

مطالعه عددی سد خاکی در نرم افزار آباکوس و مقایسه نتایج نرم افزار با قرائت های ابزار دقیق

مصطفی زین العبادی روزبهانی^۱، احمدرضا مظاهری^{۲*}، محمد محسن رحیمی^۳

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران.

۳- گروه مهندسی عمران دانشگاه فنی و حرفه ای، دانشکده امیرکبیر، اراک، ایران.

* نویسنده مسئول: A.Mazaheri@Abbru.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳

چکیده

یکی از مهم ترین ویژگی های مورد نیاز در تحلیل سدهای خاکی، اندازه گیری فشار آب منفذی می باشد که از لحظه شروع ساخت، رفته رفته در بدنه سد افزایش می یابد. کنترل پایداری سدهای خاکی در مراحل مختلف ساخت بسیار حائز اهمیت می باشد. لذا به منظور تحکیم یافتگی کامل مصالح هسته، اجرای سد خاکی با سرعت یکنواخت از اهمیت زیادی برخوردار است. در مطالعه حاضر از قاعده میرایی رایلی در محاسبات فشار آب حفره ای سد خاکی آزادی و از دو تحلیل شبه استاتیکی و دینامیکی به صورت غیرخطی استفاده شده است. همچنین از مدل رفتاری ساده الاستوپلاستیک مبتنی بر معیار موهر-کلمب در نرم افزار آباکوس استفاده شده است. جهت صحت سنجی، فشار آب حفره ای هسته رسی در اثر تغییرات تراز آب مخزن پس از آگیری توسط نرم افزار آباکوس، مدل و با نتایج ابزار دقیق در حالت شبه استاتیکی مقایسه گردیده است. به منظور تطبیق داده های مشاهداتی و پیش بینی شده از رگرسیون چند متغیره و از معیار ضریب تبیین استفاده و مقدار $R^2=0/9747$ نشان گر هم خوانی بسیار خوبی بین داده های مشاهداتی و پیش بینی شده است. مقایسه نتایج تحقیق نشان داد که فشار آب حفره ای در تحلیل دینامیکی ۳۹ درصد بیش تر از تحلیل شبه استاتیکی است. حداکثر نسبت فشار آب حفره ای (ru) در هسته سد برابر ۰/۲۴ به دست آمد. بدین ترتیب با توجه به نسبت فشار آب حفره ای به دست آمده، شکست هیدرولیکی در هسته رخ نخواهد داد.

واژه های کلیدی: آباکوس، تحلیل دینامیکی، شبه استاتیکی، فشار آب حفره ای.

مقدمه

واکنش سدهای خاکی برای چندین زلزله اتفاق افتاده را انجام دادند و تاریخچه زمانی و توزیع شتاب زلزله در بدنه سد را محاسبه نمودند. Sarma, (1975) نمودارهایی را در رابطه با محاسبه شتاب افقی بحرانی تهیه نمود. بر اساس مطالعات ایشان شتاب افقی بحرانی شتابی است که بتواند توده خاک محدود به یک سطح لغزش را به حالت تعادل حدی برساند. Wang et al., (2006) مدل جدیدی را در نرم افزار FLAC 2D گنجانده و تنش مؤثر را در چندین سد خاکی به روش تحلیل

تحلیل عددی سدهای خاکی و مقایسه نتایج به دست آمده با داده های ابزار دقیق، علاوه بر این که می تواند نتایج مهم داشته باشد، می توان با استفاده از داده های آن عملکرد ابزار نصب شده را نیز کنترل نمود. امروزه با پیشرفت سریع علم و نرم افزارهای المان محدود و تفاضل محدود، شرایطی فراهم شده که استفاده از تحلیل دینامیکی نیز مانند تحلیل شبه استاتیکی، با سهولت انجام می گیرد. Ambraseys and Sarma, (1967) مطالعه

مقاومت برشی ناشی از برش در محاسبات است. Karoui and Bouassida, (2016) در پژوهشی به تحلیل عددی رفتار سد سیدی ال باراک و مقایسه آن با داده‌های ابزار دقیق پرداختند. همچنین راشدی و حائری، (۲۰۱۷) با ارزیابی فشار آب حفره‌ای و نشست سد خاکی گاوشان و مقایسه داده‌های ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC به این نتیجه رسیدند که عملکرد سد از نظر فشار آب حفره‌ای و نهایتاً پایداری سد، مثبت می‌باشد. همچنین در مطالعاتی جداگانه، Mazaheri et al., (2021) مظفری، (۱۳۹۸)، نوری و همکاران، (۱۳۹۶) و مقیمی و همکاران، (۱۳۹۹) به مطالعه نشست و روش‌های جلوگیری از آن در سدهای خاکی پرداختند. در این مطالعه، بررسی و مقایسه تحلیل شبه‌استاتیکی و دینامیکی فشار آب حفره‌ای در سد خاکی آزادی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و آنالیزهای معادل غیرخطی صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

موقعیت و مشخصات زمین‌شناسی سد آزادی

سد مخزنی آزادی در استان کرمانشاه، در فاصله ۵۰۰ متری پایین‌دست پل شاهگذر و حدود ۹۰ کیلومتری شهر جوانرود در مختصات ۲۱°۴۶ طول شرقی و ۳۳°۳۴ عرض شمالی بر روی رودخانه زمکان واقع شده است. مساحت حوزه آبریز این رودخانه تا محور سد آزادی ۱۰۵۴ کیلومتر مربع است. دسترسی به تکیه‌گاه‌های چپ و راست سد مخزنی آزادی از طریق محور کرمانشاه، کوزران-پل شاهگذر امکان‌پذیر می‌باشد. سد آزادی از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی با ارتفاع ۶۴ متر از پی تا تراز ۱۳۱۲ متر از سطح دریا و طول تاج ۷۳۷ متر می‌باشد. حجم مخزن سد در تراز نرمال ۵۷/۴۷ میلیون متر مکعب و حجم مفید ۵۰ میلیون متر مکعب است (شکل ۱).



شکل ۱- سد خاکی آزادی.

Figure 1- Azadi soil dam.

دینامیکی بررسی نمودند. ایشان تغییر شکل‌های واقعی و مشاهداتی سدها را با مقادیر برآورد شده با استفاده از سایر مدل‌ها مقایسه نمودند. Tsai et al., (2006) با بررسی پاسخ دینامیکی سد پاشان، تأثیر ابعاد هسته در پتانسیل پاسخ سد خاکی، تأثیر نسبت عرض و ارتفاع هسته و نسبت طول و ارتفاع سد را بررسی کردند. Tsompanakis et al., (2009) با استفاده از شبکه عصبی، پاسخ دینامیکی خاکریز نمونه با استفاده از روش اجزاء محدود را بررسی نمودند. آنان نشان دادند که پاسخ دینامیکی خاکریزها با استفاده از روش المان محدود، که با رفتار غیرخطی از مواد ژئوماتیک ارزیابی می‌شود را می‌توان با روش معادل خطی در نظر گرفت. همچنین Elia et al., (2011) بررسی رفتار لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای سد همگن مارانا، در ایتالیا را انجام دادند. Dong et al., (2013) با تحلیل دینامیکی سدهای بلند دریافتند که اضافه فشار آب حفره‌ای در حین زلزله تغییر یافته و به تدریج افزایش می‌یابد و در کف هسته به حداکثر می‌رسد. Mukherjee, (2013) مفاهیم اولیه روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل پایداری لرزه‌ای شیب سدهای خاکی را همراه با ویژگی‌های برجسته، مزایا و محدودیت‌های هر یک مورد بررسی قرار داد. برای پیش‌بینی واقع‌بینانه پاسخ سد خاکی در هنگام زلزله می‌بایست عوامل رفتار الاستیک غیرخطی خاک، وابستگی فشار محصور خاک به سفتی آن، هندسه دره و تقاطع سد با آبرفت را به دقت در نظر گرفت. Huang, (2014) تجزیه و تحلیل پاسخ لرزه‌ای سد خاکی با مصالح پایدارکننده، ماده‌ای با کنترل مقاومت پایین CLSM با استفاده از روش المان محدود را انجام داد. نتایج ایشان نشان داد که استفاده از CLSM برای پایداری سازی خاکریزها در مقابل تحریک لرزه‌ای مناسب است. طبق بررسی‌های Panulinova and Harabinova, (2014)، سدهای خاکی به‌طور عمده برای پایداری در برابر لغزش یا اثرات لرزه‌ای باید طوری طراحی شوند که بر اثر تغییر خواص خاک یا اثرات خارجی، فرو نریزند. Bandini et al., (2015) روشی کامل بر اساس مدل تعادل حدی که در آن تغییرات هندسه بلوک و نیز تغییرات مقاومت برشی ناشی از لغزش منظور شده، ارائه دادند. ایشان نتایج مدل‌های فیزیکی را با نتایج محاسبات مقایسه نمودند. در تمام این مقایسه‌ها رفتار مشاهده شده با پیش‌بینی شده مطابقت داشته که نشان‌دهنده لزوم منظور نمودن تغییر هندسه بلوک و

