

ارزیابی فشارهای منفذی هسته سد خاکی کرخه تحت بار زلزله با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی

سید مهدی نصراللهیⁱ؛ سید مجدالدین میرمحمدحسینیⁱⁱ

چکیده

امروزه با پیشرفت تکنولوژی ساخت سدهای خاکی، ارتفاع این سدها به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. تخریب چنین سدهایی می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را در منطقه ایجاد نماید. سد کرخه بزرگترین سد کشور از نوع خاکی با هسته رسی مخلوط است. اطمینان از پایداری چنین سدی به خصوص در هنگام زلزله بسیار حائز اهمیت است. هنگامی که یک سد خاکی تحت تأثیر شتاب زلزله قرار می‌گیرد فشارهای منفذی هسته تحت تأثیر نیروی زلزله تغییر می‌نمایند. افزایش فشارهای منفذی و باقی ماندن آنها در این حالت، بویژه زمانی که هنوز فشارهای منفذی اضافی ناشی از ساخت سد بطور کامل از بین نرفته است، می‌تواند سبب بروز مشکلات جدی در پایداری سد شود. در این مقاله فشارهای منفذی هسته سد کرخه پس از اعمال شتاب زلزله با روش‌های عددی محاسبه شد. نتایج تحلیل دینامیکی نشان داد که میزان فشارهای منفذی بویژه در ترازهای میانی افزایش یافته است. اما میزان افزایش فشارهای منفذی به گونه‌ای است که در هیچ نقطه‌ای از تنش‌های فشاری موجود فراتر نمی‌رود. به عبارت دیگر میزان ضریب فشار منفذی در همه نقاط هسته سد کمتر از ۰/۷۱ است.

کلمات کلیدی

سد کرخه، هسته رسی مخلوط، تحلیل دینامیکی غیرخطی، فشار آب منفذی.

The Prediction of Pore Pressure Development in Mixed Clay Core of Karkheh Large Embankment Dam During Earthquake Loadings with Nonlinear Analysis

S. M. Nasrollahi; S.M.Mir Mohammad Hosseini

ABSTRACT

Pore pressure within the core of the embankment dams plays a decisive role in performance of the earth dams. Although it may be high during the construction stage of the dam, it will be dissipated to a reasonable level as the consolidation process of the core is progressing in the long term. However, if these dams experience heavy earthquakes, the rapid increase of the pore pressure may put the dam at risk in some critical conditions. In this paper the pore pressure development of the Karkheh newly constructed large embankment dam, by a mixed clay core, during the earthquake loading has been investigated. The results of the dynamic analyses revealed that the value of the developed pore pressure at the middle Level of the core increases during an earthquake. But, it never exceeds the total earth pressure existing at different points. In other words, the pore pressure ratio is always less than 0.71, even during the earthquake in short time periods.

ⁱ کارشناس ارشد خاک و پی؛ عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قاینات (مریی)؛ نشانی: خراسان جنوبی، قاین، دانشگاه آزاد

اسلامی؛ تلفن: ۰۹۱۵۵۱۷۲۸۷۳؛ پست الکترونیک: s.m.nasrollahi@gmail.com

ⁱⁱ دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ پست الکترونیک: mirh53@yahoo.com

KEYWORDS

Karkheh Dam, Mixed clay core, Non-linear dynamic analysis, Pore pressure, Earthquake loadings.

۱- مقدمه

روش خطی معادل است. در این روش با استفاده از مقادیر اولیه میرایی و مدول برشی یک تحلیل خطی به انجام می‌رسد. سپس با استفاده از منحنی‌های آزمایشگاهی مربوطه و مقدار حداکثر کرنش برشی مقادیر جدید میرایی و مدول برشی محاسبه می‌گردد. این مقادیر برای یک تحلیل جدید استفاده می‌شوند. این عملیات چندین مرتبه تکرار شده تا خواص مصالح دیگر تغییر نکنند.

در روش تحلیل غیرخطی که در اینجا استفاده شده، رابطه غیرخطی تنش-کرنش مستقیماً بوسیله هر یک از عناصر مدل تعقیب می‌گردد. با استفاده از این مدل میرایی و مدول برشی مصالح در سطوح مختلف کرنش بصورت خودکار محاسبه می‌شود. این روش به یک مدل تنش-کرنش جامع برای تخمین رفتار دینامیکی مصالح نیاز دارد.

۱-۲- رفتار تنش کرنش هیستریزیس در برش

رفتار واقعی خاک‌ها در بارگذاری سیکی مانند شکل (۱) بصورت غیرخطی و هیستریزیس است. این رفتار را می‌توان توسط مدل میسینگ (Masing 1926) که توانایی شبیه‌سازی رفتار میرا کننده خاک را دارد مدل نمود. در این مدل، رفتار برشی خاک بوسیله یک منحنی اصلی با رابطه $\tau = F_{bb}(\gamma)$ بیان می‌شود که تابع F_{bb} بصورت رابطه (۱) است [۲].

$$F_{bb}(\gamma) = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + (G_{\max} / \tau_{\max}) |\gamma|} \quad (1)$$

در بارگذاری اولیه، منحنی تنش کرنش از منحنی اصلی تبعیت می‌کند. برای بیان رفتار باربرداری بارگذاری مجدد رابطه بالا اصلاح شود. اگر برگشت تنش در نقطه (γ_r, τ_r) اتفاق افتد، منحنی تنش کرنش از مسیری تبعیت می‌کند که طبق رابطه (۲) بیان شود.

$$\frac{\tau - \tau_r}{2} = F_{bb} \left(\frac{\gamma - \gamma_r}{2} \right) \quad (2)$$

به عبارت دیگر منحنی‌های باربرداری و بارگذاری مجدد دارای همان شکل منحنی اصلی بوده با مبدایی که به طرف نقطه برگشت تنش جابجا شده است، لیکن با ضریب ۲ بزرگتر شده‌اند.

