس با استفاده از نرم افزار پلاکسیس مدل سازی عددی دو بعدی انجام گرفته و امکان شکست پی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که پس از آبگیری سد و افزایش فشار آب منفذی، دایره مور برای نقطه بحرانی به سمت مرکز مختصات مهاجرت کرده و به همین دلیل به پوش گسیختگی نزدیک تر شده است که نشان دهنده احتمال بروز شکست بر اثر آبگیری سد می باشد. همچنین پیش بینی می شود که در اثر آبگیری سد، بجای ایجاد شکستگی های جدید، زون های گسلیده قدیمی مربوط به گسل های اصلی با مولفه نرمال و یا امتداد لغز نظیر بالان، که در مجاور سد قرار گرفته اند، دچار شکست و فعالیت گردند.

واژگان کلیدی: سد عمارت، شکست پی، آبگیری سد، مدل سازی عددی، نرم افزار پلاکسیز

*ایمیل: safari.ho@gmail.com

تلفن تماس: ۰۹۱۱۲۶۹۷۳۰۷

Analysis of faulting under foundation in Emarat dam, due to impounding, using numerical modelling by Plaxis software

Hojjat Ollah Safari^{1*}, Rasoul Yazarli²

1- Assistant Professor in Tectonics, Geology Department, College of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.

2- PhD in Engineering Geology, Geology Department, College of Sciences, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.

Abstract:

For completing of studies about influences of stress changes due to impounding on foundation failure and bulk stability of large dams, the analysis of foundation failure probability due to dam impounding is necessary. Therefore, the Emarat under-construction dam (Ardabil Province) is selected as a case study for 2D numerical modelling on the basis of finite elements with applying complete non-linear analyzing with using Plaxis software. For this aim, the high resolution engineering geology was performed on Dam site and its reservoir and therefore, the needed parameters for modelling, such as compressive and uniaxial strength in dry and saturation situation, were evaluated. Then, the 2D modelling was performed by Plaxis software and the probability of foundation failure was surveyed. The results showed that after impounding and raising of pore pressure, the calculated Mohr circle of selected critical point is migrated toward the coordinate center and then, semi-tangent to failure envelope which demonstrated that failure probability of foundation is caused due to dam impounding in Emarat under constructed dam. Also, we prospect that after impounding, the existent old fault zones (as second order related to main faults) with normal and/or strike-slip components, such as Balan fault which located to dam adjacent, will activate instead of forming of new fractures.

Keywords: Emarat Dam, Foundation Failure, Dam Impounding, Numerical Modelling, Plaxis Software

*Email: safari.ho@gmail.com

Tel: +989112697307

۱- مقدمه:

خاکی توسط چوپرا (Chopra, 1967) انجام شد که در این مطالعه به تحلیل لرزه‌ای الاستیک خطی یک سد مثلثی همگن پرداخته شد. این محقق وضعیت تنش را در نزدیکی و جهای خارجی سد خاکی مورد بررسی قرار داده تا ایمنی این سطوح را نسبت به لغزش برآورد نماید. ایشان علاوه بر این، حالت‌های طبیعی ارتعاش یک سد خاکی را محاسبه و نتایج خود را با پاسخ‌های روش تیر برشی آمبراسیز (Ambraseys, 1960) مقایسه کرد. این روش محدودیت‌های فرضیه تنش برشی افقی یکنواخت موجود در روش تیر برشی را نشان داد. این مطالعه همچنین اثبات کرد که اگرچه تنش‌های برشی افقی در بدنه سد یکنواخت هستند، اما در وجه‌های آزاد خاکریز به صفر می‌رسند. در مطالعات پیشرفته‌تر عددی، غیرخطی بودن رفتار مصالح سازنده سد و پی آن با در نظر گرفتن رفتار آن به صورت خطی معادل یا الاستوپلاستیک کامل وارد محاسبات شد. روش معادل خطی (Idriss et al., 1973; Seed et al., 1971) اساساً از یک مقدار ثابت مدول برشی G و میرایی ξ که با کرنش‌های برشی ایجاد شده و γ براساس روابط فرض شده توصیف‌کننده تغییرات میرایی و کاهش سختی وابسته به کرنش سازگار است (بطور مثال Daghigh, 1993). از دیگر مثال‌های مربوط به استفاده از روش خطی معادل می‌توان به پژوهش سید و همکاران (Seed et al., 1971; Prevost, 1981; Prevost et al., 1985) برای تحلیل شکست سد فرناندو تحت زمین لرزه سانتا باربارا ۱۹۲۵ اشاره نمود.

همچنین، رفتار الاستوپلاستیک غیر خطی سد ابتدا بوسیله روش عددی توسط پریوست و همکاران (Pre-vost, 1981; Prevost et al., 1985) با استفاده از نرم‌افزار DYNAFLOW به منظور بررسی پایداری و گسیختگی سد سانتا فلشیا، مدل‌سازی شد. در این مطالعه از پاسخ هیستریک خاک با استفاده از یک تئوری پلاستیسیته چند سطحی بهره برده شده است (Mroz, 1967) که از یک خطی‌سازی سطحی تسلیم ۱۱ قطعه‌ای برای تقریب منحنی تنش - کرنش برشی استفاده شد. هر دو تحلیل‌ها به صورت ۲ بعدی و ۳ بعدی انجام شده و با هم مقایسه شدند تا اهمیت عرض دره رودخانه نیز را ارزیابی نمایند. به هر حال اختلاف‌های کوچکی بین تحلیل‌های ۲ بعدی و ۳ بعدی یافت شد که این

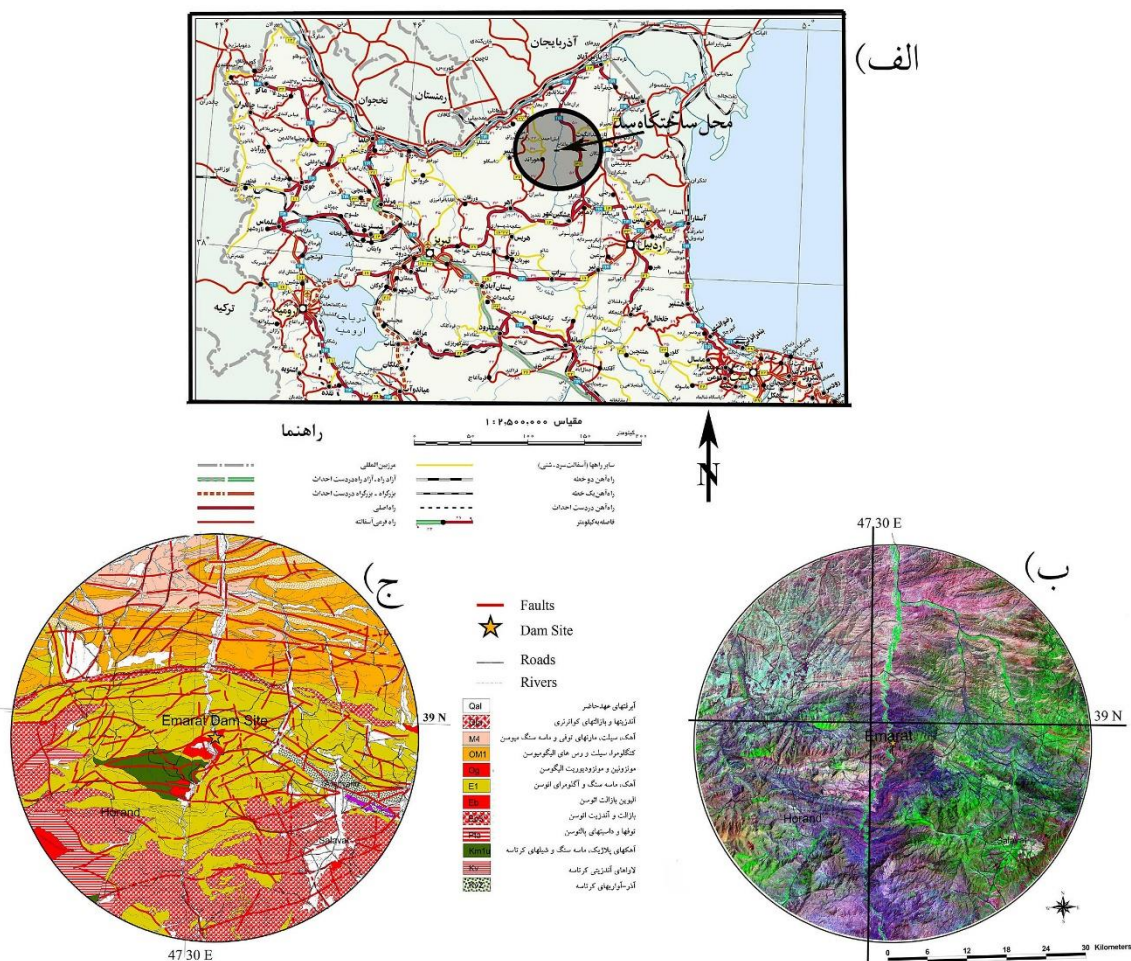
یکی از پایه‌های اساسی توسعه جوامع انسانی وجود منابع آب مطمئن می‌باشد. قرارگیری کشور ایران در یک منطقه نسبتاً خشک، اهمیت توسعه منابع آب از طریق ایجاد سدهای مخزنی را در محل‌های مناسب حیاتی می‌نماید. بالطبع استان اردبیل نیز از این قاعده کلی خارج نیست و به همین دلیل تعداد ۴۷ سد کوچک و بزرگ با ظرفیت مفید ۲۷۲ میلیون مترمکعب مورد مطالعه، اجرا و بهره‌برداری قرار گرفته است (سایت سازمان آب منطقه‌ای اردبیل). علیرغم تمامی نکات مثبتی که ساخت سدهای بزرگ دارند؛ بواسطه اینکه باعث تجمع حجم زیادی آب در یک محیط کوچک می‌شوند، می‌توانند باعث بروز اثرات زیست محیطی مخربی نظیر بالا رفتن فشار منفذی سنگ‌های زیر بدنه سد شده و شرایط را برای شکست پی سد و احتمالاً ایجاد زلزله القایی مهیا نمایند. قرارگیری ایران بر روی کمربند جوان و لرزه‌خیز آلپ- هیمالیا، سبب تشکیل گسل‌های فعال با پیشینه لرزه‌خیزی بالا (۱۳۰ زمین لرزه به بزرگی ۷/۵ ریشتر در طول تاریخ) شده است (Ambraseys & Meville, 1982) که می‌تواند سبب شکست در سازه‌های حساسی نظیر سدها شود. علاوه بر زمین لرزه‌ها، از مهمترین علل شکست و ناپایداری در سدهای در حال ساخت و یا بهره‌برداری، زمین لرزه‌های القایی ناشی از آنگیری سد می‌باشد. در بسیاری از موارد، در مناطقی که گسله‌های فعالی در مخزن، تکیه‌گاه و یا پیرامون سد قرار داشته باشند؛ آنگیری سدها علاوه بر بالا بردن فشار منفذی در توده‌های سنگی زیر مخزن و پی، سبب روان کاری سطح گسل‌های فعال می‌شود. این پدیده سبب آزاد شدن انرژی پتانسیل ذخیره شده در سطح گسل‌ها شده (Qiuliang et al., 2008) و به این ترتیب موجب به پیش انداختن زلزله‌های بزرگ خواهد شد. به همین دلیل بررسی پایداری استاتیک و لرزه‌ای سدهای بزرگ از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد. در زمینه بررسی پایداری استاتیک و لرزه‌ای سدهای خاکی به کمک روش‌های عددی (نظیر سد عمارت)، مطالعات بسیاری در سطح جهان و ایران صورت پذیرفته است. اولین کاربرد روش عددی اجزاء محدود در تحلیل سدهای