$$F=f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (3)$$

در صورتی که میدان تنش طوری باشد که $F(\sigma) < 0$ ، رفتار مصالح الاستیک است و به محض رسیدن به حد تسلیم $F(\sigma) = 0$ ، رفتار پلاستیک مصالح آغاز می‌شود. در مدل الاستیک کامل، نمودار کرنش از دو مولفه الاستیک و پلاستیک تشکیل می‌شود (رابطه ۴).

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (4)$$

جهت کرنش‌های پلاستیک، قانون جریان تعیین می‌گردد. در قانون جریان فرض می‌شود که کرنش پلاستیک بر یک سطح عمود است. این قانون به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود.

$$d\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} \quad (5)$$

که در آن λ اسکالر و $f(\sigma)$ ، یک سطح تابع تنش است. در صورتی که $f(\sigma)$ همان تابع تسلیم باشد؛ قانون جریان مرتبط برقرار است. در غیر این صورت قانون جریان، غیرمرتبط خواهد بود که در این صورت علاوه بر تعریف تابع تسلیم، تابع جدید $g(\sigma)$ تعریف می‌شود؛ که نمو کرنش پلاستیکی عمود بر آن خواهد بود (رابطه ۶).

$$d\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (6)$$

در رابطه فوق، λ ضریب پلاستیک نامیده می‌شود که در شرایط الاستیک، مقدار آن صفر و در حالت پلاستیک، مقداری بزرگ‌تر از صفر خواهد داشت. بر اساس مطالب گفته شده، رابطه کلی نمو تنش موثر با نمو کرنش را می‌توان به صورت روابط ۷ و ۸ بیان نمود.

$$\sigma' = [D^e - \frac{\alpha}{d} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma} \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} D^e] \varepsilon^0 \quad (7)$$

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (8)$$

اگر رفتار خاک الاستیک باشد؛ در این رابطه، α صفر است. در غیر این صورت، α مساوی یک فرض می‌شود. در روابط بالا، f تابع تسلیم و g سطح پتانسیل پلاستیک است. در صورتی که معیار تسلیم موهر-کلمب باشد؛ معیار تسلیم به صورت روابط ۹ تا ۱۱ تعریف می‌شود.

$$f_1 = 1/2 |\sigma_2 - \sigma_3| + 1/2 (\sigma_2 + \sigma_3) \sin \phi - c \cdot \cos \phi \geq 0 \quad (9)$$

$$f_2 = 1/2 |\sigma_3 - \sigma_1| + 1/2 (\sigma_3 + \sigma_1) \sin \phi - c \cdot \cos \phi \geq 0 \quad (10)$$

ساختگاه سد مخزنی آزادی از دو بخش سنگی رسوبات شیلی امیران و آهک مارنی سازند گورپی و واحد رسوبات آبرفتی واریزه‌ای عهد حاضر در کوله راست محور و زیر سرریز تشکیل شده است. از نظر زمین ساختاری، محدوده سد آزادی و تأسیسات وابسته، متعلق به واحد ساختاری زاگرس چین خورده در لرستان خاوری است. این واحد ساختاری همانند سایر مناطق زاگرس چین خورده در جنوب و جنوب غربی ایران دارای گذشته پرتنش از لحاظ فعالیت‌های تکتونیکی بوده است. در واقع در این محدوده، چین خوردگی و گسلش سازنده امری عادی و طبیعی است (مهندسين مشاور آبدان فراز).

معادله دینامیکی حاکم بر محیط سازه

با گسسته‌سازی معادله دینامیکی سازه و با در نظر گرفتن نیروهای اعمالی زلزله در حوزه زمان و با استفاده از رویکرد اجزاء محدود معادله دینامیکی حاکم بر سد و پی به فرم ماتریسی رابطه ۱ نوشته خواهد شد.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F_1\}[M]\{U_g\} + \{Q\}\{P\} \quad (1)$$

$[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشند. $\{U\}$ ، $\{\dot{U}\}$ ، $\{\ddot{U}\}$ و $\{U_g\}$ به ترتیب بردارهای جابه‌جایی، سرعت، شتاب سازه، نیروهای بدنه‌ای و شتاب زمین لرزه می‌باشند.

تحلیل الاستوپلاستیک کامل خاکریز با فرض معیار خمیری

موهر-کولمب

در تحلیل الاستیک-پلاستیک (خمیری کامل)، قسمت ابتدای منحنی تنش-کرنش خطی بوده و محدوده پلاستیک آن خطی ثابت است. به منظور ارزیابی این که نقطه‌ای به حد پلاستیک رسیده یا خیر؛ باید یک تابع تسلیم تعریف شود. معیار تسلیم معمولاً بر حسب تنش‌های اصلی و یا نامتغیرهای تانسور تنش بیان می‌گردد. در واقع شروع حالت با معیار تسلیم مشخص می‌گردد. فرم کلی معیار تسلیم را می‌توان به صورت رابطه ۲ ارائه داد.

$$F=f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, n_1, n_2, n_3) \quad (2)$$

که n_i جهت تنش‌های اصلی σ_i را نشان می‌دهند. در صورتی که مصالح همسان باشند؛ رابطه تسلیم به شکل ساده رابطه ۳ درمی‌آید.

تابع مدل خطی هوک خواهد بود. با توجه به آن چه گفته شد، در این مدل با تعریف پنج پارامتر که به وسیله آزمایش‌های شناخته شده و متداول در خاک قابل دستیابی است؛ رابطه تنش- کرنش تعریف می‌شود. این پارامترها عبارتند از مدول برشی خاک، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک، چسبندگی و زاویه اتساع که در معادلات تعادل و سازگاری در هریک از المان‌ها با فرض کرنش‌های مسطح فرمول‌بندی شده و با اعمال تدریجی بار و مقایسه آن با سطوح تسلیم معرفی شده، تغییر مکان‌ها تعیین می‌شود (زینکویچ و همکاران، ۱۹۷۷).