سد کرخه بزرگ ترین سد مخزنی کشور است که در جنوب غربی ایران واقع شده است. این سد از نوع خاکی با هسته رسی مخلوط بوده که تاج طولی آن حدود ۲۰۳۰ متر است. ارتفاع سد در عمیق‌ترین محل بستر رودخانه ۱۲۷ متر است. عرض سد در تاج ۱۲ متر و حداکثر عرض در پی ۱۱۰۰ متر است. سد کرخه بر روی یک توده سنگ کنگلومرایی که در برگرفته عدسی‌های گلسنگی است ساخته شده است. به منظور اطمینان از پایداری سد و بررسی نحوه عملکرد و رفتار سد کرخه در طول دوران ساخت و بهره‌برداری، یک سیستم رفتار سنجی برای سد در نظر گرفته شده است.

اطمینان از پایداری سد در شرایط بارگذاری مختلف بسیار حائز اهمیت است. مهم ترین این شرایط، حالت بارگذاری زلزله است که بدلیل غیرقابل پیش‌بینی بودن زمان وقوع و بزرگی آن طرح سدها را با مشکل مواجه می‌کند. اینکه سازه سد خاکی در اثر جنبش زلزله چه نوع رفتار و عکس‌العملی را نشان دهد پاسخ روشنی ندارد و برحسب شرایط مختلف (شرایط سد، منطقه و مشخصات زلزله) رفتارهای متفاوتی را می‌توان تصور نمود. این مسأله ناشی از رفتار غیرارتجاعی و غیرخطی مصالح خاکی است، بدین صورت که رفتار سد خاکی تحت تأثیر امواج ضعیف کاملاً ارتجاعی بوده ولی در صورت اعمال امواج لرزه‌ای قوی‌تر می‌تواند وارد محدوده خمیری گردد. این مقاله به بررسی فشارهای منفذی هسته سد کرخه پس از اعمال شتاب زلزله می‌پردازد [۱].

در این تحقیق از نرم‌افزار FLAC ver.4 جهت مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی سد استفاده شده است. این نرم افزار یک برنامه دوبعدی برای تحلیل سازه‌های خاکی است که توانایی تحلیل اندرکنش آب و خاک و زلزله را دارد. برای محاسبه شرایط اولیه تحلیل دینامیکی با استفاده از نتایج موجود ابزار دقیق، سد بصورت استاتیکی تحلیل شده و سپس با توجه به مطالعات لرزه‌خیزی محل و ملاحظات طراحی، شتاب نگاشت مناسبی به مدل اعمال شده است و در نهایت پایداری هسته از جهت مقدار فشارهای منفذی بررسی شده است.

۲- تحلیل دینامیکی غیرخطی

یکی از روش‌های معمول برای تحلیل پاسخ زمین به عبور امواج و بررسی رفتار اندرکنش دینامیکی سازه‌های خاکی،

$$G_r = \frac{G_{max}}{\left(1 + \frac{G_{max}}{2\tau_{max}} |\gamma - \gamma_r|\right)^2} \quad (4)$$

تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌های بار میزان تنش برشی تقلیل یافته و بعبارت دیگر منحنی‌های تنش کرنش برشی خوابیده‌تر می‌شوند. تحقیقات لی و همکارانش (X.S. Li & Z.Y. Cai, 1999) نشان داد که گرچه با افزایش تعداد سیکل‌ها مقدار مدول برشی مصالح کاهش می‌یابد، در محدوده سیکل‌هایی که غالباً در یک زلزله تجربه می‌شود این مقدار تقریباً ثابت باقی خواهد ماند [۸].

مقدار مدول برشی بیشینه مصالح را می‌توان از روابط تجربی موجود بدست آورد. در خاک‌های رسی مقدار مدول برشی بیشینه را می‌توان از رابطه سید و ایدریس که بصورت (۵) ارائه شده بدست آورد [۲].

$$G_{max} = 625 F(e) (OCR)^n P_a \left(\frac{\sigma'_m}{P_a}\right)^n \quad (5)$$

در این رابطه OCR ضریب پیش تحکیم‌یافتگی و k توان ضریب پیش تحکیم‌یافتگی است که بصورت تابعی از دامنه خمیری خاک بیان می‌شود. σ'_m تنش مؤثر اصلی متوسط و n توان تنش است که مقدار آن غالباً برابر ۰/۵ انتخاب می‌شود. $F(e)$ تابعی از تخلخل است که روابط متعددی برای آن پیشنهاد شده که از جمله آنها رابطه هاردین (Hardin, 1978) است که بصورت (۶) بیان می‌شود.

$$F(e) = \frac{1}{(0.3 + 0.7e^2)} \quad (6)$$

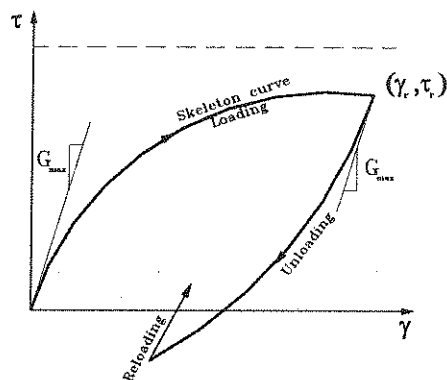
هم چنین برای تخمین مقدار مدول برشی بیشینه خاک‌های درشت‌دانه می‌توان از رابطه (۷) که توسط سید و همکارانش (Seed et. Al., 1986) ارائه شده است استفاده نمود [۶].

$$G_{max} = 21.7 P_a K_{2max} \left(\frac{\sigma'_m}{P_a}\right)^{0.5} \quad (7)$$

ضریب K_{2max} عاملی است که تابع نوع و چگالی مصالح است و می‌توان بر اساس چگالی نسبی مصالح مقدار آن را تخمین زد.

۲-۲- روش حل معادلات بوسیله FLAC

نرم افزار 2D FLAC برنامه‌ای است که با استفاده از تفاضل محدود و بر اساس معادلات کرنش مسطح قادر به تحلیل تراوش، تحکیم و لرزه‌ای است. اساس کار این برنامه برپایه معادلات حرکت در یک محیط پیوسته است. در این برنامه معادلات حرکت بکار می‌روند تا سرعت‌ها و تغییر مکان‌های جدید از تنش‌ها و نیروهای موجود بدست آیند.