مطالعات مشابه‌ای برای اثرات متقابل سد-پی انجام شده (Nahas, 1987; Abouseeda and Dakoulas, 1996). در آن سد الاستوپلاستیک با استفاده از اجزاء محدود مدل‌سازی شد. در این پژوهش فرض شد که پی بصورت یک فضای نیمه الاستیک رفتار کند و سپس با استفاده از اجزاء مرزی مدل‌سازی شد. علیرغم مطالعات پیرامون اثر تغییرات تنش ناشی از آبیگری بر گسیختگی پی و پایداری کلی سدها در اکثر سدهای بزرگ (ICOLD-137, 2011; ICOLD-144, 2016; ICOLD-72, 2010)، با توجه به عدم مطالعات کافی در اکثر سدهای بزرگ در حال طراحی و ساخت ایران، لازم است که تحلیل امکان شکست پی در اثر آبیگری سد انجام گیرد. این پژوهش سد در حال ساخت عمارت را به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب نموده تا به مدل‌سازی دو بعدی عددی مبتنی بر روش اجزای محدود با روش آنالیز غیرخطی کامل با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس انجام گرفته (Griffiths and Prevost, 1988) و به این ترتیب امکان شکست پی در اثر آبیگری سد تحلیل گردد.

طراحی سد عمارت با ارتفاع از پی ۱۱۰ متر، طول تاج ۳۴۰ متر و عرض تاج ۱۲ متر در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۴ توسط مهندسین مشاور بندآب در ۴۵ کیلومتری جنوب شهر گرمی و ۱۵۰ کیلومتری شمال اردبیل انجام گردیده و از سال ۱۳۹۵ شروع به ساخت شده است. این سد با مختصات جغرافیایی ۳۸°۵۶' عرض شمالی و ۴۷°۳۲' طول شرقی (شکل ۱) و در ارتفاع ۴۳۵ متری از سطح دریا بر روی رودخانه دره رود (از سرشاخه‌های رودخانه اصلی ارس در حوضه آبریز خزر) بنا گردیده است (بر گرفته از سایت سازمان آب منطقه ای اردبیل). نوع سد سنگریزه‌ای با هسته ناتراوای میانی بوده و دارای حجم مفید ۲۳۰ میلیون متر مکعب و حجم کل ۲۹۴ میلیون متر مکعب است (شکل ۲-الف).

اختلاف به تاج نسبتاً بزرگ سد سانتا فلیشا نسبت داده شد (که برای آن $L/H \approx 4.7$). این امر برخلاف مطالعات الگمال و همکاران (Elgamal et al., 1987) بود که از روش تیر برشی در سد سانتا فلیشا استفاده نموده و به این نتیجه رسیدند که مدل آن‌ها قادر بود که اهمیت وزنی ابعاد طولی سد را نشان دهد. همچنین، مقایسه بین تحلیل الاستوپلاستیک ۲ بعدی و ۳ بعدی توسط گریفیس و پریوست (Griffiths and Prevost, 1988) بر روی سد لانگ-والی در کالیفرنیا انجام شد که در آن، نتایج تحلیل‌های ۳ بعدی دارای سازگاری حاشیه‌ای بهتری با مقادیر اندازه‌گیری شده بود. علاوه بر این، تصور می‌شد که عدم توانایی شبکه اجزاء محدود نسبت به بدست آوردن فرکانس‌های بالاتر در آن مطالعه تا حدودی به علت شبکه درشت در آن باشد که تا حدودی اهمیت اتخاذ اندازه المان‌های مناسب و اصلاح مش را نشان می‌داد. همچنین تحلیل الاستیک-کاملاً پلاستیک سد لانگ-والی با میرایی ویسکوز (رایلی) توسط (Woodward and Griffiths, 1996) صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که روش عددی بطور قابل اعتمادی توانسته پایداری سد را پیش و پس از آبیگری پیش‌بینی نماید. در برخی پژوهش‌ها، از بین روش‌های عددی، روش اجزاء محدود همراه با روش اجزاء مرزی استفاده شد؛ یعنی روش عددی دیگری که نیازمند گسسته‌سازی فقط مرزها (نه تمام دامنه مسئله) بود. این امر می‌تواند در بررسی عددی پایداری سدها، منجر به هزینه‌های محاسباتی کمتری شود که به علت تعداد کمتر گره‌های گسسته است، شایان توجه است که این روش فقط محدود به تحلیل‌های خطی است. این روش در مطالعه اثرات متقابل ساختار خاک بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Spyrakos and Beskos, 1986; Von Es-tor and Kausel, 1989) که در آن ساختار غیرالاستیک با استفاده از اجزاء محدود مدل‌سازی شد. همچنین،



شکل ۱: الف- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به سد عمارت، ب- تصویر ماهواره‌ای اصلاح‌شده محل سد و پیرامون آن (شعاع ۳۰ کیلومتر)، ج- نقشه زمین‌شناسی محل سد و پیرامون آن (شعاع ۳۰ کیلومتر)

۲- زمین‌شناسی عمومی سد عمارت

منطقه مورد بررسی در منتهی‌الیه شمال-شمال غربی ایران قرار گرفته است. از نظر زمین‌ساختی این منطقه از شرق به گسل آستارا (مرز غربی زون تالش)، از شمال به گسل دشت مغان (مرز جنوبی زون قفقاز)، از جنوب به گسل شمال اهر (مرز شمال غربی زون سنندج-سیرجان) و از غرب به گسل‌های آراکسیس (گسل ارس، منطبق بر رودخانه مرزی ارس) و اردوباد (در کشور ارمنستان) محدود شده است (صفری و همکاران، ۱۳۹۸). قرارگیری این بلوک بین چهار زون ساختاری اصلی (در زمین‌ساخت جهانی) سبب گردیده است که از پیچیدگی‌های بسیاری برخوردار باشد و به همین دلیل می‌توان ادعا نمود که یکی از پیچیده‌ترین زون‌های ساختاری در ایران باشد. به همین دلیل هر بخش از این بلوک غلبه یک روند ساختاری را به نمایش می‌گذارد.