مدل‌سازی سد آزادی در نرم افزار آباکوس

آباکوس یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند مبتنی بر روش اجزاء محدود است که قابلیت حل مسائل تحلیل خطی ساده تا پیچیده و مدل‌سازی غیرخطی را دارد. آباکوس در یک تحلیل غیرخطی، به‌طور اتوماتیک مقدار رواداری‌های همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آن‌ها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر به ندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند. همچنین این نرم‌افزار از زبان برنامه‌نویسی منبع باز پایتون برای برنامه‌نویسی در داخل نرم‌افزار پشتیبانی می‌کند. وجود امکان اسکریپت‌نویسی در داخل نرم‌افزار، قابلیت‌های مدل‌سازی آن را دو چندان می‌کند. در این پژوهش، محاسبه فشار تنش و کرنش به فرض رفتار کرنش مسطح در سد استفاده شده است. بدین‌منظور بزرگ‌ترین مقطع سد با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی و با المان‌های هشت گره‌ای مورد تحلیل قرار گرفته است. شکل ۲ مدل‌سازی و مش‌بندی سد آزادی را نشان می‌دهد.

$$f_3 = 1/2 |\sigma'_1 - \sigma'_2| + 1/2 (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \phi - c \cdot \cos \phi \geq 0 \quad (11)$$

پارامترهای اصلی معرف تابع تسلیم عبارتند از ϕ و c که به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک می‌باشند. شکل تابع به‌صورت مخروطی است که نقاط داخل آن محدوده الاستیک و نقاط مرزی، آستانه پلاستیک را نشان می‌دهد. از آن‌جا که در معیار تسلیم موهر-کولمب، قانون جریان مرتبط برقرار نیست؛ تابع g برای این مدل به شکل روابط ۱۲ تا ۱۴ تعریف می‌شوند.

$$g_1 = 1.2 |\sigma'_2 - \sigma'_3| + 1.2 (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \Psi \quad (12)$$

$$g_2 = 1.2 |\sigma'_3 - \sigma'_1| + 1.2 (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \Psi \quad (13)$$

$$g_3 = 1.2 |\sigma'_1 - \sigma'_2| + 1.2 (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \Psi \quad (14)$$

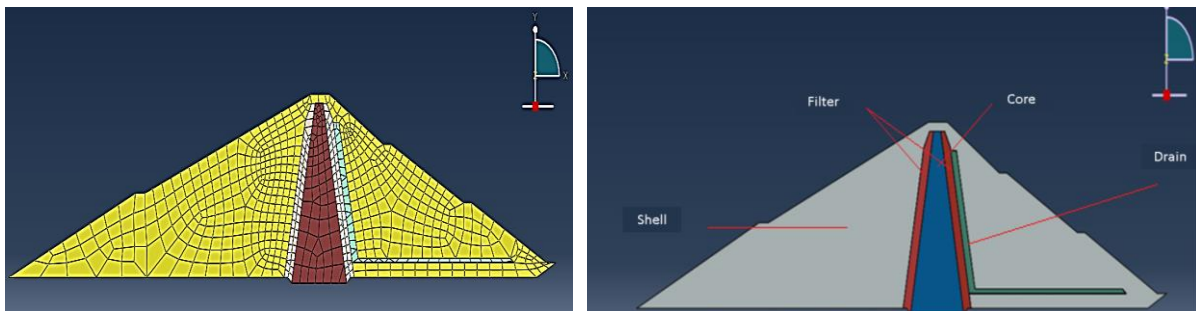
این تابع، سومین پارامتر مدل را Ψ معرفی می‌کند. این پارامتر جهت مدل کردن کرنش‌های حجمی پلاستیک در خاک‌هایی که حین برش افزایش حجم می‌دهند؛ به‌کار می‌رود. همچنین در صورت وجود چسبندگی، مدل موهر-کولمب اجازه کشش در المان را می‌دهد؛ اما در مدل تسلیم موهر-کولمب اصلاح شده مورد استفاده در برنامه می‌توان با تعریف توابعی تکمیلی، نقاط تحت کشش را حذف کرد. این توابع به‌صورت روابط ۱۵ تا ۱۷ تعریف می‌شوند.

$$f_4 = \sigma'_1 - \sigma_1 \geq 0 \quad (15)$$

$$f_5 = \sigma'_2 - \sigma_2 \geq 0 \quad (16)$$

$$f_6 = \sigma'_3 - \sigma_3 \geq 0 \quad (17)$$

در سطوح جدید فرض می‌شود قانون مرتبط برقرار باشد. در صورت قرار داشتن محدوده تنش درون تابع تسلیم، رفتار بدنه،



شکل ۲- مدل‌سازی و مش‌بندی سد آزادی در نرم‌افزار آباکوس.

Figure 2- Modeling and meshing of Azadi Dam in Abaqus software.

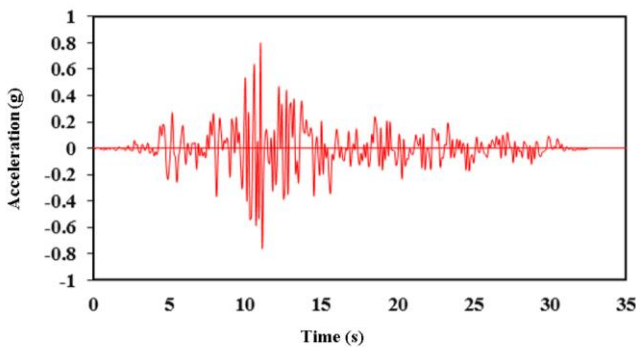
مکانیکی است که در تحلیل‌های دینامیکی به کار گرفته می‌شود. به‌طور کلی در برنامه‌هایی که وابسته به زمان عمل می‌کنند؛ معمولاً جهت فراهم کردن میرایی که تقریباً مستقل

برای تحلیل دینامیکی، ابتدا باید تحلیل استاتیکی انجام شده و پس از تعادل، تحلیل دینامیکی شروع می‌شود. میرایی به‌کار رفته از نوع رایلی است. میرایی رایلی، مرسوم‌ترین نوع میرایی

گرفتن از شتاب‌نگاشت‌های زلزله طبس با بیشینه شتاب $0.83g$ و زمان 33 ثانیه استفاده شده است (جدول ۱ و شکل ۳).

جدول ۱- مشخصات زلزله مورد استفاده در تحلیل دینامیکی.
Table 1- Earthquake characteristics used in dynamic analysis.

Accelerogram	Max acceleration (g)	Max speed (m/sec)	Max Displacement (m)	Time (sec)
Tabas	0.83	0.97	0.38	16.42



شکل ۳- شتاب‌نگاشت افقی مورد استفاده در تحلیل دینامیکی سد آزادی (زلزله طبس).

Figure 3- Horizontal accelerator used in dynamic analysis of Azadi dam (Tabas earthquake).

مشخصات مکانیکی مصالح سد آزادی، مطابق جداول ۲ و ۳ مدل‌سازی شده است.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی آنالیز تنش-کرنش کوتاه‌مدت (مهندسی مشاور آبدان فراز).

Table 2- Values of geomechanical parameters of short-term stress-strain analysis (Abdan Faraz consulting engineers).

Lateral Pressure Coefficient K_0	Poisson's ratio (ν)	Elastic modulus (kN/m ²)	Density (kN/m ³)	
0.72	0.42	27500	20.4	Core
0.54	0.36	35000	21.2	Filter
0.52	0.34	45000	21.7	Drain
0.47	0.32	70000	21.8	Crust
0.33	0.25	26E6	25.3	Bedrock

