

تأثیر ارتفاع آب مخزن بر رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی (مطالعه موردی سد مسجد سلیمان)

مهدی شیردل^۱، علی قنبری^{۲*}، محمد داودی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، باشگاه پژوهشگران جوان، مراغه ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت معلم

۳- استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

ghanbar@tmu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۷/۲۷

چکیده - ارتفاع آب مخزن در زمان‌های مختلف آبرگیری و تخلیه مخزن، از عوامل مهم و مؤثر بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی است. برای بررسی تأثیر تراز آب مخزن بر رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی، سد مسجد سلیمان با استفاده از روش اجزاء محدود و با در نظر گرفتن معیار موهرکلمب برای مصالح بدنه سد، مدل‌سازی شده است. تحلیل استاتیکی با فرض ۱۲ لایه و انجام لایه‌به‌لایه آغاز و در مرحله تراوش پایدار با اضافه شدن آب مخزن و وزن آن پایان یافته است؛ سپس تحلیل‌های دینامیکی با استفاده از ۴ شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله‌های حوزه دور انجام و با استفاده از نتایج به دست آمده به بررسی تغییرات شتاب بیشینه و جابه‌جایی بیشینه در حوزه زمان پرداخته شده است. سپس گوه محتمل گسیختگی واقع در پایین دست و بالادست در نظر گرفته شده و با استفاده از تحلیل نیومارک، ضریب اطمینان معادل دینامیکی، ضریب اطمینان کمینه و تغییر مکان ماندگار رخ داده در گوه ارزیابی شده است. نتایج نشان‌دهنده تأثیرگذاری کم‌تراز آب مخزن بر بیشینه شتاب و بیشینه جابه‌جایی رخ داده است. همچنین در گوه محتمل گسیختگی واقع در پایین دست سد هم‌زمان با افزایش سطح تراز آب مخزن، مقادیر ضریب اطمینان دینامیکی و ضریب اطمینان کمینه رخ داده در حوزه زمان، روند صعودی داشته است. در گوه محتمل گسیختگی واقع در بالادست سد، هم‌زمان با افزایش سطح تراز آب مخزن مقدار ضریب اطمینان کمینه روند نزولی و مقدار ضریب اطمینان دینامیکی تا ۰/۶ ارتفاع سد، روند نزولی و سپس روند صعودی داشته است.

کلیدواژه‌گان: سدهای خاکی، سد مسجد سلیمان، تحلیل دینامیکی، تراز آب مخزن

۱ - مقدمه

تأثیر خود قرار می‌دهند. یکی از پارامترهای مؤثر بر رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی آثار ناشی از ارتفاع آب مخزن است. با توجه به تأثیر تراز آب در رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی، محققان زیادی مانند (Dinka et al. 2004) و Steffen et

بررسی دقیق تأثیر زلزله بر رفتار سدهای خاکی از جمله مسائل بسیار پیچیده مهندسی است. هم‌زمان پارامترهای مؤثر زیادی عملکرد سدهای خاکی را در برخورد با زلزله تحت

حجم حفاری ۱/۸ میلیون مترمکعب است [۱۰]. برای مدل‌سازی سد مسجد سلیمان از مجموعه نرم‌افزاری (*Geostudio-Geoslope 2007*) استفاده شده است. در این مجموعه نرم‌افزاری برای آنالیزهای استاتیکی از نرم‌افزار *Sigma/w* و برای تحلیل‌های دینامیکی از *Quake/w* استفاده شده است. مقطع عرضی بحرانی بر اساس جانمایی و مقاطع ارائه‌شده در آلبوم نقشه‌های فنی بدنه سد استخراج شده است. در این مقطع، ارتفاع مدل از پی ۱۷۰ متر و عرض تاج معادل ۱۵ متر در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از ایجاد ناهنجاری‌های ناشی از بازتاب امواج در تحلیل‌های دینامیکی، مرزهای مدل به اندازه کافی یعنی ۳ برابر بیشترین مقطع عرضی بدنه در جهت افق و ۳ برابر ارتفاع سد در جهت قائم، دور در نظر گرفته شده است. با توجه به اهمیت انتخاب ابعاد المان‌ها در انتشار صحیح امواج در محیط پیوسته از توصیه‌های *Kuhlemeyer and Lysmer (1973)* استفاده شده است. ایشان نشان دادند که در مدل‌سازی سازه‌های خاکی باید از المان‌هایی با ابعاد کوچک‌تر از $\lambda/10$ استفاده شود. λ طول موج مربوط به بالاترین فرکانس ورودی تحریک زلزله است [۱۱]. در شکل ۱ مقطع عرضی سد مسجد سلیمان به همراه موقعیت ابزارگذاری به‌کار رفته در سد ارائه شده است.