بررسی‌های چینه‌شناسی (صفری و همکاران، ۱۳۹۸) حکایت از آن دارد که قدیمی‌ترین سنگ‌های قابل مشاهده در سطح نهشته‌هایی با سن کرتاسه می‌باشند (شکل ۱-ج) و بر روی آنها سکانس‌های سنگی با سن پالئوسن تا کواترنر قرار گرفته‌اند. سکانس کرتاسه شامل مارن، ماسه سنگ با میان لایه‌های سنگ آهک، گدازه‌های اسپلیتی-لاتیت و لاتیت آندزیت و سنگ‌های آتشفشانی رسوبی-سنگ‌های آتشفشانی داسیتی، آندزیتی و تراکی آندزیتی همراه با توف می‌باشد. توالی پالئوسن سنگی شامل برش ولکانیکی با ترکیب داسیتی، توف، توف برش داسیتی و توف‌های اسیدی است. رخنمون‌های سنگی ائوسن شامل دو بخش آتشفشانی-رسوبی (ایگنمبریت‌های داسیتی همراه با تراکی آندزیت‌های پورفیری، گدازه‌های بالشی آندزیتی و تفریتی، پیروکسن آندزیت، آندزیت بازالت، بازالت برشیک، پیروکسن بازالت) و رسوبی (تناوب شیل،

توف سفید رنگ می‌باشند. بر اساس نتایج بررسی‌های صحرایی و نقشه زمین شناسی تهیه شده، سد و مخزن سد عمارت بر روی سنگ‌های آذرین الیگوسن با ترکیب مونزونیت تا مونزودیوریت قرار گرفته است (شکل ۲). بر روی این ساختارهای سنگی رسوبات کواترنری بصورت نهشته‌های منفصل در کف رودخانه اصلی دره رود و سایر رودخانه‌های سرشاخه آن و آبراهه‌های اصلی منطقه مشاهده می‌شوند. این نهشته‌ها هیچ گونه سخت شدگی از خود به نمایش نمی‌گذارند. کاملاً درشت دانه (در حد شن و قلوه) و در کف رودخانه‌های اصلی در حد سیلت و ماسه می‌باشند.

ماسه سنگ، مارن، کنگلومرا، شیلهای سیلته با درون لایه‌های نازک آهک و ماسه سنگ) می‌باشد. سکانس الیگوسن- الیگومیوسن نیز از دو بخش آذرین (توده‌های نفوذی با جنس گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت، بیوتیت دیوریت) و رسوبی (کنگلومرا، ردیف‌هایی از ماسه سنگ با رس سیلته و ماسه‌سنگ‌های توفی ضخیم لایه با درون لایه‌های شیلهای) تشکیل یافته است. توالی سنگی میوسن شامل تناوبی از ماسه‌سنگ و مارن و رس سیلته با درون لایه‌های کنگلومرایسی و سیلت‌ها و رس‌های گچ‌دار رنگی بهمراه ماسه‌سنگ و کنگلومرا تشکیل یافته است و توالی سنگی پلیوسن شامل رس‌سنگ‌های رنگارنگ با کنگلومرا، ماسه‌سنگ، ماسه لوماشل و



شکل ۲: الف- تصویر پانوراما از محل ساختگاه سد، به وضعیت قرار گیری گسل‌های اصلی و زون‌های خردشده توجه شود؛ ب- تصویر پانوراما از محل مخزن سد در حال احداث عمارت

مورد بررسی گسل‌های عمارت با روند N60-90 (معکوس با طول ۲۱۰ کیلومتر)، بالان با روند N160-180 (گسل امتدادلغز چپ‌بر با مولفه نرمال و طول ۱۱۰ کیلومتر) و سبلان با روند N60-70 (گسل امتدادلغز راست‌بر با طول ۱۸۰ کیلومتر) می‌باشند.

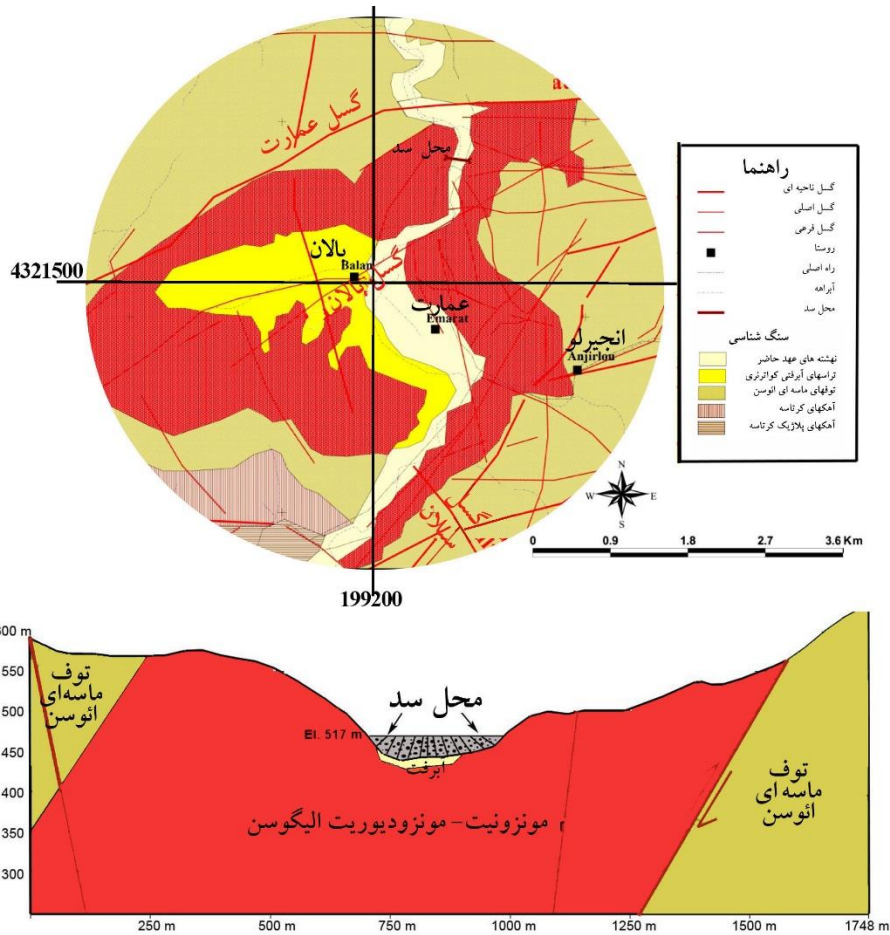
۳- زمین‌شناسی مهندسی سد عمارت

بررسی‌های صحرایی حکایت از قرار گیری ساختگاه سد عمارت بر روی توده‌ای از سنگ‌های آذرین

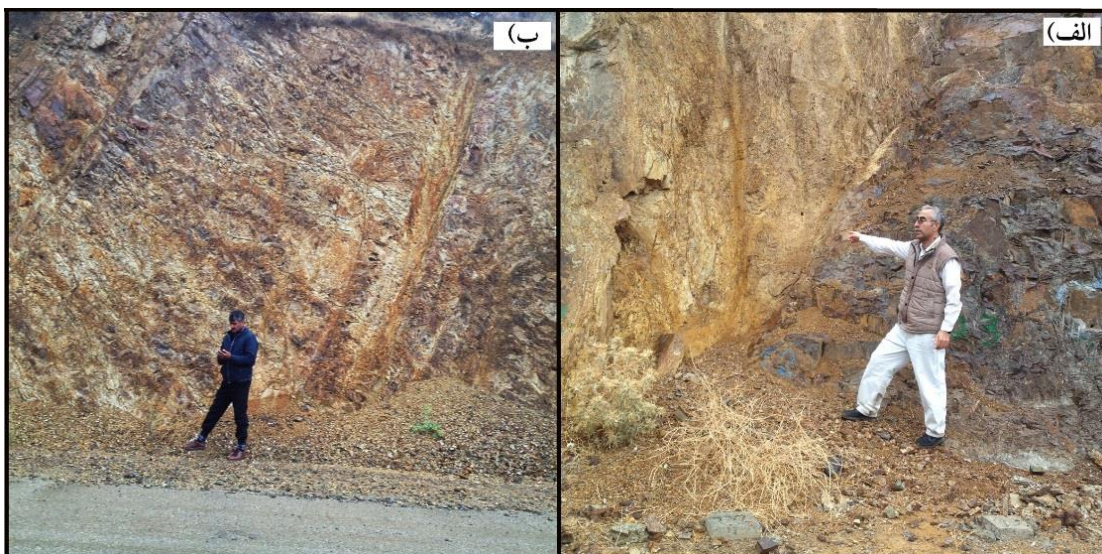
از نظر ریخت‌شناسی ناحیه مورد مطالعه در یک منطقه کوهستانی قرار داشته (شکل ۱-ب) به گونه‌ای که روند کوه‌ها از روند گسل‌های اصلی تبعیت می‌کنند، به طور مثال در بخش مرکزی (پیرامون سد عمارت) روند کوه‌ها شرقی- غربی می‌باشند که از روند گسل عمارت پیروی می‌نمایند. از لحاظ ساختاری، چندین گسل ناحیه‌ای پیرامون محل سد عمارت قرار گرفته‌اند که مهمترین گسل‌های شناسایی شده در محدوده

(عمارت و بالان) در بخش‌های سطحی دچار هوازدگی و آلتراسیون شده‌اند (شکل ۴). شایان توجه است که سنگ‌های توفی به دلیل نازک لایه، از نظر خواص مهندسی ضعیفتر می‌باشند.