از فرکانس است، از میرایی رایلی استفاده می‌شود. درصد میرایی با توجه به الاستو-پلاستیک بودن مدل رفتاری مصالح، معادل یک درصد در نظر گرفته شده است. در مدل‌های رفتاری که به خاک اجازه ورود به بخش پلاستیک داده می‌شود (موهر-کلمب)، با توجه به قابلیت استهلاک انرژی در مدل، منظور کردن میرایی بین صفر تا یک درصد منطقی می‌باشد. در واقع برای اکثر تحلیل‌های دینامیکی که شامل شرایط کرنش بزرگ می‌شوند؛ تنها درصد کوچکی میرایی مورد نیاز است. به منظور بررسی عملکرد و طراحی لرزه‌ای سدها در برابر زلزله، باید نیروی ناشی از زلزله با روشی مناسب به سازه سد اعمال شود و با انجام تحلیل غیرخطی پاسخ‌های لرزه‌ای سد محاسبه گردد. نظر به این‌که ساختگاه سد آزادی بر روی فونداسیون سنگی شیلی قرار دارد، می‌بایست محل استقرار دستگاه شتاب‌نگار با شرایط زمین‌شناسی ساختگاه همسان باشد. بنابراین برای تحلیل دینامیکی سد آزادی، شتاب‌نگاشت زمین لرزه‌هایی انتخاب شده است که بر روی سنگ یا سنگ‌های با سرعت برشی کم‌تر از 760 متر بر ثانیه به ثبت رسیده‌اند. لازم به ذکر است که شتاب‌نگاشت‌ها بر اساس نوع خاک محل ایستگاه (خاک تپ دو) انتخاب شده‌اند. به همین منظور تعیین خاک ایستگاه‌های مدنظر بر اساس روش‌های ژئوفیزیکی انجام شده است. بر پایه مطالعات لرزه‌خیزی در محدوده ساختگاه سد آزادی، مقادیر پارامترهای لرزه‌خیزی مبنای طراحی (DBL)، بالای طراحی (MDL) و حداکثر پذیرفتنی (MCL) به ترتیب 0.20 ، 0.30 و 0.51 برای بیشینه شتاب افقی و 0.12 ، 0.20 و 0.34 برای بیشینه شتاب قائم برآورد شده و حداکثر زلزله رخ داده در منطقه دارای بزرگای هفت ریشتر بوده است (مهندسی مشاور آبدان فراز). در ساختگاه مورد مطالعه، ضریب زلزله جهت تحلیل پایداری $0.17g$ (معادل یک سوم زلزله حداکثر متحمل)، بر اساس توصیه پایک تعیین و انتخاب شده است. محدود کردن مقدار حداکثر شتاب محرک ورودی $0.17g$ به علت تحلیل دینامیکی زمین لرزه‌های میانه و ضعیف با قبول خطای کم و با فرض رفتار خطی خاک است. همچنین می‌تواند به علت پرهیز از ایجاد تنش‌های کششی غیرواقعی در المان‌های پوسته پایین دست مربوط شود که پس از افزودن تنش‌های دینامیکی به استاتیکی در زمین لرزه‌های بزرگ‌تر از $0.17g$ به دلیل استفاده از فرض رفتار خطی به وقوع می‌پیوندد (در فرض رفتار واقعی غیرخطی خاک و عدم امکان تحمل کشش مصالح دانه‌ای، این مشکل قابل حل است). بنابراین برای انجام تحلیل دینامیکی و جهت استخراج محرک ورودی، با ایده

جدول ۳- مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در تحلیل پایداری بدنه سد آزادی (مهندسين مشاور آبدان فراز).
Table 3- The values of geomechanical parameters used in the stability analysis of Azadi dam body (Abdan Faraz consulting engineers).

specific weight (gr/cm ³)			Shear parameters		
Saturation (γ_{sat})	Wet (γ_t)	Dry (γ_d)	ϕ (°)	c ($\frac{kg}{cm^2}$)	
2.08	2.04	1.7	30	1	UU
			18	0.5	CU
			25	0.3	CD
2.2	2.12	1.9	32	0	Filter
2.25	2.17	2	35	0	Drain
2.38	2.35	2.18	37.4	0	Depth 0 to 8 m
			38	0	Depth 8 to 16 m
			39.4	0	More than 16 m deep
2.53	--	2.46	24	10.8	Bedrock

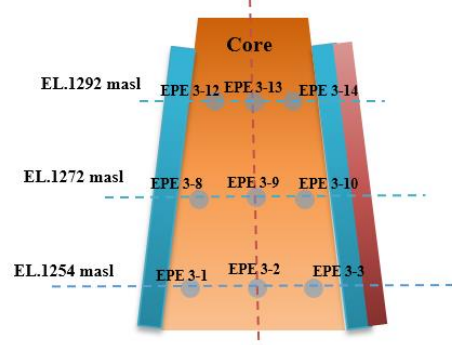
است. تغییرات فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در پیژومتر EPE 3-1 هسته رسی (متمايل به پوسته بالادست) و پیژومتر EPE 3-2 هسته رسی (مرکز هسته)، تابع افزایش تراز آب مخزن بوده و متناسب با افزایش تراز آب مخزن، مقدار فشار آب حفره‌ای روندی صعودی دارد. بیشینه فشار آب حفره‌ای در تراز بیشینه مخزن و در پیژومترهای EPE 3-1 و EPE 3-2 به ترتیب به ۳۹۹ و ۱۸۶ کیلوپاسکال رسیده است. در پیژومتر EPE 3-3 به دلیل مجاورت با فیلتر و زهکش پایین‌دست، روند افزایش آب مخزن تاثیر چندانی در روند فشار آب حفره‌ای نخواهد داشت و این پیژومتر، روندی نزولی با توجه به زمان خواهد داشت (شکل ۵).

در تراز ۱۲۷۲ متر ارتفاع از سطح دریا، دو پیژومتر در بالادست و پایین‌دست هسته رسی و یک پیژومتر در مرکز هسته نصب شده است. پیژومتر نصب شده در بالادست (EPE 3-8) پس از شروع آبیگری و بیشینه تراز آب مخزن در آخرین قرائت فشار ۱۳۸ کیلوپاسکال را ثبت نموده است. همچنین پیژومتر نصب شده در مرکز هسته (EPE 3-9) در آخرین قرائت ارائه شده، فشار آب حفره‌ای ۷۳ کیلوپاسکال را نشان می‌دهند؛ ولی پیژومتر نصب شده در سمت پایین‌دست با شروع عملیات آبیگری سیر ملایم نزولی با فشار حدود ۵۸ کیلوپاسکال را نشان داده و در آخرین قرائت انجام شده فشار حدود ۷۶ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد (شکل ۶).

نتایج و بحث

مقاطع ابزارگذاری در سد مخزنی آزادی

ابزاربندی سد آزادی، در شش مقطع در نظر گرفته شده است. پژوهش حاضر به بررسی رفتارنگاری ابزار دقیق نصب شده در مقطع T3a سد مخزنی آزادی به‌عنوان بزرگ‌ترین مقطع پرداخته شده است (شکل ۴).



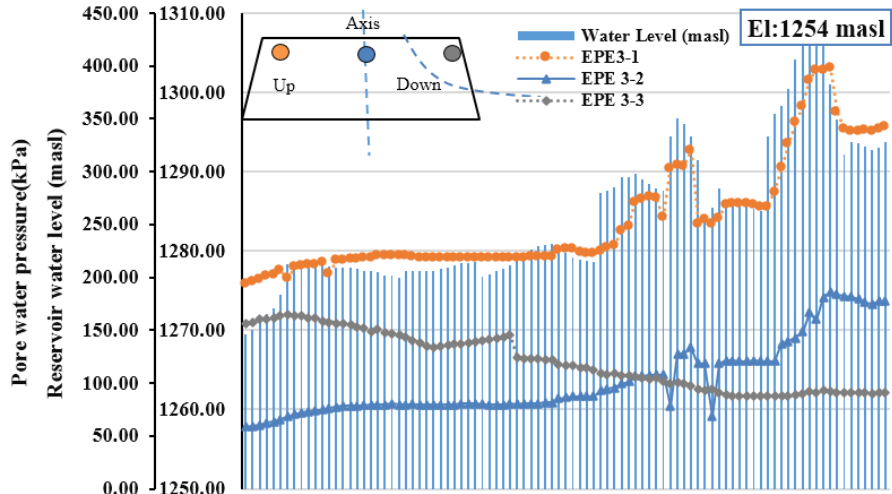
شکل ۴- موقعیت مقاطع ابزاربندی هسته سد آزادی.

Figure 4. The position of the tooling sections of Azadi Dam core.

مدل‌سازی سد آزادی با نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. لازم به ذکر است مدل‌سازی فشار آب حفره‌ای به دو روش شبه‌استاتیکی و دینامیکی تحلیل می‌شوند. همچنین تحلیل دینامیکی در حالت مخزن پر (تراوش پایدار) انجام شده است.