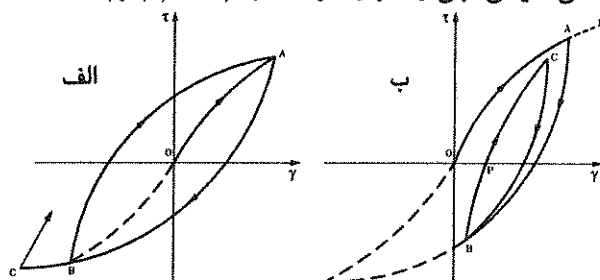
شکل (۱): نمایش کلی مسیر بارگذاری و باربرداری خاک‌ها

مقدار نسبت $\frac{G_{max}}{\tau_{max}}$ وابسته به پارامترهای پوکی (e)، تنش مؤثر قائم (σ'_v) و شاخص خمیری خاک است. این مقدار را می‌توان از طریق جداولی که توسط Hardin & Dmnevich ارائه شده است، تخمین زد [۶].

قوانین میسینگ (Masing 1926) جهت توصیف پاسخ خاک تحت بارگذاری سیکلی عمومی کافی نیست. فین و همکارانش (Finn et. Al., 1976) قوانینی را برای بارگذاری نامنظم ارائه دادند. آنها پیشنهاد کردند که منحنی‌های باربرداری و بارگذاری مجدد از دو قانون زیر نیز پیروی کنند [۷]:

- اگر منحنی باربرداری یا بارگذاری مجدد از آخرین کرنش ماکزیمم تجاوز نموده و منحنی اصلی را قطع کند، تا برگشت بعدی تنش، منحنی اصلی را دنبال خواهد کرد (شکل (۲) الف).

- اگر یک منحنی باربرداری یا بارگذاری مجدد از منحنی باربرداری یا بارگذاری قبلی عبور کند، منحنی تنش-کرنش منحنی سیکلی قبلی را دنبال خواهد کرد (شکل (۲) ب).

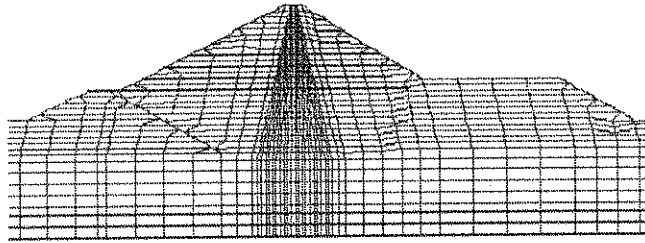


شکل (۲): نمایش قوانین اصلاح شده میسینگ [۷]

بر طبق این مدل، مدول برشی مماسی در نقطه‌ای روی منحنی اصلی بوسیله رابطه (۳) تعریف می‌شود [۷].

$$G_r = \frac{G_{max}}{\left(1 + \frac{G_{max}}{\tau_{max}} |\gamma|\right)^2} \quad (3)$$

مدول برشی مماسی در نقطه‌ای روی منحنی باربرداری- بارگذاری مجدد نیز بوسیله رابطه (۴) تعریف می‌شود [۷].



شکل (۳): نمای کلی شبکه تفاضل محدود

۳-۱- تخمین شرایط اولیه تحلیل دینامیکی (تحلیل استاتیکی)

برای ایجاد شرایط اولیه تحلیل دینامیکی، مدل سازی برای سد از زمان شروع به ساخت آن آغاز شد. با توجه به ماهیت ساخت لایه‌ای سد و در نتیجه تغییر خواص مصالح با افزایش ارتفاع خاکریزی، برای مصالح هسته و پوسته سد از مدل غیرخطی دانکن چانگ استفاده شد. مصالح پی نیز توسط مدل رفتاری موهر کولمب تعریف شد. مراحل مختلف ساخت سد و بدنبال آن مراحل مختلف آبیگری سد طی ۳۲ مرحله از ابتدای ساخت تا پایان آبان ماه سال ۱۳۸۲ مدل‌سازی شد. با تحلیل‌های برگشتی و تغییر پارامترهای رفتاری مصالح نتایج بدست آمده از ابزار دقیق [۴] بازسازی شد و بدین ترتیب شرایط واقعی سد بدست آمد.

۳-۲- خصوصیات دینامیکی مصالح

جهت شرایط اولیه تحلیل دینامیکی، نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی استفاده شد. برای این منظور مدل رفتاری Masing برای شبیه‌سازی رفتار مصالح هسته و پوسته استفاده شد. رفتار مصالح پی نیز بصورت خطی در نظر گرفته شد که با توجه به جنس و سختی آن در مقایسه با مصالح بدنه سد فرض صحیحی به نظر می‌رسد. در مصالح هسته سد کرخه که به صورت مخلوطی از رس با درصد بالایی از مصالح دانه‌ای (حدود ۴۰٪ درشت‌دانه) است، از روابط تجربی مربوط به مصالح درشت‌دانه جهت تخمین مقدار G_{max} استفاده شده و برخی از این مقادیر با توجه به نتایج آزمایشات دینامیکی انجام شده [۳] کنترل شد [۱].

خلاصه پارامترهای مورد استفاده در تحلیل دینامیکی در جدول (۱) و جدول (۲) آورده شده است. هم چنین با توجه به انجام تحلیل تنش مؤثر مقادیر ضریب پواسون با توجه به شرایط زهکشی شده انتخاب شد.