مونزونیت - مونزودیوریتی دارد. این توده توسط توف‌های متناسب به ائوسن در بر گرفته شده‌اند (اشکال ۲، ۳). این توده و پیرامون آن از سلامت بالایی برخوردارند. اما در امتداد زون‌های خردشده گسل‌ها



شکل ۳: الف - نقشه زمین‌شناسی محل سد و مخزن سد عمارت، ب - مقطع عرضی شرقی - غربی از ساختگاه سد عمارت و پیرامون آن



شکل ۴: نمایایی از زون‌های خردشده و آلتراه‌شده گسلی پائین دست ساختگاه، الف - گسل بالان، ب - گسل عمارت (دید رو به شمال شرق)



به ترتیب برابر با ۷۶ و ۷۲) در رده خوب و در بستر رودخانه (با میانگین درصد شاخص کیفیت برابر با ۴۶) در رده ضعیف قرار می گیرند. سنگ‌های توفی پیرامون (اشکال ۲ و ۳) با مقادیر RQD پایین (با متوسط درصد شاخص کیفیت برابر با ۴۳) در رده ضعیف ارزیابی می شوند.

ج- نتایج آزمایشات نفوذپذیری انجام شده در ساختگاه سد عمارت نشان می دهد که سنگ‌های آذرین و رسوبی تشکیل دهنده ساختگاه سد عمارت با داشتن اعداد لوژن بزرگتر از ۵ (با درصد فراوانی برابر با ۴۱ درصد در سنگ‌های آذرین و ۴۴ درصد در سنگ‌های رسوبی)، به عنوان توده آبگذر محسوب می شود. همچنین، سنگ‌های رسوبی تکیه گاه راست و سنگ‌های آذرین بستر رودخانه با اعداد لوژن بزرگتر از ۵ (فراوانی ۵۳ درصد در سنگ‌های رسوبی و فراوانی ۶۶ درصد در سنگ‌های آذرین)، تاثیر بیشتری بر این آبگذری دارند. همچنین با بررسی نمودارهای تغییرات مقادیر لوژن نسبت به عمق در هر گمانه، ملاحظه می گردد که در تکیه گاه چپ مقادیر لوژن بالای ۵ محدود به اعماق تا ۵۰ متر بوده ولی در تکیه گاه راست و بستر رودخانه، آبگذری‌های بیش از ۵ لوژن تا اعماق ۱۰۰ متری هم وجود دارند (جدول ۱).

به منظور تعیین ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی محدوده سد عمارت از نتایج مطالعات ژئوتکنیکی (حفاری‌ها و آزمایشات) آن استفاده شده است. حفاری‌های انجام گرفته شامل ۳۵ گمانه ماشینی (با طول حفاری ۱۷۵۷ متر)، ۱۲ گمانه ماشینی تزریق آزمایشی (با طول حفاری ۱۰۷۷ متر) و حفر ۱۶ ترانشه در مصالح آبرفتی بستر دره (با مجموع طول حفاری ۶۵ متر) می باشد (مهندسین مشاور بندآب، ۱۳۷۴ و ۱۳۷۷). نتایج انجام آزمایشات مکانیکی (شامل پوش دانه بندی، RQD، نفوذپذیری و ویژگی‌های مهندسی) نشان می دهد که:

الف- نتایج پوش دانه بندی نمونه‌ها (شامل نمونه‌های ماشینی و دستی) به همراه کنترل‌های صحرائی از محل ترانشه‌ها نشان می دهد که جنس پی آبرفتی سد عمارت در تمامی اعماق آن درشت دانه و از جنس شن ماسه دار سیلتی همراه با قلوه سنگ بوده که در بخش هایی از آن لزه‌های ماسه ای - سیلتی بصورت ناپیوسته و با پراکنندگی زیاد (به ویژه در اعماق بیش از ۴ متر) جای گرفته اند.

ب- با توجه به مقادیر RQD، شاخص کیفیت سنگ‌های آذرین تشکیل دهنده ساختگاه و تکیه گاه‌های چپ و راست سد عمارت (با میانگین درصد شاخص کیفیت

جدول ۱: نتایج آزمایشات لوژن در بخش‌های مختلف (مهندسین مشاور بندآب ۱۳۷۴ و ۱۳۷۷)

موقعیت	بازه اعداد لوژن	سنگ‌های آذرین (موزویت و میکرودیوریت)		سنگ‌های رسوبی - آذر آواری (توخته)		کل توده سنگ	
		فراوانی	درصد فراوانی	فراوانی	درصد فراوانی	فراوانی	درصد فراوانی
تکیه‌گاه چپ	<5	76	63	16	84	92	66
	5-20	17	14	2	11	19	14
	20-50	6	5	0	0	6	4
	>50	22	18	1	5	23	16
بستر	<5	27	34	30	60	57	44
	5-20	26	33	8	16	34	26
	20-50	13	16	7	14	20	16
	>50	13	16	5	10	18	14
تکیه‌گاه راست	<5	187	65	36	47	223	61
	5-20	56	20	23	30	79	22
	20-50	18	6	9	12	27	7
	>50	25	9	9	12	34	9
کل ساختگاه	<5	290	60	82	56	372	59
	5-20	99	20	33	23	132	21
	20-50	37	8	16	11	53	8
	>50	60	12	15	10	75	12

همچنین سطوح ناپیوستگی نظیر لایه‌بندی و درزه‌ها، نقش اصلی در میزان تراوش دارد. بر اساس نتایج آزمایشات نفوذپذیری، می‌توان پی‌سد را بصورت یک جسم پیوسته دارای آب‌گذری خوب در نظر گرفت. به این ترتیب، پی‌سد به عنوان یک محیط همگن اشباع و همراه تراوش با لیتولوژی متغییر در ساختگاه و مخزن مدل شده است. سپس میزان تنش موثر و آب حفره‌ای در پنج مقطع مختلف از سد شامل: تکیه‌گاه چپ، وسط و راست (شکل ۶) محاسبه و بصورت نمودار تنش-عمق در ادامه این بخش آمده است. به منظور محاسبه تنش‌ها و تغییرات فشار منفذی مقاطع نشان داده شده در شکل (۶) در نرم افزار عددی PLAXIS که بر پایه فلسفه مکانیک محیط‌های پیوسته و روش اجزای محدود فرمولبندی شده است، شبیه‌سازی شد. تصویر وضعیت اولیه تنش و مدل عددی ساخته شده در اشکال (۷-الف و ب) نمایش داده شده‌اند. مدل رفتاری مورد استفاده در مدل‌سازی عددی این مقاله مدل موهر-کولمب می‌باشد که در اغلب پژوهش‌های علمی و پروژه‌های اجرایی از آن استفاده می‌شود. در این مدل، فرض بر این است که پلاستیسیته با توسعه کرنش‌های غیرقابل برگشت در ارتباط می‌باشد. به عبارت دیگر، جهت امکان وقوع پلاستیسیته در محاسبات، نیاز به تعریف تابع تسلیم وابسته به تنش و کرنش است. تابع فوق بطور معمول بصورت تابعی از تنش و کرنش معرفی می‌گردد. به این ترتیب، یک مدل کاملاً پلاستیک، یک مدل مشخص با سطح تسلیم ثابت می‌باشد و به معنای سطحی است که بطور کامل توسط پارامترهای مدل قابل تعریف بوده و از کرنش پلاستیک متأثر نگردد. در نقاط داخل سطح، رفتار تسلیم کاملاً الاستیک بوده و تمامی کرنش‌ها برگشت‌پذیر خواهند بود. جزئیات مشخصات واحدهای سنگی و رسوبی موجود در مقطع مورد مطالعه (اشکال ۳ و ۶) در جدول (۲) ارائه گردیده است. لازم بذکر است به دلیل نقص در برخی موارد، مشخصات مصالح از منابع معتبر اقتباس شده است (Hoek, 2006).

د- نتایج ویژگی‌های مهندسی بر اساس آزمایشات آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های مغزه‌سنگ‌های تهیه شده از نقاط مختلف ساختگاه سد عمارت (شکل ۵)، حاکی از آن است که:

د-۱- مقدار متوسط مقاومت فشاری مغزه‌های سنگی از سنگ بکر در شرایط رطوبت طبیعی و اشباع (شکل ۵) برای سنگ‌های آذرین به ترتیب برابر با ۱۱۶۲ و ۹۶۹ می‌باشند و برای سنگ‌های رسوبی به ترتیب برابر با ۱۱۱۳ و ۸۲۶ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع هستند که در رده مقاومتی خوب ارزیابی می‌شوند.