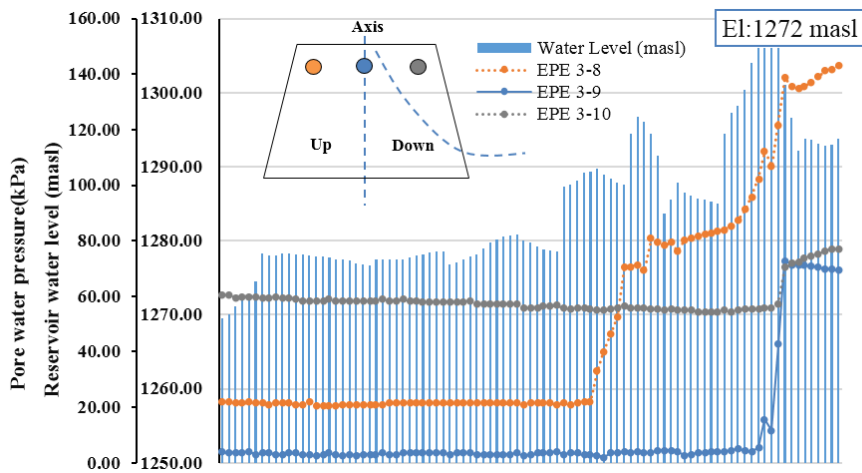
پیژومترهای الکتریکی هسته (EPE)

در مقطع T3a و در تراز ۱۲۵۴ متر، سه پیژومتر الکتریکی هسته در بالادست، مرکز و پایین‌دست هسته رسی نصب شده



شکل ۵- تغییرات فشار آب حفره ای در پیزومترهای نصب شده هسته، تراز ۱۲۵۴ متر.

Figure 5. Variations of pore water pressure in installed core piezometers, 1254 m level.

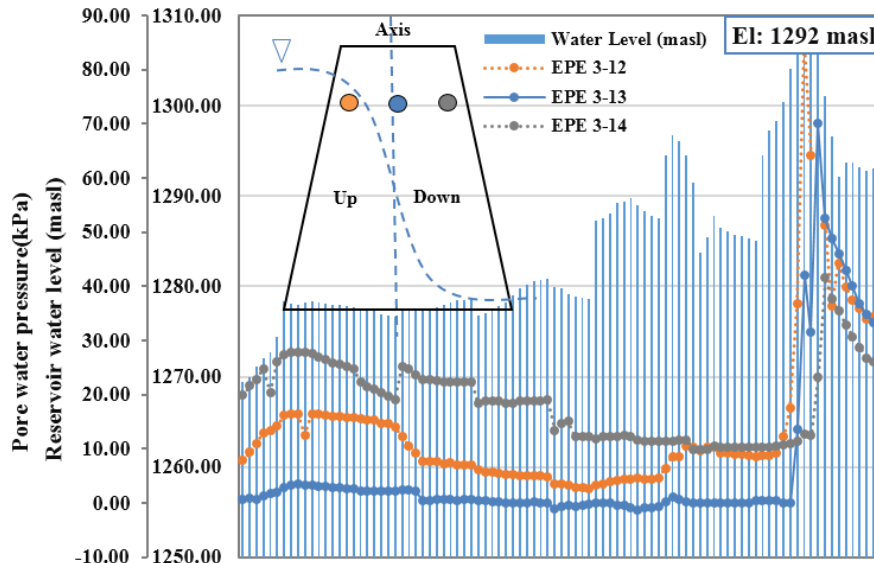


شکل ۶- تغییرات فشار آب حفره ای در پیزومترهای نصب شده هسته، تراز ۱۲۷۲ متر.

Figure 6. Variations of pore water pressure in installed core piezometers, 1272 m level.

آب حفره ای در قسمت بالادست و مرکزی (آکس) هسته در تمام نمودارها روند متناسب و یک شکلی دارد و در قسمت پایین دست نمودار متفاوت می باشد. این موضوع به دلیل وجود لایه زهکش در پایین دست هسته و محیط خشک پایین دست است. البته تناسب نمودارها در شکل ۶ به دلیل محیط خشک (بالاتر از خط فریاتیک) در ترازهای بالاتر سد آزادی بیشتر می باشد.

در تراز ۱۲۹۲ متر ارتفاع از سطح دریا، سه پیزومتر الکتریکی در هسته رسی جانمایی و نصب شده است. پیزومتر بالادست هسته رسی، فشار آب حفره ای ۸۵ کیلوپاسکال و پیزومتر پایین دست، فشار حدود ۷۰ کیلوپاسکال را نمایش می دهد که با توجه به محیط اطراف این ابزار طبیعی به نظر می رسد. همچنین پیزومتر مرکزی هسته، فشار آب حفره ای ۴۲ کیلوپاسکال را نشان می دهد (شکل ۷). آنچه مسلم است فشار

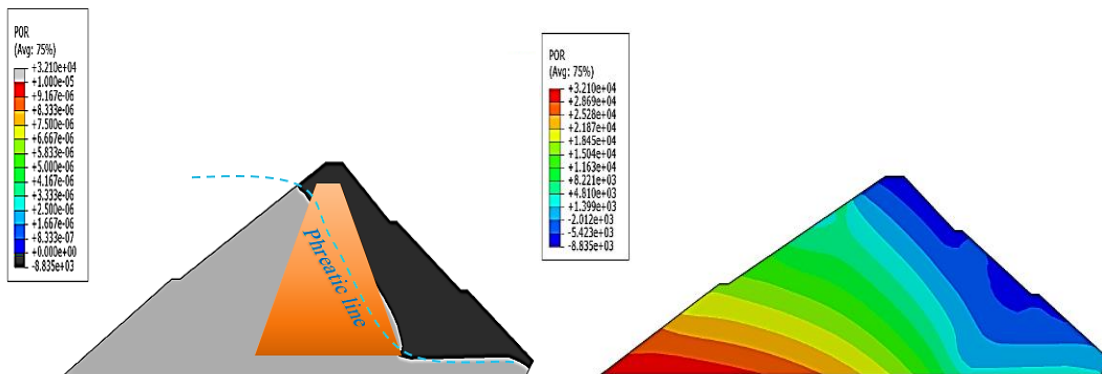


شکل ۷- تغییرات فشار آب حفره ای در پیزومترهای نصب شده هسته، تراز ۱۲۹۲ متر.
Figure 7. Variations of pore water pressure in installed core piezometers, 1292 m level.

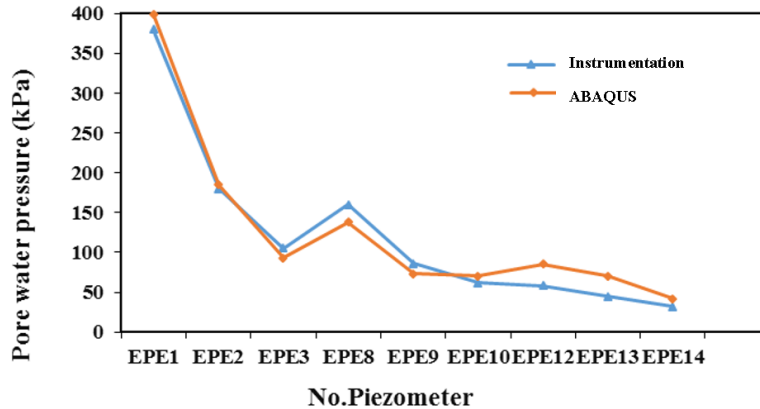
هسته این شیب شدید می‌گردد. این موضوع نشان می‌دهد که افت عمده هد آب در درون هسته انجام می‌گیرد. دلیل آن نفوذپذیری کم هسته و نفوذپذیری زیاد پوسته، فیلترها و زهکش‌ها می‌باشد. همچنین این شکل، بیان‌گر خشک ماندن پوسته پایین‌دست در انتهای مرحله تراوش (تراوش دائم) به دلیل وجود زهکش افقی در کف پوسته پایین‌دست می‌باشد. لازم به ذکر است که فشار بر روی خط فریاتیکی تقریباً صفر است. منحنی مقایسه بین نتایج فشار آب حفره‌ای ایزاردقیق و تحلیل عددی با نرم‌افزار آباکوس در شکل ۹ نشان داده شده است.