سپس نرخ کرنش از سرعت‌های گرهی جدید در هر المان محاسبه می‌شود. برای حل یک مسأله روند کار چنین است که با داشتن گرادینان سرعت، نرخ کرنش از رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

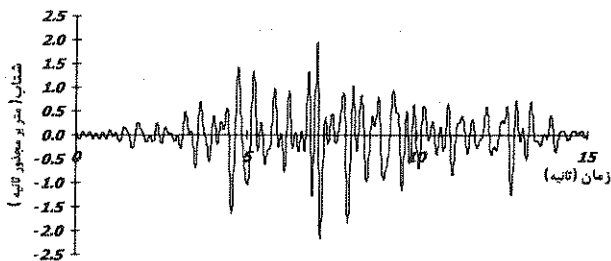
در این معادله e_{ij} مؤلفه‌های نرخ کرنش و \dot{u}_i مؤلفه‌های سرعت هستند. در این مرحله از روابط مشخصه مکانیکی که به شکل کلی رابطه (۹) است برای بدست آوردن تانسور تنش استفاده می‌شود.

$$\sigma_{ij} = M(\sigma_{ij}, \dot{e}_{ij}, \kappa) \quad (9)$$

در این رابطه M قانون مشخصه رفتاری، κ پارامتر تاریخچه که بسته به قانون مشخصه ممکن است وجود داشته یا نداشته باشد. در این برنامه تمام معادلاتی که در بالا ذکر آن رفت بوسیله روش تفاضل محدود حل می‌شود [۹].

۳- تحلیل دینامیکی سد کرخه

به منظور انجام تحلیل ابتدا بایستی مقطعی از سد به عنوان مقطع بحرانی انتخاب شود. این انتخاب به گونه‌ای بوده است که تأمین پایداری برای مقطع بحرانی، پایداری سد را در کلیه مقاطع دیگر فراهم آورد. با مقایسه مقاطع مختلف ابزارگذاری سد و در نظر گرفتن رقوم پی، ارتفاع خاکریزی و عمق دره، بحرانی‌ترین مقطع سد کرخه به لحاظ ایجاد و تجمع فشارهای منفذی، نشست حداکثر، مقطع ۵-۵ سد واقع در ایستگاه ۱۰۰/۲۳۰+ است. این مقطع در شکل (۱۵) نشان داده شده است. محدوده مدل‌سازی شامل بدنه سد و فرازبند به همراه قسمتی از پی سد به عمق ۷۰ متر و طول ۲۵۰ متر در بالادست پنجه و ۲۵۰ متر در پائین‌دست پاشنه می‌باشد. جهت مدل‌سازی از یک شبکه ۲۳×۸۰ استفاده شده است. به منظور امکان مدل کردن ساخت مرحله‌ای، بدنه سد به صورت لایه‌های ۵ متری مدل شده است. به دلیل حساسیت هسته سد و متمرکز شدن این تحقیق بر روی نتایج بدست آمده از آن، از شبکه ریزتری در محدوده هسته استفاده شد به طوری که ۲۰ المان در عرض هسته قرار گرفت. نمای کلی هندسه و شبکه المان‌های پی و بدنه سد در شکل (۳) نشان داده شده است. در تحلیل دینامیکی برای جذب انرژی در طرفین مساله از مرزهای آزاد (Free Field) استفاده شد. این شرایط باعث می‌شود که امواج رسیده به نقاط مرزی به داخل مدل منعکس نشوند و در نتیجه محدود کردن طرفین مدل تأثیری بر نتایج نداشته باشد.

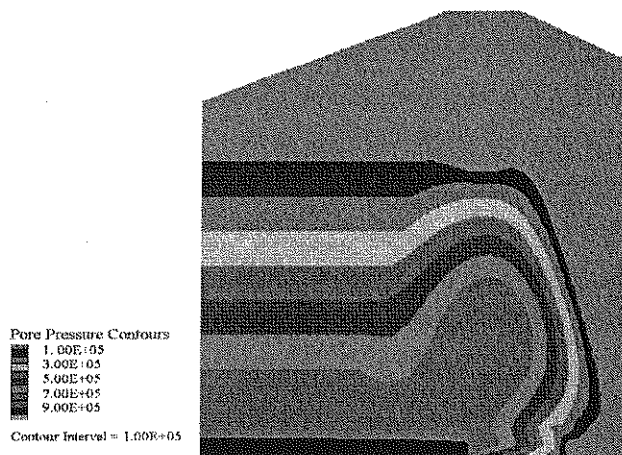


شکل (۴): موج ورودی در تحلیل دینامیکی

برای کاهش زمان تحلیل و جلوگیری از واگرایی عددی تنها ۱۵ ثانیه اول زلزله انتخاب شد و فرکانس‌های بالای ۵ هرتز از شتاب نگاشت مورد نظر حذف شد. این شتاب به پایه مدل که در عمق ۷۰ متری سطح زمین قرار دارد اعمال می‌شود.

ع- ارزیابی فشارهای منفذی هسته سد پس از زلزله

رفتار خاک‌های رسی متراکم و اشباع تحت بارهای زلزله متفاوت از رفتار ماسه‌های اشباع است. به عبارت دیگر ذرات خاک‌های رسی در هنگام زلزله دچار تغییر آرایش نمی‌شوند. افزایش فشارهای منفذی هسته‌های رسی می‌تواند به علت کاهش قوس‌زدگی و ول‌شدگی مصالح هسته، افزایش تنش‌های قائم هسته و تغییر شکل‌های تحمیلی از سوی پوسته سد باشد. با فرض آنکه در طول زمان زلزله فشارهای آب حفره‌ای ایجاد شده در اثر بارگذاری زلزله فرصت زهکشی ندارند (آنالیز تراوش غیرفعال شده و رفتار مصالح زهکشی‌نشده در نظر گرفته شده است) تحلیل دینامیکی به انجام رسید. مشاهده شد که تغییرات محسوسی در فشارهای منفذی هسته سد بوجود می‌آید به گونه‌ای که هم مقدار و هم الگوی توزیع فشارهای منفذی هسته تحت تأثیر شتاب زلزله قرار گرفت (شکل ۵) و (شکل ۶).