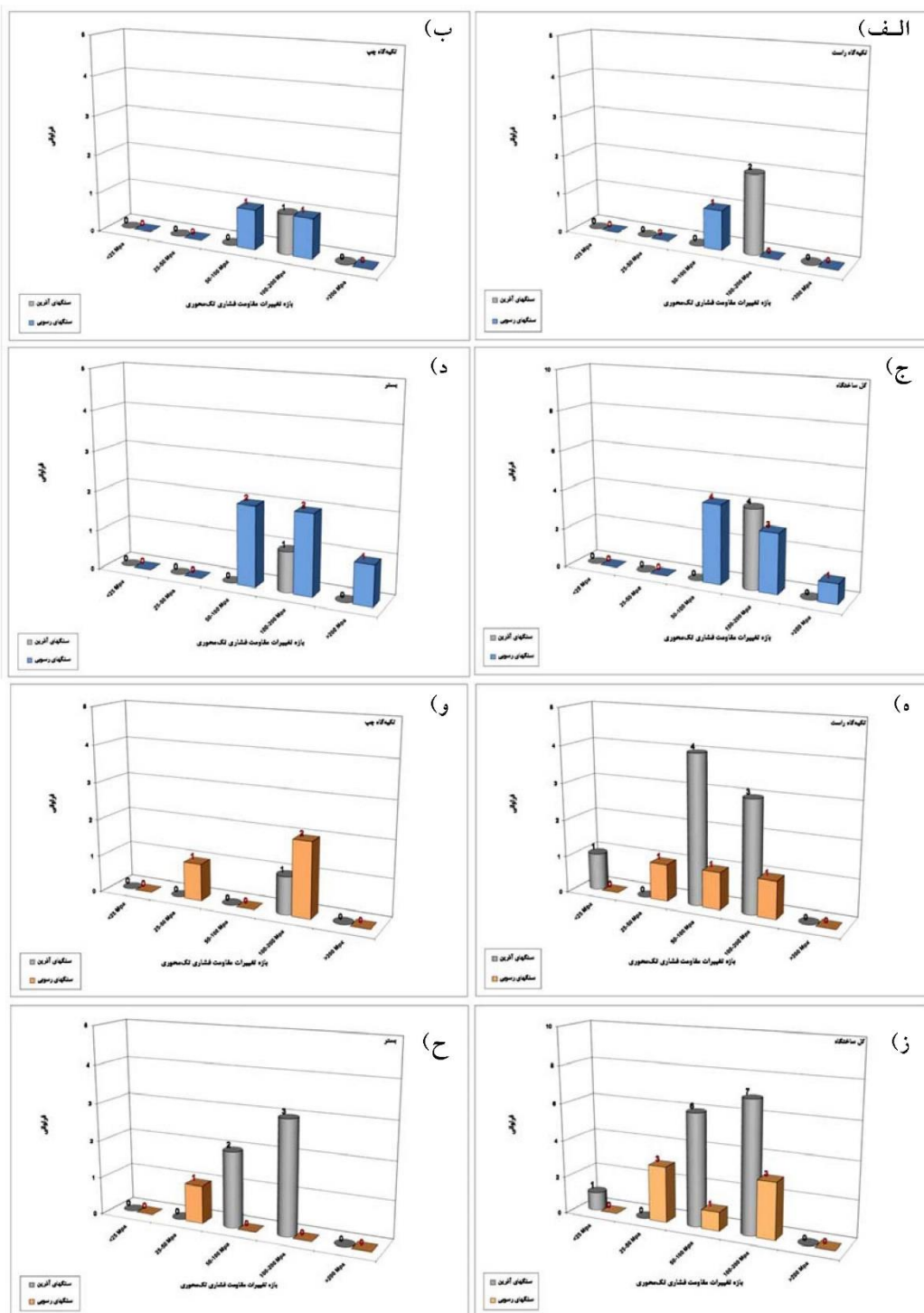
- نتایج آزمون بار نقطه‌ای نیز با مقدار متوسط ۸۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برای سنگ‌های آذرین و ۹۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برای سنگ‌های رسوبی تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایش مقاومت فشاری و رده مقاومتی گفته شده برای سنگ‌ها دارد.

- متوسط مدول الاستیسیته برای سنگ‌های تشکیل‌دهنده ساختگاه در حالت رطوبت طبیعی و اشباع برای سنگ‌های آذرین به ترتیب برابر با ۴۶۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰۰ و برای سنگ‌های رسوبی به ترتیب برابر با ۵۲۰۰۰۰ و ۵۱۰۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بوده و ضرایب پواسون مغزه‌ها بین ۰/۰۵ تا ۰/۳۸ می‌باشد. - میانگین وزن مخصوص خشک و اشباع برای سنگ‌های آذرین برابر ۲/۸۳ و ۲/۶۱ تن بر مترمکعب است. همچنین این میانگین برای سنگ‌های رسوبی به ترتیب برابر با ۲/۸۵ و ۲/۶۴ می‌باشد. میزان درصد جذب آب در این سنگ‌ها به ترتیب ۰/۸۲ و ۱/۰۴ و میزان تخلخل ۲/۶۵ و ۲/۸۳ درصد است.

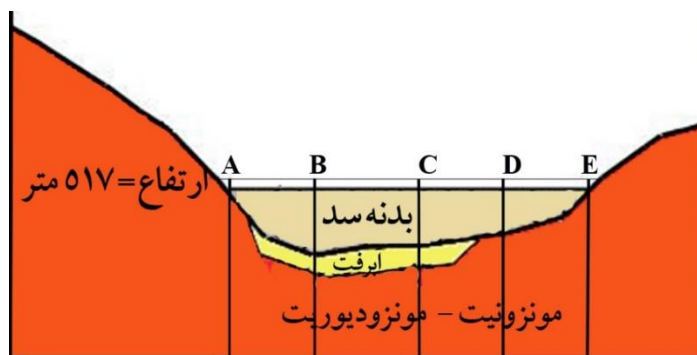
- پارامترهای برشی (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) به دست آمده برای مغزه‌های سنگ‌های آذرین در ساختگاه سد در شرایط اشباع به ترتیب برابر ۵۶/۱ درجه و ۱۴/۶ مگاپاسکال بوده و برای سنگ‌های رسوبی ۵۳/۷ درجه و ۲/۸ مگاپاسکال است.

۴- تخمین تنش‌ها به روش عددی

بطور کلی ویژگی‌های سنگ‌شناسی و خواص خمیری سنگ‌های ساختگاه سد نشان می‌دهد که تغییر شکل ناشی از عملکرد گسل‌ها و زون‌های برشی آنها و



شکل ۵: نتایج مقاومت فشاری و آزمایشات تک محوری با رطوبت طبیعی و اشباع برای سنگ‌های آذرین و رسوبی (مهندسین مشاور بندآب ۱۳۴۴ و ۱۳۷۷)



شکل ۶: موقعیت مقاطع در ساختگاه سد برای محاسبه تنش موثر و آب حفره‌ای

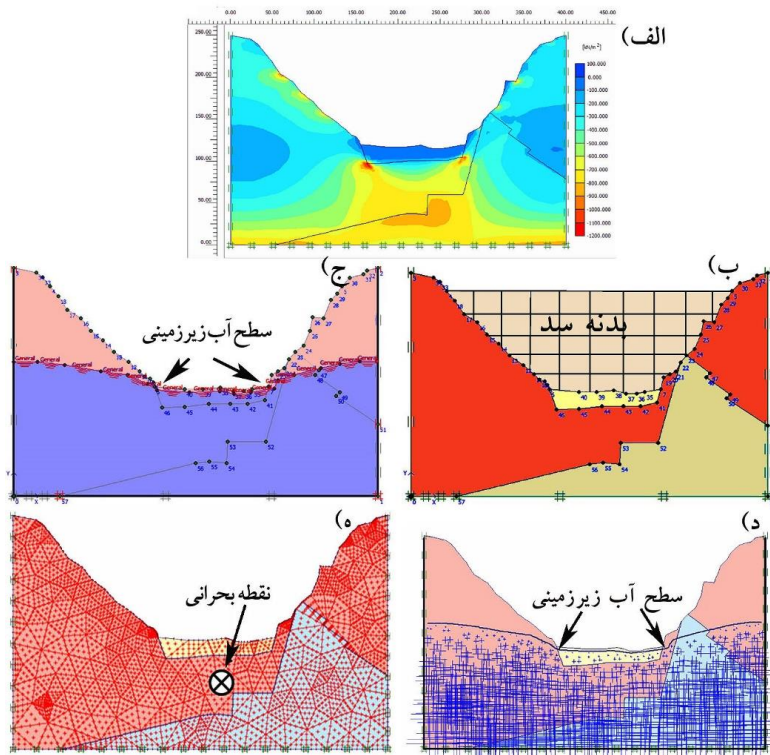
جدول ۲: مشخصات ژئوتکنیکی مصالح مقطع مورد مطالعه سد عمارت

پارامتر	γ_{dry} (KN/m ³)	γ_{sat} (KN/m ³)	ϕ (°)	ν	K_x (m/day)	K_y (m/day)	C (KN/m ²)	E (KN/m ²)
مونزونیت	21.3	25.1	56	0.2	0.004	0.004	140	44000000
توف	20.1	24.3	53	0.22	0.02	0.02	30	50000000
گراول	17.1	20	31	0.3	2	2	5	400000