تحلیل فشار آب حفره ای پوسته در روش شبه‌استاتیکی

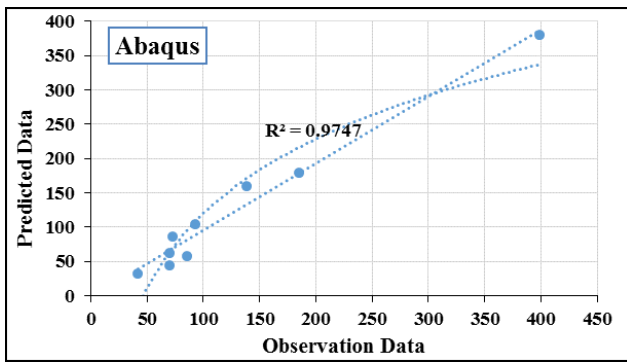
کانتورهای توزیع فشار آب حفره‌ای در روش شبه‌استاتیکی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود خط فریاتیکی به زهکش وارد شده و زهکش آب را هدایت کرده است و این بیان‌گر عملکرد مناسب زهکش سد آزادی می‌باشد. بالای خط فریاتیکی، فشار منفی (خلأ) و زیر خط فریاتیکی، فشار زیاد می‌شود؛ به طوری که برای بررسی روند تغییرات فشار آب حفره‌ای در بدنه سد چند نقطه انتخاب شده است و تغییرات فشار آب حفره‌ای در طول زمان تحلیلی جریان نشان داده شده است. بیشینه فشار آب حفره‌ای برابر ۴۳۲ کیلوپاسکال در قسمت انتهایی هسته ایجاد شده و میزان فشار آب منفذی با نزدیک شدن به تاج سد کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل ۸ پیدا است، ترازهای فشار آب منفذی در پوسته بالادست، دارای شیب ملایمی می‌باشند. لیکن در



شکل ۸- فشار آب حفره‌ای و خط فریاتیکی در تحلیل شبه‌استاتیکی.
Figure 8. Pore water pressure and phreatic line in quasi-static analysis.



شکل ۹- مقایسه فشار آب حفره‌ای مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده (آباکوس) در تحلیل شبه‌استاتیکی هسته سد آزادی.
Figure 9. Comparison of pore water pressure of observed and predicted values (Abacus) in the quasi-static analysis of Azadi Dam core.

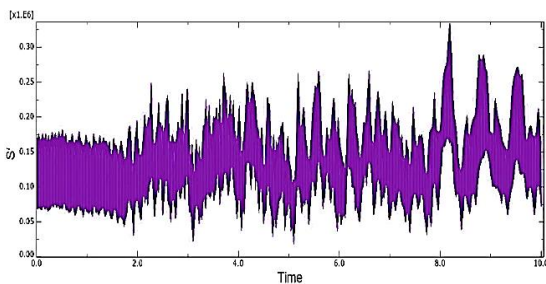


شکل ۱۰- نمودار پراکنش برای مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده (آباکوس).

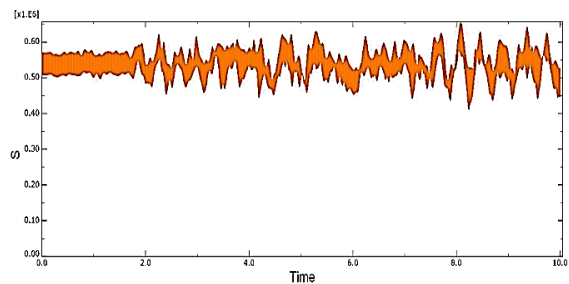
Figure 10. Scatter plot for observed and predicted values (Abacus).

تحلیل فشار آب حفره‌ای پوسته در روش دینامیکی

نتایج تحلیل فشار آب حفره‌ای پوسته در روش دینامیکی در بخش‌های مختلف پوسته سد آزادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



(b)

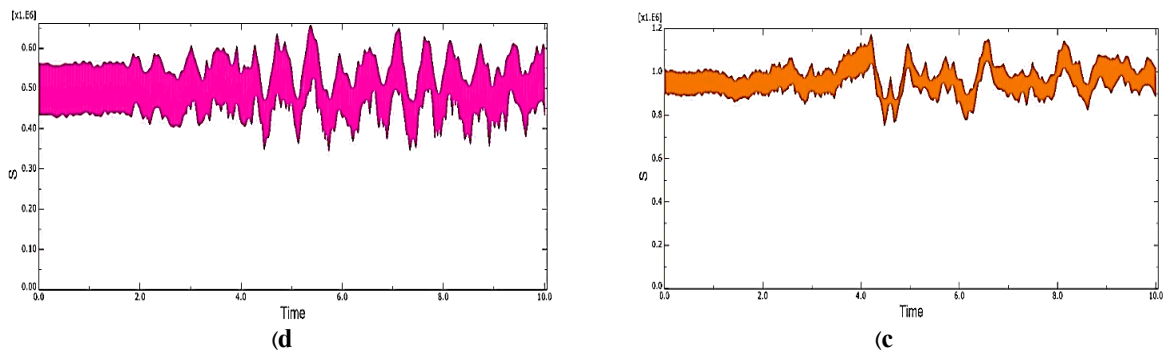


(a)

به‌منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد نتایج ابزار دقیق و مدل آباکوس از رگرسیون چند متغیره از معیار ضریب تبیین (رابطه ۱۸) استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - O_{ave})^2} \quad (18)$$

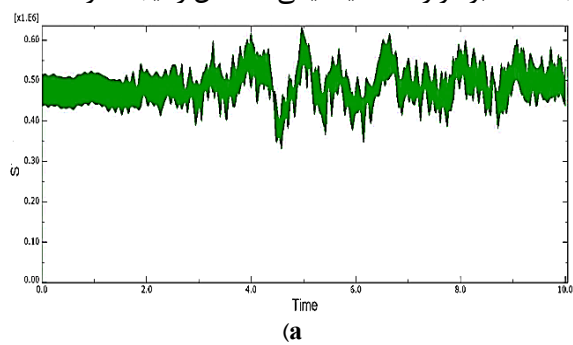
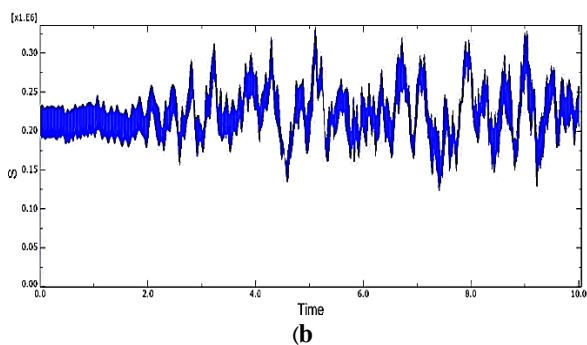
در رابطه ۱۸ تعداد نمونه‌ها است، P_i و O_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر پیش‌بینی شده و O_{ave} میانگین مقادیر مشاهداتی است. ضریب تبیین، نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک، نزدیک است. در محاسبات، هر چقدر مقدار R^2 به عدد یک، نزدیک‌تر باشد؛ کارایی بیش‌تر مدل را نشان می‌دهد. در واقع چنانچه مقدار R^2 معادل یک، گردد؛ برازش کاملی را نشان می‌دهد و بیان‌گر انطباق کامل بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده است. با اعمال رابطه ۱۸ بر روی داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده، مقدار ضریب تبیین ۰/۹۷۴۷ به‌دست آمد که نشان‌گر هم‌خوانی نتایج مربوط به فشار آب حفره‌ای برای مقادیر ابزار دقیق و مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد (شکل ۱۰).



شکل ۱۱- فشار آب حفره‌ای در بدنه سد آزادی الف: پنجه، ب: پاشنه، ج: مابین پاشنه و هسته، د: مابین پنجه و هسته.

Figure 11. Pour water pressure in the body of Azadi dam a: toe, b: heel, c: between heel and core, d: between toe and core.