شکل (۵): الگوی توزیع فشارهای منفذی هسته سد پیش از زلزله

جدول (۱): پارامترهای دینامیکی و روابط حاکم بر مصالح هسته و پوسته سد کرخه

پارامترها	مصالح رسی مخلوط (هسته)	مصالح درشت‌دانه (پوسته)
n	۰/۳۴	۰/۲۵
G_{max}	$21.7 P_a (40) \left(\frac{\sigma_m}{P_a}\right)^{0.5}$	$21.7 P_a (130) \left(\frac{\sigma_m}{P_a}\right)^{0.5}$
PI	۱۵	۰/۰
γ'_r	$7.7 \times 10^{-7} \sqrt{\sigma_v}$	$6 \times 10^{-7} \sqrt{\sigma_v}$
G_i منحنی اصلی	$\frac{G_{max}}{\left(1 + \frac{G_{max} \gamma }{\tau_{max}}\right)^2}$	
G_i منحنی بارگذاری-بارگذاری	$\frac{G_{max}}{\left(1 + \frac{G_{max}}{2\tau_{max}} \gamma - \gamma_r \right)^2}$	

جدول (۲): پارامترهای دینامیکی و روابط حاکم بر مصالح پی و فیلتر سد کرخه

مصالح دانه‌ای فیلتر		پی [۵]	
G_{max}	G_i	$V_s (km/s)$	G_{max}
$21.7 P_a (50) \left(\frac{\sigma_m}{P_a}\right)^{0.5}$	$0.7 G_{max}$	۱	ρV_s^2

توضیحات: با فرض آنکه تغییرات G_i در خلال بارگذاری اندک بوده، از آن چشم‌پوشی شده و ثابت فرض شده است.

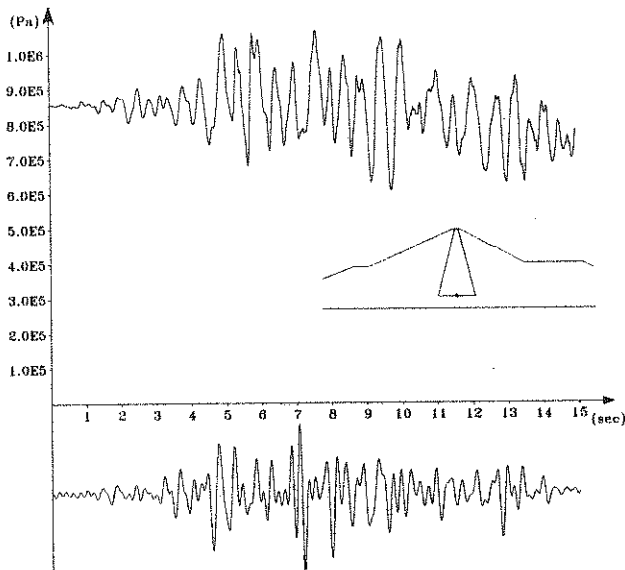
۳-۳- شتاب ورودی

به منظور بدست آوردن پارامترهای لرزه‌خیزی ساختگاه سد کرخه مطالعات لرزه زمین ساخت و تحلیل خطر زمین‌لرزه انجام یافته است. با استفاده از روش‌های احتمالی پارامتر DBE (زمین‌لرزه مبنای طرح) در ساختگاه سد کرخه مطابق جدول (۳) توصیه شده است [۵].

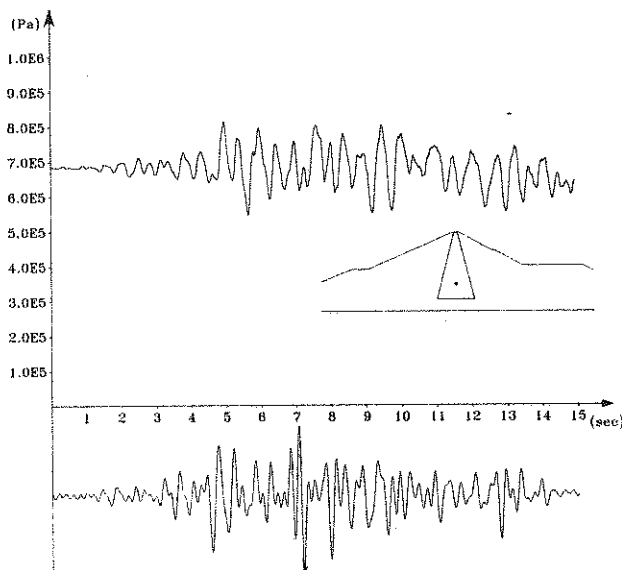
جدول (۳): پارامترهای زمین لرزه مبنای طرح در ساختگاه سد کرخه

251 cm/sec^2 معادل $0.256g$	بیشینه شتاب طرح	DBE
33 cm/sec	بیشینه سرعت طرح	
15 cm	بیشینه جابجایی طرح	

با توجه به پارامترهای DBE ساختگاه سد کرخه و با مقایسه شتاب نگاشت‌های ثبت شده در ایران شتاب نگاشت زلزله دیهوک (شکل (۴)) به شماره رکورد ۱-۱۰۸۲ که شباهت زیادی به پارامترهای طراحی دارد انتخاب شد.

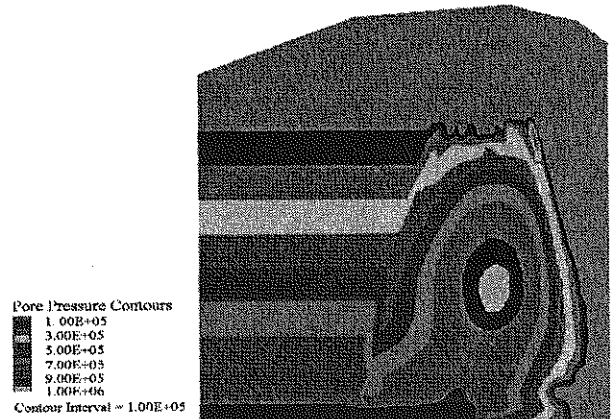


شکل (۷): روند تغییرات فشار منفذی محاسبه شده با مدل عددی تحت بار زلزله در محل ابزار EP 5-3 در تراز ۱۰۶ متر هسته



شکل (۸): روند تغییرات فشار منفذی محاسبه شده با مدل عددی تحت بار زلزله در محل ابزار EP 5-12 در تراز ۱۳۵ متر هسته

با دقت در شکل (۶) مشاهده می‌شود هر چه از قسمت‌های تحتانی هسته به سمت ترازهای بالاتر حرکت کنیم تأثیر شتاب زلزله بر روی تغییر فشارهای منفذی محسوس‌تر است. هم چنین حداکثر مقدار فشارمنفذی ایجاد شده در هسته به مقدار 1.023 KPa رسیده است که نسبت به حالت پیش از زلزله حدود ۲۶٪ افزایش یافته است.