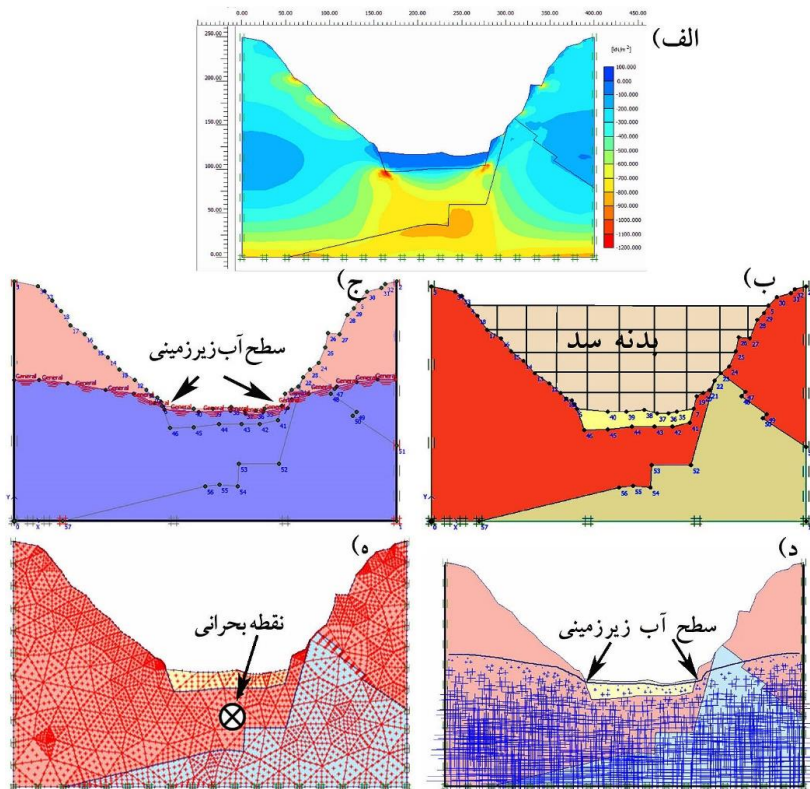
است شرایط اولیه تنش (سطح تنش‌های استاتیکی) در بدنه و پی سد مشخص باشد؛ بنابراین لازم است ابتدا با انجام آنالیز استاتیکی، سطح تنش‌های اولیه در المان‌های مختلف بدست آید. در این بخش آنالیز استاتیکی بصورت غیرخطی و با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب و با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی اولیه انجام شده است. در شکل (۷-ج) وضعیت فشار آب منفذی در پی و جناحین سد پیش از آبیگری سد نمایش داده شده است. لازم به یادآوری است سطح آب زیرزمینی اولیه بر اساس گزارشات موجود در جناحین سد در تراز ۱۳ متری بالای کف دره و در کف دره در نزدیک سطح زمین (عمق ۱/۵ متری) در نظر گرفته شده است. پس از تشریح مدل‌سازی عددی و نحوه انجام کار، به تحلیل نتایج بررسی وضعیت تنش‌ها در مقاطع فرضی حاصل از این مدل‌سازی‌ها پرداخته می‌شود. با توجه به اهداف این پژوهش، ابتدا مقاطع مورد مطالعه در شرایط تنش و آب زیرزمینی اولیه (پیش از ساخت سد) مدل‌سازی شده و در مرحله بعد اثر آبیگری سد مطالعه شده است. نتایج مربوط به پنج مقطع در نظر گرفته شده، شامل تغییرات تنش کل، تنش موثر و فشار آب منفذی نسبت به عمق، پیش و پس از آبیگری سد در شکل ۹ نمایش داده شده است.

در مورد شرایط مرزی باید اضافه کرد، شرایط مرزی برای حدود سمت چپ و راست مدل طوری در نظر گرفته شده که حرکت در جهت محور X غیر ممکن، اما در جهت Y حرکت آزادانه می‌باشد. گره‌های موجود در مرز پایینی مدل نیز در هر دو جهت X و Y ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در این آنالیزها ۵ اندازه مختلف المان در نظر گرفته شد. سپس نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از اندازه مش بسیار ریز که دقیق‌ترین حالت است، مقایسه شد. شایان ذکر است در این آنالیزها دو خروجی جابجایی و تنش موثر به عنوان معیار دقت در نظر گرفته شد. در نهایت نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که کمترین خطا در حالت اندازه مش متوسط بدست می‌آید. ذکر این نکته لازم است که کوچک کردن اندازه المان‌ها و افزایش تعداد آنها علیرغم افزایش دقت نتایج خروجی، موجب افزایش زمان محاسبه نیز خواهد شد. در نهایت برای تحلیل‌های عددی در این مطالعه المان‌ها از نوع مثلثی ۱۵ گره‌ای (شکل ۸) و اندازه آنها در حد متوسط انتخاب شد.

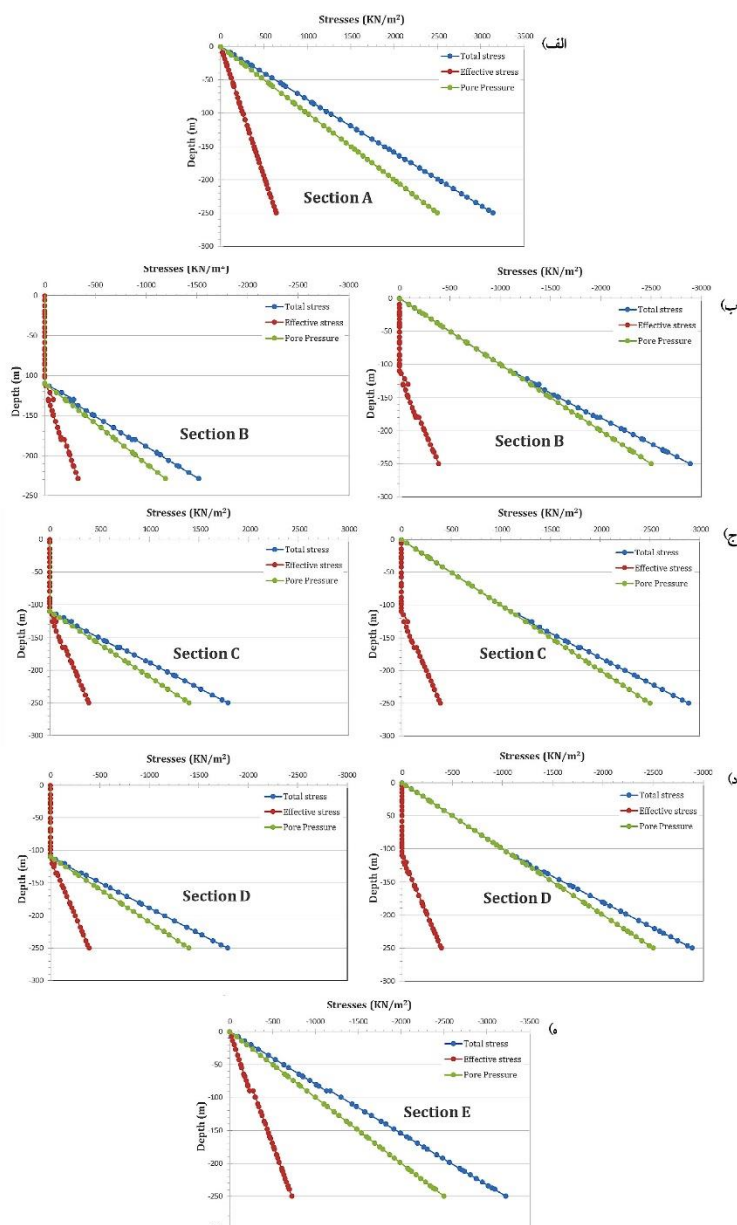
در تعیین وضعیت میدان تنش در پی سد عمارت و همچنین کرنش‌های رخ داده در مدل عددی، لازم



شکل ۷: اشکالی از بخش‌های مختلف مدل سازی توسط نرم افزار پلکسیز شامل: الف- وضعیت اولیه تنش در منطقه، ب- مدل سازی وضعیت توالی‌های سنگی در کف و جناحین سد، ج- وضعیت سطح آب زیرزمینی با توجه به حفاری‌های انجام گرفته، د- مدل سازی وضعیت آب زیرزمینی و ه- تعیین نقطه بحرانی در کف سد بر اساس محاسبات



شکل ۸: موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در المان‌های نرم افزار پلکسیز (Brinkgreve et al., 1998).



شکل ۹: نمودار تغییرات تنش کل، تنش موثر و فشار آب منفذی در مقاطع مختلف

۵- تحلیل مدل شکست پی در اثر آگیری

پرمکاربردترین تعریف ارائه شده برای شکست، گسیختگی با تغییر حالت برگشت ناپذیر به علت تمرکز تنش در سنگ می‌باشد. روشی که بتواند رابطه بین تنش‌ها را در سطح شکست برقرار کند، معیار شکست نام دارد. معیارهای زیادی برای تحلیل شکست سنگ وجود دارد. در این پژوهش از معیار پرمکاربرد هوک و براون (۱۹۸۸) استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_c + S\sigma_c^2} \quad (1)$$

از آنجایی که سنگ‌های پی سد عمدتاً ترکیبی از سنگ‌های آذرین از جنس مونزونیت-مونزودیوریت

و بخشی نیز سنگ‌های آذرآواری (توف) درزه‌دار و دارای کیفیت خوب می‌باشند، بنابراین پارامترهای معیار شکست بر اساس گزارشات مطالعاتی سد عمارت (مهندسین مشاور بندآب، ۱۳۷۴ و ۱۳۷۷) بر اساس بحرانی‌ترین مقاطع بدست آمده که احتمالاً مربوط به زون‌های گسلیده برشی شده می‌باشد ($RMR=35$)، $m=2$ و $s=0.00045$ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در رابطه بالا مقدار σ_c مقاومت تک محوری سنگ توف (که ضعیف‌تر می‌باشد) به عنوان مبنای در نظر گرفته شده است. همچنین طبق پیشنهاد کالاماراس و بنیواسکی (۱۹۹۳) می‌توان پارامترهای معیار شکست سنگ را بر اساس عدد RMR نیز محاسبه کرد.