سوابق مربوط به رفتار سدها در برابر زلزله، موجب شده که در بسیاری از موارد، سدهای موجود با زلزله‌های مورد نظر در هنگام طراحی آن‌ها و با روش‌هایی که در دسترس طراحان اصلی نبوده، بار دیگر بررسی شوند. ارزیابی درست و واقع‌گرایانه از کارایی و پایداری سد خاکی در برابر زلزله، نیازمند تحلیل پاسخ دینامیکی برای تعیین تنش‌های دینامیکی و تغییر شکل‌های ایجاد شده است. این کار به دلایل رفتار پیچیده خاک به‌ویژه تحت بارهای دینامیکی، کافی نبودن تحلیل شبه استاتیک، لزوم انجام بررسی امکان وقوع پدیده روانگرایی و ایجاد فشار آب حفره‌ای اضافی جزو دشوارترین مسائل مهندسی ژئوتکنیک به‌شمار می‌روند. بیش‌ترین فشار حفره‌ای در هنگام زلزله درون هسته رخ می‌دهد که مقدار آن ۱/۱ مگاپاسکال است که ۳۴ درصد از فشار آب حفره‌ای بالادست و ۶۸ درصد از فشار حفره‌ای پایین‌دست بیش‌تر است. لازم به ذکر است که رفتار پوسته، زهکش، فیلتر و پی زهکشی شده و برای هسته شرایط زهکشی نشده در نظر گرفته شده تا افزایش فشار آب حفره‌ای حین زلزله در مدل دیده شود. در شکل ۱۲ فشار آب حفره‌ای در وسط هسته و ۲۰ متری از کف هسته نشان داده شده است.



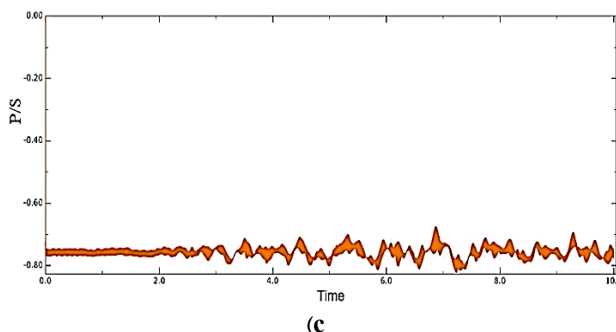
تفسیر شکل ۱۱ به صورت جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴- فشار آب حفره‌ای در پوسته سد آزادی.

Table 4. Pore water pressure in Azadi dam shell.

Minim um pore water pressur (Kpa)	Maxim um pore water pressur (Kpa)	Time (Sec)	Zone
420	720	8.1	Heel
380	680	5.8	Between core & heel
750	1100	4.25	Between core & toe
40	350	8.1	Toe

در طراحی لرزه‌ای سدهای خاکی، به‌طور معمول حفظ مخزن سد در هنگام رخداد زلزله و در بدترین حالت رها شدن کنترل‌شده مخزن، به شیوه‌ای که به خسارت جانی منجر نگردد؛ مدنظر قرار می‌گیرد. در دهه‌های اخیر، دریافت مهندسان از شدت خطرپذیری زلزله به دلیل داده‌های لرزه‌ای به‌دست آمده و پژوهش‌های زمین‌شناختی و لرزه‌ای زمین-شناختی دست‌خوش تغییرات بزرگی شده است. ارائه شیوه نوین تحلیل برای ارزیابی پتانسیل پدیده روانگرایی و افت مقاومت خاک بر اثر زلزله، امکان پیش‌بینی تغییر شکل‌های ایجاد شده بر اثر رخداد دینامیکی مشخص را ایجاد کرده است.



شکل ۱۲- فشار آب حفره‌ای در هسته سد آزادی الف: وسط هسته، ب: ۲۰ متری از کف هسته، ج: ۲۰ متری از بالای هسته.
 Figure 12. Pore water pressure in Azadi dam core A: Middle of the core, B: 20 meters from the bottom of the core, C: 20 meters from the top of the core.

۴۸۰ کیلوپاسکال در حالت تحلیل استاتیکی به ۶۷۰ کیلوپاسکال در حالت تحلیل دینامیکی افزایش یافته که نشان‌گر ۳۹ درصد افزایش فشار آب حفره‌ای پس از زلزله می‌باشد.

نتایج فشار آب حفره‌ای هسته سد آزادی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- فشار آب حفره‌ای در هسته سد آزادی.

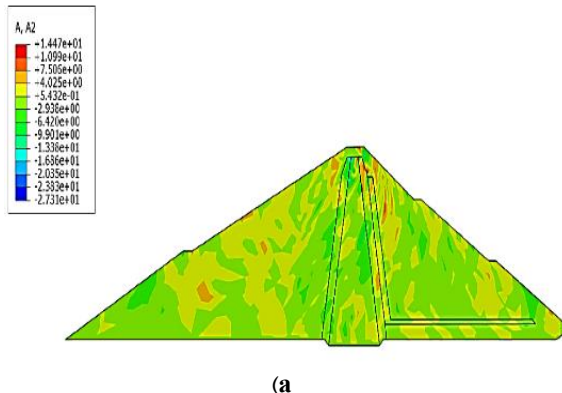
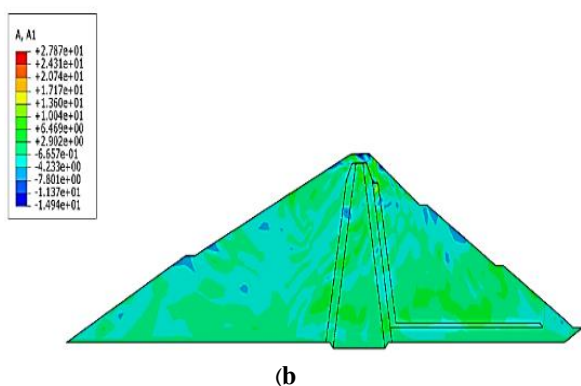
Table 5. Pour water pressure in the core of Azadi Dam.

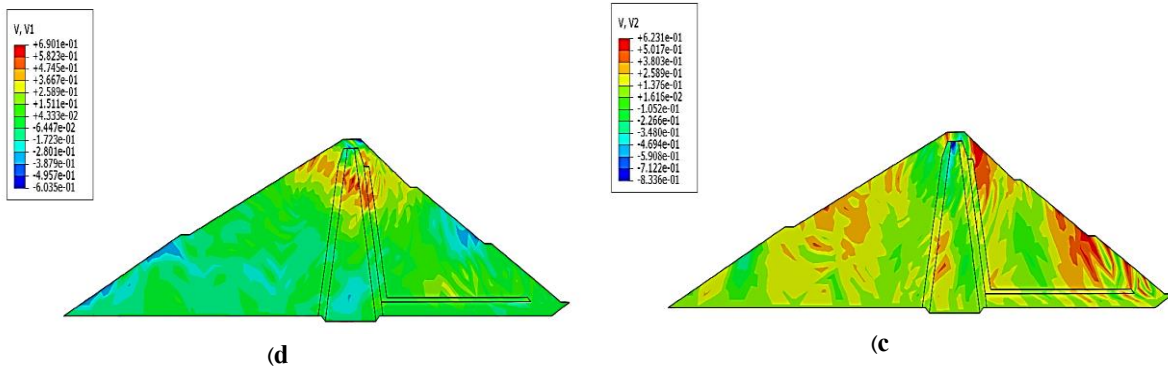
Minimum pore water pressur (Kpa)	Maximum pore water pressur (Kpa)	Time (Sec)	Zones
-820	-690	5.2	20 m above the core
12	41	5.2	Middle of core
340	670	5.2	20 m below the core

تحلیل سرعت و شتاب در روش دینامیکی

با توجه به تحلیل دینامیکی انجام شده سد آزادی در هنگام زلزله طبق نمودار شتاب‌نگاشت ورودی (شتاب‌نگاشت طبس) رفتار می‌کند که این خود دلیلی بر درست بودن مدل‌سازی این پژوهش است. با توجه به تحلیل سد، بیش‌ترین شتاب به‌وجود آمده در تاج، مربوط به مصالح سخت تحت زلزله قائم و کم‌ترین شتاب تاج مربوط به مصالح سنگریز متوسط تحت زلزله می‌باشد. سرعت در جهت X نسبت به جهت Y، کم‌تر است. تغییرات سرعت در جهت Y نسبت به جهت X بسیار بیش‌تر است که دلیل آن رفتار متفاوت ذرات خاک در این جهت می‌باشد. بیشینه مقدار سرعت افقی، ۱۶ درصد بیش‌تر از ماکزیمم سرعت قائم می‌باشد (شکل ۱۳).