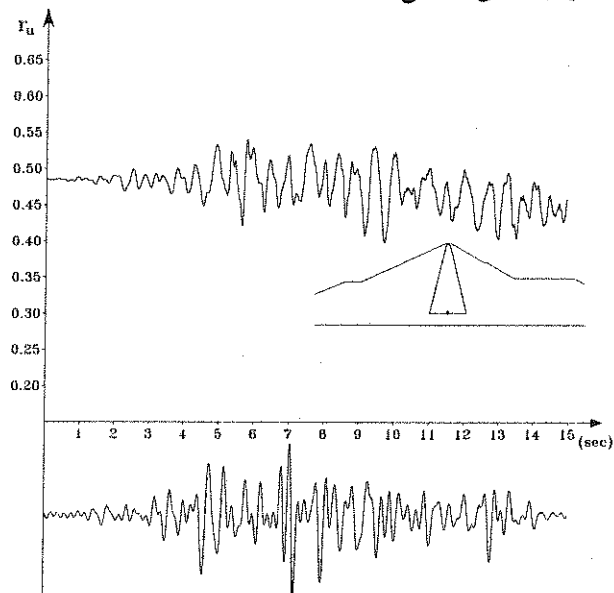


شکل (۶): الگوی توزیع فشارهای منفذی هسته پس از زلزله

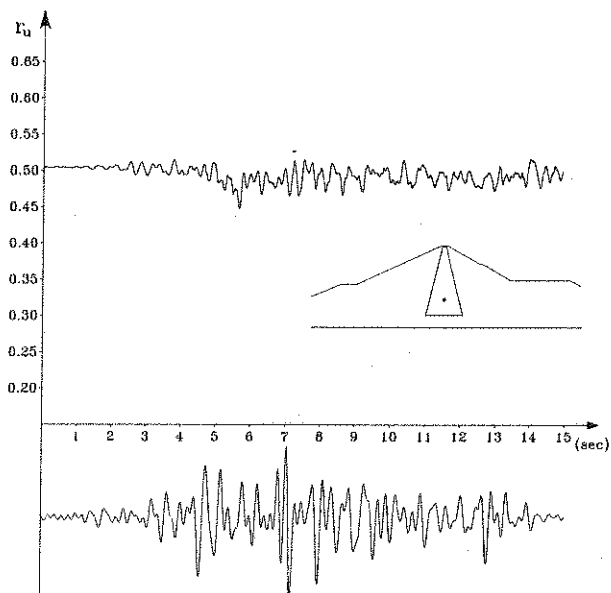
هم چنین بررسی تغییرات فشار منفذی در عرض هسته و در یک تراز ثابت نشان می‌دهد که با نزدیک شدن به نواحی مرزی هسته و فیلتر کاهش محسوسی در میزان فشارهای منفذی رخ می‌دهد. این مسأله را این گونه می‌توان تعبیر نمود که چون هسته تحت شرایط زهکشی‌نشده قرار دارد هیچ گونه تغییر حجمی در آن بوجود نمی‌آید و لذا تغییرشکل‌های ایجاد شده ناشی از نشست هسته سبب انبساط عرضی آن می‌شود و در نتیجه در مرزهای هسته افت شدیدی در فشارهای منفذی بوجود می‌آید.

در شکل‌های (۷) تا (۱۰) روند تغییرات فشارهای آب حفره‌ای در زمان اعمال شتاب زلزله که توسط مدل عددی محاسبه شده است در نواحی مرکزی هسته و در ترازهای مختلف بر حسب زمان نشان داده شده است. نقاط انتخاب شده به گونه‌ای است که نشان‌دهنده میزان فشار منفذی در پیزومترهای الکتریکی EP5-3 ، EP5-12 ، EP5-18 ، EP5-23 است.

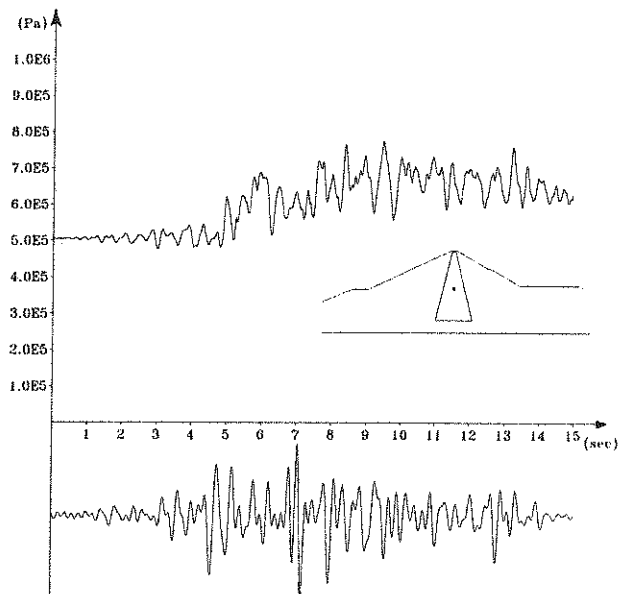
کردن نمونه رس در آزمایش سه محوری UU است. اما در ترازهای میانی بدلیل کاهش قوس زدگی و ول شدگی مصالح هسته در اثر لرزش های زلزله و به تبع آن افزایش تنش های کل، میزان فشارهای منفذی به مقدار قابل توجهی افزایش می یابد. یکی دیگر از پارامترهایی که نشان دهنده میزان فشار آب حفره ای ایجاد شده در هسته سدهای خاکی است ضریب فشار آب حفره ای (r_u) است که به صورت نسبت فشار آب حفره ای ایجاد شده در هر نقطه به تنش قائم موجود در آن نقطه در نظر گرفته شده است. در صورتیکه مقدار r_u به یک رسیده یا از یک بیشتر شود احتمال وقوع شکست هیدرولیکی و بدنبال آن فرسایش داخلی مصالح هسته وجود خواهد داشت.