نه ابتدا نیاز است که پوش گسیختگی توده سنگ مورد مطالعه رسم شود. به این منظور از رابطه معیار شکست هوک براون که پیشتر معرفی گردید، استفاده شده است. برای ترسیم این پوش در رابطه مذکور پارامترهای معلوم شامل مقاومت تراکمی تک محوری سنگ (σ_c) و پارامترهای توده سنگ (S و m) را قرار داده و با فرض σ_3 های مختلف، مقادیر σ_1 محاسبه می شود. به این ترتیب، با داشتن این اطلاعات چندین دایره مور قابل ترسیم خواهد بود و با عبور مماسی بر این دوایر، پوش گسیختگی توده سنگ مورد مطالعه ترسیم شده است (شکل ۱۰). پس از ترسیم پوش گسیختگی و برای بررسی وقوع شکست پس از آبیگری سد، ابتدا در نقطه مورد نظر پیش از آبیگری سد تنش های σ_1 و σ_3 از خروجی های نرم افزار پلکسیز محاسبه شده و بر اساس آنها دایره مور مربوط به پیش از آبیگری سد ترسیم شده است. در مرحله آخر به همین ترتیب تنش های اصلی حداکثر و حداقل را برای نقطه مورد مطالعه (نقطه بحرانی) پس از آبیگری سد محاسبه کرده و دایره مور آن ترسیم گردیده است (شکل ۱۰). با ترسیم دوایر موهر (شکل ۱۰) مشاهده می شود که در شرایط تنش موثر (σ')، وقتی که پی سد فاقد تراوش و فشار آب باشد، تنش برشی که باعث ایجاد گسیختگی شود کافی نبوده به گونه ای که دایره مور مربوطه پوش گسیختگی را قطع نمی کند. اما پس از آبیگری سد و افزایش فشار آب منفذی همانطور که انتظار می رود، دایره مور به سمت مرکز مختصات مهاجرت کرده و به همین دلیل به پوش گسیختگی نزدیک تر شده است که نشان دهنده احتمال بروز شکست بر اثر آبیگری سد در نقطه بحرانی مورد مطالعه می باشد.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = B \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^{0.6} + A \quad (2)$$

$$B = \exp \left(\frac{RMR + 20}{52} \right) \quad (3)$$

$$A = \exp \left(\frac{RMR - 100}{14} \right) \quad (4)$$

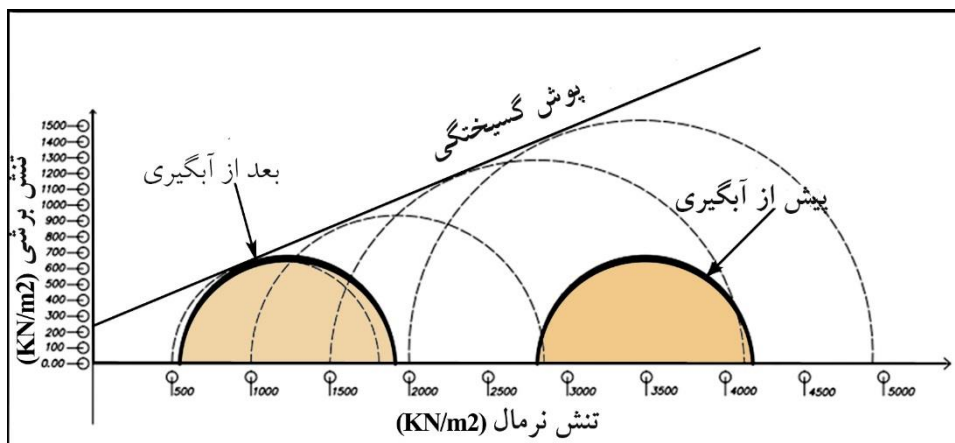
فشار آب حفره ای سطوح شکست از رابطه زیر محاسبه می شود. که در آن ϕ زاویه اصطکاک داخلی سطح ناپیوستگی است.

$$U = \sigma_3 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_c}{\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1} \quad (5)$$

بر اساس پارامترهای مقاومتی توده سنگ C , ϕ , σ_c و اطلاعات سطح ناپیوستگی می توان رابطه بین σ_1 و σ_3 را توسط دایره موهر نشان داد و اثر فشار آب روی سطوح ناپیوستگی را اعمال تا معیار گسیختگی ترسیم گردد. بر اساس شرح گزارش پروژه مقدار مقاومت تک محوری برابر ۸۲۶ کیلوگرم بر سانتی متر مربع منظور شده است. لازم بذکر است مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر با استفاده از رابطه زیر که توسط هوک و براون ارائه شده است، به مقاومت تراکمی تک محوری توده سنگ تبدیل شده است.

$$\sigma_1 = \sqrt{S \sigma_c^2} \quad (6)$$

در رابطه (۶) σ_1 مقاومت تراکمی تک محوری توده سنگ، σ_c مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر و S پارامتر توده سنگ می باشد که بر اساس عدد RMR قابل محاسبه می باشد. به منظور بررسی شرایط ایجاد شکست در توده سنگ پی سد عمارت بر اثر آبیگری، ابتدا نقطه ای در مقطع بحرانی سد (شکل ۷-د) به عنوان نقطه نماینده انتخاب شد. برای تعیین آنکه در شرایط تنش معلوم در توده سنگ شکست رخ خواهد داد یا



شکل ۱۰: محاسبه دواير مور تنش پيش و پس از آبيگري سد در مقطع بحراني مورد مطالعه

۶- بحث و بررسی

سد در حال ساخت عمارت به عنوان مورد مطالعاتی جهت مدل‌سازی دو بعدی عددی مبتنی بر روش اجزای محدود با روش آنالیز غیرخطی کامل (با استفاده از نرم‌افزار پلکسیز) انتخاب گردید تا به این ترتیب امکان شکست پی در اثر آبیگری این سد تحلیل گردد. نتایج این پژوهش نشان داد که سد عمارت بر روی سنگ‌های آذرین مونزونیت- مونزودیوریت در یک منطقه گسلیده با انبوهی از شکستگی‌های سطحی و عمقی در حال ساخت می‌باشد. بررسی گزارشات ژئوتکنیکی و آزمایشات زمین‌شناسی مهندسی نشان داد که جنس پی آبرفتی سد عمارت در تمامی اعماق آن درشت‌دانه و از جنس شن ماسه‌دار سیلتی همراه با قلوه‌سنگ می‌باشد. با توجه به مقادیر RQD، شاخص کیفیت سنگ‌های آذرین تشکیل‌دهنده ساختگاه و تکیه‌گاه‌های چپ و راست سد عمارت در رده خوب و سنگ‌های توفی پیرامون با مقادیر RQD پایین در رده ضعیف ارزیابی شدند. نتایج آزمایشات نفوذپذیری نیز نشان داد که سنگ‌های آذرین و رسوبی تشکیل‌دهنده ساختگاه سد با داشتن اعداد لوژن بزرگتر از ۵ به عنوان توده آنگذر محسوب می‌شوند. با توجه به مقاومت فشاری مغزه‌های سنگی (از سنگ بکر) در شرایط رطوبت طبیعی و اشباع، این سنگ‌ها در رده مقاومتی خوب ارزیابی شدند که تطابق قابل قبولی با نتایج آزمون بار نقطه‌ای برای سنگ‌ها دارد. متوسط مدول الاستیسیته برای سنگ‌های آذرین و رسوبی تشکیل‌دهنده ساختگاه در حالت رطوبت طبیعی و اشباع محاسبه (۴۶۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع

برای سنگ‌های آذرین و ۵۲۰۰۰۰ و ۵۱۰۰۰۰ برای سنگ‌های رسوبی) و ضرایب پواسون مغزه‌ها نیز برآورد گردید (۰/۰۵ تا ۰/۳۸) (جدول ۲). همچنین زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای مغزه‌های سنگ‌های آذرین در ساختگاه سد در شرایط اشباع (۵۶/۱ درجه و ۱۴/۶ مگاپاسکال) بود (جدول ۲). این داده‌ها وارد نرم‌افزار عددی پلکسیز شده و شبیه‌سازی عددی سد و پیرامون انجام گردید. در ادامه، تنش‌های کل و موثر و همچنین فشار آب منفذی محاسبه شد. در نهایت تنش‌های بدست آمده از روش عددی توسط معیار شکست هوک و براون به منظور احتمال وقوع شکست در پی سد عمارت مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج تحلیل شکست توسط معیار هوک و براون نشان داد که در شرایطی که پی سد فاقد تراوش و فشار آب باشد؛ دایره مور مربوطه پوش گسیختگی را قطع نمی‌کند و به معنای آن است که تنش برشی باعث ایجاد گسیختگی نخواهد شد. اما پس از آبیگری سد و افزایش فشار آب منفذی، دایره مور به سمت مرکز مختصات مهاجرت نموده و به همین دلیل به پوش گسیختگی تا حدودی تماس شده است که این مسئله نشان‌دهنده احتمال بروز شکست بر اثر آبیگری سد (در نقطه بحرانی) می‌باشد.