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود فشار آب حفره‌ای بیش‌تر در ترازهای بالاتر درون هسته رخ می‌دهد. تغییرات فشار آب حفره‌ای در قسمت کف و وسط هسته به‌صورت فشار آب حفره‌ای مثبت و بالای هسته به‌صورت فشار آب حفره‌ای منفی دیده می‌شود. بیشینه فشار آب حفره‌ای در کف هسته از





شکل ۱۳- کانتورهای سرعت و شتاب سد آزادی الف: شتاب قائم، ب: شتاب افقی، ج: سرعت قائم، د: سرعت افقی.

Figure 13. Velocity and acceleration contours of Azadi Dam A: Vertical acceleration, B: Horizontal acceleration, C: Vertical velocity, D: Horizontal velocity.

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که برای کاهش فشار آب حفره‌ای در هسته آزادی می‌بایست از مصالح با چسبندگی بیش‌تر استفاده نمود. فشار آب حفره‌ای در تحلیل دینامیکی، حدود ۳۹ درصد بیش‌تر از تحلیل شبه‌استاتیکی است. برخلاف آنچه به‌طور رایج پذیرفته شده است که افزایش شتاب زلزله از قاعده (پی سد) تا تاج سد همواره مورد انتظار است؛ این پدیده همیشگی نیست و می‌توان آن را محدود به سدهای بسیار محکم (که رفتار آن‌ها در ضمن عملکرد زلزله، الاستیک باقی می‌ماند) و یا مربوط به زلزله‌های ضعیف دانست. متقابلاً در زلزله‌های قوی و یا در سدهای خاکی که بخش‌هایی از آن‌ها در اثر زلزله به وضعیت پلاستیک‌شدگی می‌رسند؛ شتاب زلزله در امتداد ارتفاع، افزایش کمی یابد، هر چند در عین حال بدنه سد به‌تدریج تسلیم شده و ممکن است فرو بریزد. با توجه به اثر نیروی زلزله و تغییرات ناگهانی فشار آب حفره‌ای، نقاطی از سد که در تماس با آب بوده‌اند؛ به‌شدت دچار افت تنش مؤثر در جهات افقی و قائم می‌گردند که در نتیجه نقاط بالادست پوسته، تنش مؤثر به شدت افت کرده و حتی به صفر هم رسیده است. در این پژوهش، حداکثر نسبت فشار آب حفره‌ای در هسته سد براساس مدل تحلیلی موهر-کلمب برابر ۰/۲۴ به‌دست‌آمده است. بدین ترتیب با توجه به نسبت فشار آب حفره‌ای به‌دست آمده، شکست هیدرولیکی در هسته سد آزادی رخ نخواهد داد.

منابع

- مظفری، م.، ۱۳۹۸. بررسی مشکل فرار آب از مخزن سد شاه قاسم با استفاده از آنالیز هیدروژئولوژیکی. هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۱۴۵-۱۵۶.
- مقیم، ه.، راوش، ف.، کشاورز بخشایش، م.، ۱۳۹۹. بررسی قابلیت آزمون فشار آب در محاسبه میزان نشست از پرده آب‌بند سد سیمره در استان ایلام. هیدروژئولوژی، ۵(۱): ۱۵-۱.
- نوری، م.، سلماسی، ف.، ۱۳۹۶. بررسی عددی تاثیر پتوی رسی در کاهش نشست از پی سدهای خاکی. هیدروژئولوژی، ۲(۱): ۷۰-۵۸.
- Ambraseys, N. N., and Sarma, S.K., 1967. The Response of Earth Dams to Strong Earthquakes. *Geo-Technique*, 7: 181-213.
- Bandini, V., Biondi, G., Cascone, E., and Rampello, S., 2015. A GLE-Based Model for Seismic Displacement Analysis of Slopes Including Strength Degradation and Geometry Rearrangement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 71: 128-142.
- Beiranvand B., Zeinolebadi M., Mazaheri A R., Komasi M., 2021. Quasi-static and dynamic analysis of pore water pressure in Azadi earth dams using Abaqus software. *Arabian Journal of Geosciences* 14(13):1280.
- Dong, W.X., Xu, W.J., Yu, Y.Z. and H. Lv., 2013. Numerical Analysis of Earthquake Response of an Ultra-High Earth-Rockfill Dam. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1(12): 2319-2351.

- Sarma, S. K., 1975. Seismic stability of earth dams and embankments. *Géotechnique*, 25: 743-761.
- Tsai, P., Hsu, S., and Lai, J. 2009. Effects of Core on Dynamic Responses of Earth Dam. ASCE, Geotechnical special publication, 197: 8-13.
- Smith, M., 2009, ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI.
- Tsompanakis, Y.D., Lagaros, N.N., Psarropoulos, P.C., and Georgopoulos, E., 2009. Simulating the seismic response of embankments via artificial neural networks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29: 782-798.
- Wang, Z.L., Makdisi, F.I., and Egan, J., 2006. Practical applications of a nonlinear approach to analysis of earthquake-induced liquefaction and deformation of earth structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26 (2-4): 231-252.
- Zienkiewicz, O. C., 1977. *The Finite Element Method*. 3. Edition. London. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited. XV, 787 S.
- Elia, G., Amorsi, A., Chan, A.H.C., and Kavadas, M.J., 2011. Numerical Prediction of the Dynamic Behavior of two Earth Dams in Italy using a Fully Coupled Nonlinear Approach. *International Journal of Geomechanics*, 11: 504-518.
- Huang, L.J., 2014. Seismic Response Analysis of Earth Dams Embanked with Soil-based Controlled Low Strength Materials using Finite Element Method. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4: 159-165.
- Karoui. H. and Bouassida, M., 2016. Assessment of Observed of Behavior of Sidi El Barrak Dam (Tunisia). technical paper, *Innovative Infrastructure Solutions* 1(1). 34-44.
- Mazaheri A R., Komasi M., Veisi M., Nasiri M., 2021. Dynamic analysis of earth dam using numerical method – a case study: Doyraj earth dam. *Acta Geotechnica Slovenica Journal* 8(1):65-78.
- Moghimi, H., Ravosht F., and Keshavarz Bakhshaish, F., 2020. Investigation of Water Pressure Test Capability in Calculating the Amount of Leakage from the Sealing Curtain of Seymareh dam in Ilam province. *Journal of Hydrogeology*, 5(1): 1-15.
- Mozaffari, M., 2019. Investigation of Water Escape Problem from Shah Ghasem Dam Reservoir using Hydrogeological Analysis. *Journal of Hydrogeology*, 4(2): 145-156.
- Mukherjee, S., 2013. Seismic Slope Stability Analysis of Earth Dam: Some Modern Practices. *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*, 2: 41-50.
- Nouri, M., and Salmasi.F., 2017. Numerical Study of the Effect of Clay Blanket on Reducing Leakage from Earth Dams. *Journal of Hydrogeology*, 2(1): 58-70.
- Nowrouzi Sarkarabad, R., Salmasi, F., and Oroungi, H., 2017. Investigation of the Effect of Sealing Wall on Hydraulic Gradient and Leakage in Sabalan Gravel Dam with Numerical Simulation. *Journal of Hydrogeology*, 2(1): 71-84.
- Panulinova, E., and Harabinova, S., 2014. Methods for analyzing the stability of an earthen dam slope. *advanced materials research*, 969: 245-248.
- Rashidi, M., and Haeri, M., 2017. Evaluation of Behaviors of Earth and Rockfill Dams During Construction and Initial Impounding using Instrumentation Data and Numerical Modeling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 709-725.