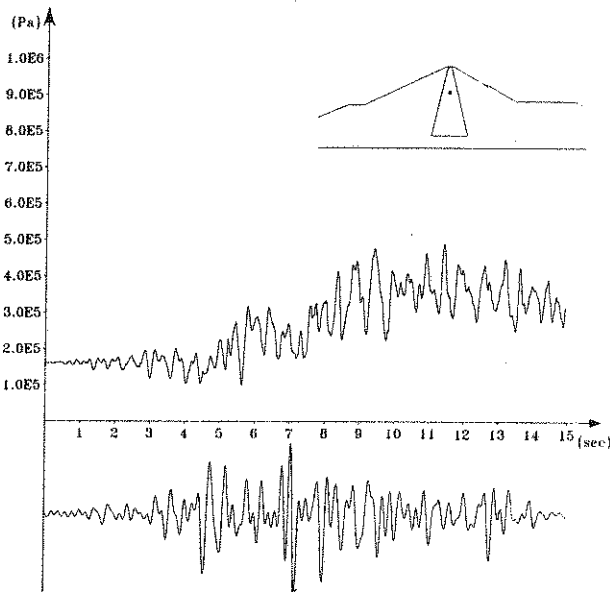
شکل (۱۱): روند تغییرات ضریب فشار منفذی محاسبه شده با مدل عددی تحت بار زلزله در محل ابزار EP 5-3 در تراز ۱۰۶ متر هسته



شکل (۱۲): روند تغییرات ضریب فشار منفذی محاسبه شده با مدل عددی تحت بار زلزله در محل ابزار EP 5-12 در تراز ۱۳۵ متر هسته



شکل (۹): روند تغییرات فشار منفذی محاسبه شده با مدل عددی تحت بار زلزله در محل ابزار EP 5-18 در تراز ۱۶۵ متر هسته



شکل (۱۰): روند تغییرات فشار منفذی محاسبه شده با مدل عددی تحت بار زلزله در محل ابزار EP 5-23 در تراز ۱۸۵ متر هسته

در این شکلها بوضوح مشاهده می شود میزان افزایش فشارهای منفذی در ترازهای میانی هسته نسبت به ترازهای پائینی محسوس تر است. میزان افزایش فشار منفذی پس از اعمال شتاب زلزله در تراز ۱۰۶ متر $2/8\%$ ، در تراز ۱۳۵ متر $0/4\%$ در تراز ۱۶۵ متر $22/9\%$ و در تراز ۱۸۵ متر $147/6\%$ است. کاهش فشارهای منفذی در ترازهای پائینی را این گونه می توان توجیه کرد که در این ناحیه هسته که در شرایط زهکشی نشده قرار دارد در اثر نشست های ناشی از بار زلزله تمایل دلرد تا بصورت عرضی منبسط شود. این اثر شبیه باد

آب شکستگی در محدوده ایمنی قرار دارد. به منظور بررسی بیشتر این مسأله روند تغییرات ضریب فشار آب منفذی در ترازهای مختلف هسته در زمان زلزله ثبت شده و در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) نشان داده شده است.

۵- نتیجه

– پس از تحلیل دینامیکی مشاهده شد که مرکز تجمع فشارهای منفذی در هسته سد نسبت به حالت پیش از زلزله به سمت بالا حرکت می‌کند و حداکثر فشارهای منفذی در ترازهای میانی هسته رخ می‌دهد.

– تغییرات فشارهای منفذی در ترازهای مختلف نشان داد که ترازهای بالایی هسته نسبت به ترازهای پائینی بیشتر تحت تأثیر شتاب زلزله قرار می‌گیرند و افزایش فشارهای منفذی در آنها محسوس‌تر است.

– نتایج تحلیل نشان می‌دهد حداکثر فشار منفذی هسته پس از زلزله به مقدار 10.42 KPa رسیده است که نسبت به حالت پیش از زلزله حدود 26% افزایش یافته است.

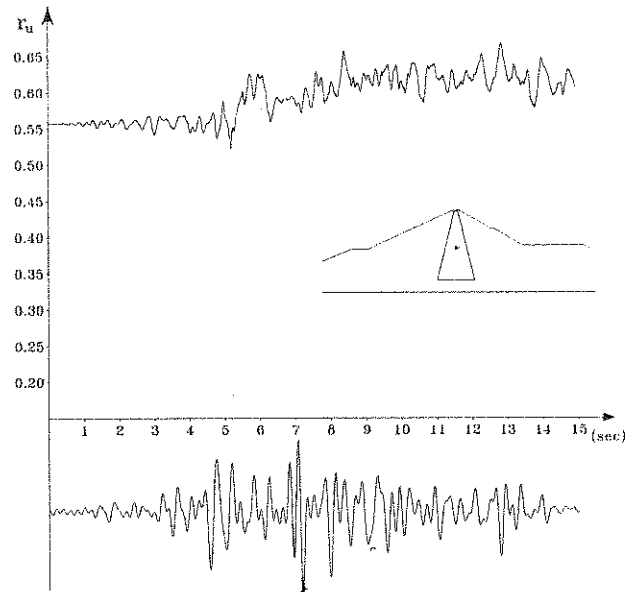
– هم چنین این نتایج نشان می‌دهد در نقطه‌ای که حداکثر فشار منفذی پس از اعمال شتاب زلزله ایجاد شده است مقدار ضریب فشار منفذی (r_u) به مقدار 0.72 می‌رسد.