شایان توجه است که پارامترهای اولیه استفاده شده در ترسیم پوش گسیختگی مربوط به توده سنگ می‌باشد که با اعمال ضرایبی کاهش یافته است، در حالی که پارامترهای مقاومتی در شکستگی‌ها و زون‌های گسله بسیار ضعیف‌تر از توده سنگ است. به همین دلیل پیش‌بینی می‌شود که در اثر آبیگری سد، بجای این



که باعث ایجاد گسیختگی شود کافی نخواهد بود به گونه ای که دایره مور مربوطه پوش گسیختگی را قطع نمی کند. اما پس از آبیگری سد که منجر به افزایش فشار آب منفذی می شود (شکل ۱۰)؛ دایره مور به سمت مرکز مختصات حرکت نموده و به همین دلیل به پوش گسیختگی مماس شده است (شکل ۱۱) که این مسئله حاکی از احتمال بروز شکست بر اثر آبیگری سد در نقطه بحرانی سد می باشد. با توجه به اینکه بیشتر زلزله های القایی در ارتباط با گسله های نرمال و امتداد لغز خواهند بود؛ به همین دلیل انتظار فعالیت گسل رانده (معکوس) عمارت دور از انتظار بوده و این مسئله فقط می تواند باعث فعالیت گسل بالان (دارای مولفه نرمال) گردد.

سپاسگذاری:

این پروژه تحقیقاتی با حمایت مالی کمیته تحقیقات شرکت آب منطقه ای اردبیل تحت قرارداد شماره ۹۵/۲/۷۹۳۹/۹۰۰ مورخ ۱۳۹۵/۰۸/۰۱ با کد ۹۳۰۲۵-ARD با دانشگاه گلستان به انجام رسیده است. بدینوسیله از زحمات مسئولین سازمان آب منطقه ای اردبیل و معاونت پژوهشی دانشگاه گلستان که با کمک های شایان خود زمینه را برای انجام این پروژه تحقیقاتی فراهم نمودند، کمال تشکر را داریم.

منابع

- صفری، ح.، آق آتابای، م.، رضایی، ح.، طبرسا، ع.، یازرلو، ر.، عباس زاده، ز.، ۱۳۹۸، گزارش نهایی طرح پژوهشی: بررسی سدهای مهم استان اردبیل از لحاظ احتمال ایجاد زلزله های القایی با پیش بینی بزرگترین زلزله محتمل (سدهای یامچی و عمارت به عنوان مورد مطالعاتی)، دانشگاه گلستان- سازمان آب منطقه ای اردبیل، ۳۴۰ صفحه.

- مهندسین مشاور بندآب، ۱۳۷۴، طرح سد یامچی: مطالعات مرحله یکم (جلد دوم: زمین شناسی و ژئوتکنیک)، نشریه شماره ۱۵۳، ۳۳۰ صفحه

- مهندسین مشاور بندآب، ۱۳۷۷، طرح سد اردبیل: مطالعات مرحله دوم (زمین شناسی مهندسی ساختگاه)، نشریه شماره ۲۴۰، ۱۳۷ صفحه

- Abouseeda, H., Dakoulas, P., 1996. Response of earth dams to P and SV waves using coupled FE-BE formulation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 1177-1194.

- Abouseeda, H., Dakoulas, P., 1998. Non-linear dy-

شکستگی های جدید، زون های گسلیده قدیمی (مربوط به گسل های اصلی نظیر گسل عمارت و بالان) که در مجاور سد قرار گرفته اند، دچار شکست و فعالیت گردند. به اعتقاد صفری و همکاران (۱۳۹۸)، در معیار شکست مور- کولمب، اثرات وزن آب و افزایش فشار منفذی بر روی گسل های نرمال و امتداد لغز بیشتر می باشد. به عبارتی، این گسل ها در برابر عوامل فوق الذکر حساسیت بیشتری از خود بروز می دهند، یعنی گسله های نرمال و امتداد لغز در حالتی که تنش برشی به حداکثر و تنش قائم به کمترین میزان خود رسیده باشد؛ احتمالاً فعال خواهند شد. در گسل های معکوس این پدیده به راحتی رخ نخواهد داد، زیرا تنش نرمال به شدت بالا است. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که بیشتر زلزله های القایی در ارتباط با گسله های نرمال و امتداد لغزی خواهند بود که با طول نسبتاً زیاد دارای امتدادی موازی با محور سد باشند. زیرا در گسله های معکوس موازی با محور سد (با جهت شیب رو به مخزن) افزایش وزن سرباره میزان 3σ را افزایش می دهد. به همین دلیل انتظار فعالیت مجدد گسل رانده (معکوس) عمارت دور از انتظار بوده و این مسئله فقط می تواند باعث فعالیت مجدد گسل بالان گردد. به این ترتیب می توان پیش بینی نمود که اگر چه این آبیگری سبب تغییرات نسبتاً ناچیزی در شرایط تنش در عمق لرزه خیز می شود؛ با اینحال، گسل های تحریک شده مسبب لرزه خیزی اگر در حالت بحرانی جهت آزاد شدن انرژی باشند؛ آبیگری سبب افزایش استرس وزنی و یا افزایش فشار منفذی شده و می تواند سبب آزاد شدن انرژی به صورت زلزله القایی (و یا تحریک گسل های مستعد) شود. این مسئله می تواند بدون در نظر گرفتن لرزه خیزی پایه منطقه ای یا ناحیه ای باشد؛ زیرا در بسیاری از موارد در دنیا این رخداد پس از یک وقفه بلند مدت در فعالیت های لرزه ای رخ داده است.

۷- نتیجه گیری

بررسی امکان شکست پی در اثر آبیگری سد در حال ساخت عمارت با استفاده از مدل سازی دو بعدی عددی (مبتنی بر روش اجزای محدود با روش آنالیز غیر خطی کامل) نشان داد که در شرایط تنش موثر (σ')، وقتی که پی سد فاقد تراوش و فشار آب باشد، تنش برشی



- EERC, 73-16, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Mroz, Z., 1967. On the description of anisotropic work hardening, *Journal of Mechanics and Physical Solids*, 15(3), 163-175.
- Nahhas, T. M., 1987. Dynamics of earth dams, PhD thesis, University of Southern California, Los Angeles.
- Prevost, J. H., 1981. DYNFLOW: A Nonlinear Transient Finite Element Analysis Program, Technical Report: 81-SM-1, Princeton University.
- Prevost, J. H., Abdel-Ghaar, A. M., Lacy, S. J., 1985. Nonlinear Dynamic Analyses of an Earth Dam, *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(7), 882-897.
- Qiuliang, W., Yunsheng, Y., Jinwu, X., Wenjing, Z., Dun, W., Jinggang, L., Lifan, Z., 2008. Study on methods of Reservoir Induced Seismicity Prediction of the three Gorges reservoir, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Seed, H. B., Makdisi, F. I., Idriss, I. M., Lee, K. L., 1971. The Slides in the San Fernando Dams During the Earthquake of February 9, 1971', *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(7), 651-688.
- Spyrakos, C. C., Beskos, D. E., 1986. Dynamic response of flexible strip foundations by boundary and finite elements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5, 84-96.
- Von Estorff, O., Kausel, E., 1989. Coupling of boundary and finite element for soil-structure interaction problems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 18, 1065-1075
- Woodward, P. K., Griffiths, D. V., 1996. Influence of viscous damping in the dynamic analysis of an earth dam using simple constitutive models, *Computers & Geotechnics*, 19(3), 245-263.
- dynamic earth dam foundation interaction using a FE-BE formulation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 917-936.
- Ambraseys, N. N., 1960. On the shear response of a two-dimensional truncated wedge subjected to arbitrary disturbance, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 50(1), 45-56.
- Ambraseys, N.N., Meville, C. P., 1982. A history of Persian earthquakes, Cambridge university press, Cambridge, 500 p.
- Brinkgreve, R.B.J., Bakker, K.J., 1998. Finite element codes for soil and rock analysis, A.A. Balkema Publishers.
- Chopra, A. K., 1967. Earthquake response of earth dams, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE* 93(SM2), 1399-1412.
- Daghighi, Y., 1993. Numerical simulation of Dynamic Behaviour of an Earth Dam During Seismic Loading, PhD Thesis, Delf University of Technology, Netherland.
- Elgamal, A. W., Abdel-Ghaar, A. M., Prevost, J. H., 1987. 2D Elastoplastic Seismic Shear Response of Earth Dams: Theory, *Journal of Engineering Mechanics*, 113(5), 689-701.
- Griffiths, D. V., Prevost, J. H., 1988. Two- and three-dimensional dynamic finite element analyses of the long valley dam, *Geotechnique*, 38(3), 367-388.
- Hoek, E., 2006. Practical Rock Engineering, Evert Hoek Consulting Engineer Inc., 340p.
- International Committee on Large Dams (ICOLD), 2016. Selecting Seismic Parameters For Large: guidelines (Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design), Bulletin No. 144, , 42 p.
- International Committee on Large Dams (ICOLD), 2011. Reservoir and Seismicity: State of Knowledge, Bulletin No. 137, 51 p.
- International Committee on Large Dams (ICOLD), 2010. Selecting Seismic Parameters For Large: Guidelines, Bulletin No. 72, Revision, 42 p.
- Idriss, I. M., Hwang, J. L. R., Seed, H. B., 1973. QUAD-4: A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures, Technical Report