– نتایج تحلیل نشان می‌دهد که در انتهای زلزله میزان افزایش فشارهای منفذی هسته نسبت به حالت پیش از زلزله در خط تقارن هسته در تراز 10.6 متر $2/8$ ٪، در تراز 12.5 متر $0/4$ ٪، در تراز 16.5 متر $32/9$ ٪ و در تراز 18.5 متر $174/6$ ٪ است.

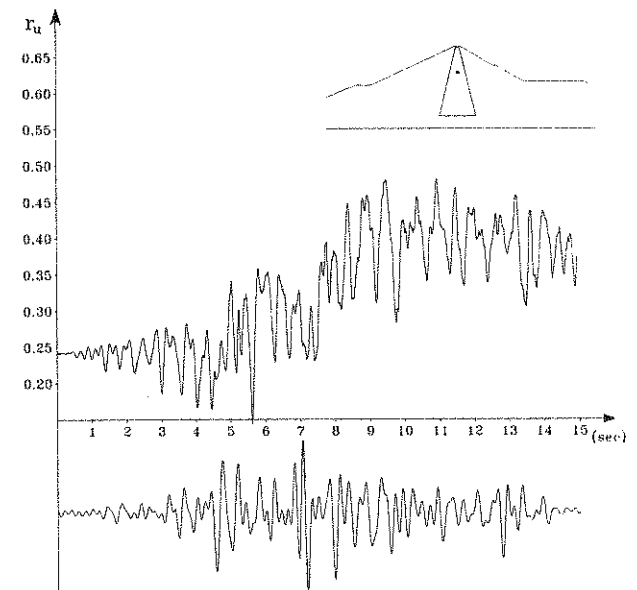
– هم چنین براساس این نتایج میزان ضریب فشارهای منفذی هسته (r_u) در خط تقارن پس از اعمال شتاب زلزله در تراز 10.6 متر $0/44$ ، در تراز 12.5 متر $0/5$ ، در تراز 16.5 متر $0/61$ و در تراز 18.5 متر $0/36$ است.

– در نقطه‌ای که پس از اعمال زلزله حداکثر فشار منفذی ایجاد شده است مقدار تنش فشاری کمینه برابر 1241 KPa است که در مقایسه با فشار منفذی در این نقطه (10.42 KPa) مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. این مطلب بیان می‌کند که احتمال باز شدن ترک‌ها و شکست هیدرولیکی هسته سد منتفی است.

– در نهایت چنین می‌توان نتیجه گرفت که سدی با مشخصات سد کرخه در برابر شتاب‌نگاشتی مشابه شتاب‌نگاشت زلزله دیهوک از جهت افزایش فشارهای منفذی در محدوده ایمنی قرار دارد.

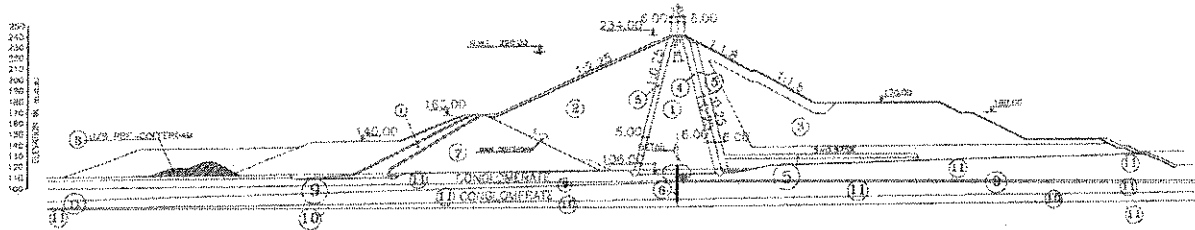


شکل (۱۳): روند تغییرات ضریب فشار منفذی محاسبه شده با مدل عددی تحت بار زلزله در محل ابزار EP 5-18 در تراز 16.5 متر هسته



شکل (۱۴): روند تغییرات ضریب فشار منفذی محاسبه شده با مدل عددی تحت بار زلزله در محل ابزار EP 5-23 در تراز 18.5 متر هسته

در نقطه‌ای که حداکثر فشار منفذی پس از اعمال شتاب زلزله ایجاد شده است، مقدار ضریب فشار منفذی برابر با 0.72 است. هم چنین مقدار تنش فشاری حداقل موجود در این نقطه برابر 1241 KPa است که در مقایسه با فشار منفذی ایجاد شده (10.42 KPa) عدد بزرگ تری است. بدین ترتیب چنین می‌توان نتیجه گرفت که احتمال وقوع هرگونه شکست هیدرولیکی در داخل هسته منتفی است و هسته در مقابل مسأله



شکل (۱۵): مشخصات مقطع عرضی ۵-۵

۶- مراجع

- نصراللهی، سید مهدی؛ ارزیابی فشارهای منفذی در هسته رسی مختلط سدهای خاکی در هنگام زلزله و مقایسه آن با هسته‌های رسی خالص (مطالعه موردی سد کرخه)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران گرایش خاک و پی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۲. [۱]
- میرمحمد حسینی، سید مجدالدین، عارف‌پور، بابک؛ مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ویرایش اول، ۱۳۷۸. [۲]
- مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، گزارش نتایج آزمایش‌های سه‌محوری سیکی و ستون تشدید مصالح هسته و گل‌سنگ پی سد کرخه، ۱۳۷۴. [۳]
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، گزارش جامع نتایج ابزار دقیق و رفتارنگاری سد کرخه، جلد اول، ۱۳۸۲. [۴]
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، خلاصه مطالعات مرحله اول طرح کرخه، ۱۳۸۰. [۵]
- Das, B.M.; *Principles of Soil Dynamics*, PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1993. [۶]
- Finn, W.D.; Gillon, M.D.; Newton, C.J.; Yogendrakumar, M.; "Simulating the seismic response of a rockfill dam", Numerical Models in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, 1992. [۷]
- Li, X.S.; Cai, Z.Y.; "Effects of Low-Number Pre-vibration Cycles on Dynamic Properties of Dry Sand", Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 11 November, 1999. [۸]
- User's Manual; *Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Itasca Consulting Group, Inc., Version 4.0, Minneapolis MN, USA, 2001. [۹]