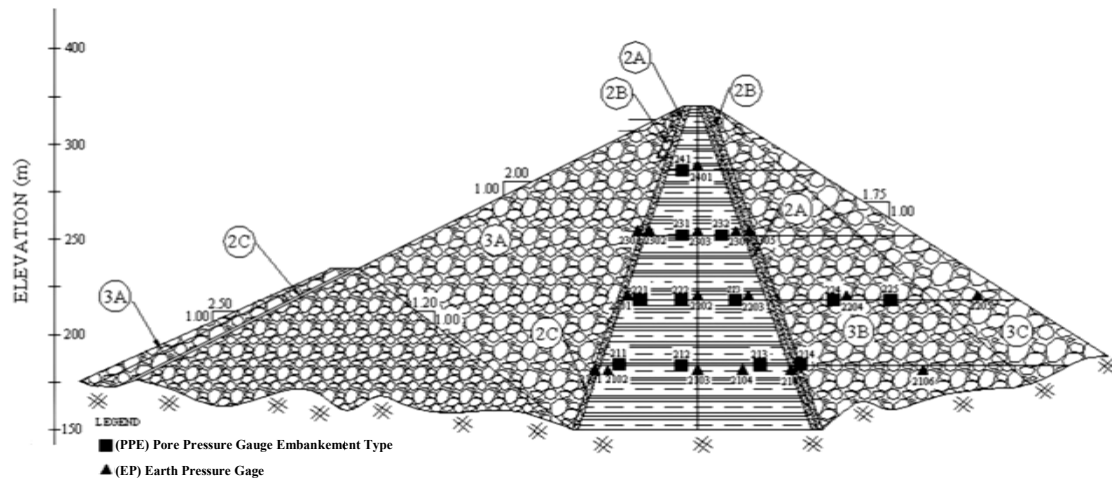
برای بررسی اثر سطح تراز آب مخزن، ۵ مدل با ارتفاع‌های آب ۳۳، ۶۶، ۹۹، ۱۳۲ و ۱۶۵ متری ساخته شده است و تمام پارامترهای دیگر دخیل در محاسبات، ثابت در نظر گرفته شده است. در سد خاکی مسجد سلیمان به خاطر شیب ملایم در وجه بالادست سد، فشار هیدرودینامیکی مقدار قابل توجهی ندارند؛ بنابراین در این پژوهش به آثار فشار هیدرودینامیکی ناشی از تغییر سطح آب مخزن سد توجه نشده است. نمودار بررسی رفتار لرزه‌ای سد خاکی مورد نظر در این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

(2006) al. (2006) و (2008) Akkose et al. این موضوع را بررسی کرده‌اند [۱،۲،۳،۴]. برخی از محققان همچون (2005) Pytharouli et al. تأثیر آب مخزن بر رفتار لرزه‌ای سد را با استفاده از آزمایش‌های ارتعاش اجباری بررسی کرده‌اند [۵]. بررسی‌های دقیق‌تر که امروزه با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری انجام می‌شود، باعث کامل‌تر شدن دیدگاه مهندسان در برخورد با رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی شده است. به عنوان نمونه محققانی همچون Wells et al. (1989)، Yang et al. (1991)، Calayir et al. (1996) و Bilici et al. (2009) با روش‌های جدید به ارزیابی اندرکنش بین سد و مخزن پرداخته‌اند [۶،۷،۸،۹]. نتایج پژوهش‌های بیشتر محققان بیانگر تأثیر نداشتن تراز آب مخزن در حرکت شیب پایین‌دست و تأثیر زیاد آن بر حرکت شیب بالادست بوده است (نتایج به‌دست‌آمده در نقاط خاص انتخابی از سد بوده است).

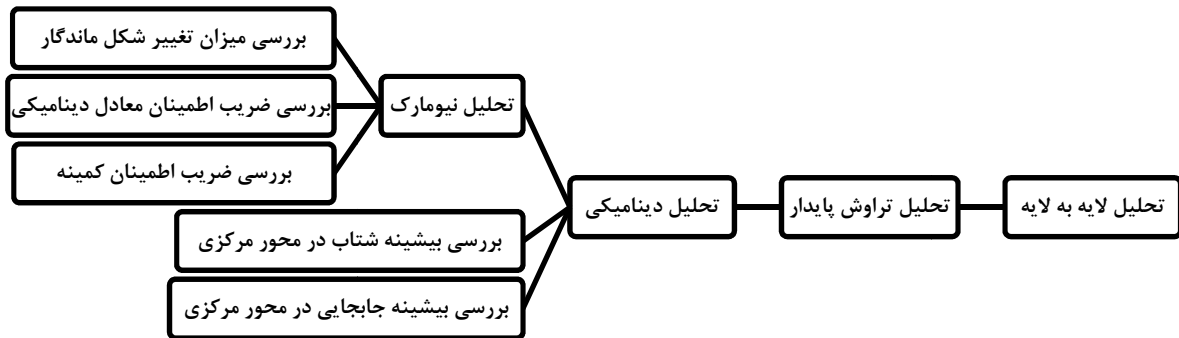
این پژوهش برای ارائه تصویر درستی از اندرکنش بین سد و مخزن در ترازهای مختلف آب مخزن با در نظر گرفتن سد مسجد سلیمان به عنوان مطالعه موردی، انجام شده است تا بتوان تأثیر پارامترهای مختلف مورد نظر را در ترازهای متفاوت آب مخزن بر رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی بررسی کرد.

۲- سد و مدل سد مسجد سلیمان

طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان در استان خوزستان و در ۲۵/۵ کیلومتری شمال شرقی شهر مسجد سلیمان در ۲۶ کیلومتری پایین‌دست سد شهید عباس‌پور بر روی رودخانه کارون بین سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۹ از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی قائم احداث شده است. بدنه اصلی سد به حجم ۱۳/۵ میلیون مترمکعب، ارتفاع ۱۷۸ متر از پی، طول تاج ۴۸۰ متر، عرض تاج ۱۵ متر، عرض سد در پی ۷۸۰ متر و



شکل (۱) مقطع عرضی سد مسجد سلیمان و موقعیت ابزار دقیق بکار رفته در آن (مقطع ۲۶۰)



شکل (۲) نمودار مراحل ارزیابی رفتار لرزه‌ای سد خاکی در این پژوهش

۳- تحلیل لایه به لایه

رسیدن به نتایج مطلوب کافی دانستند [۱۴]. در نهایت با توجه به مطالعات انجام شده به وسیله‌ی محققین از ۱۲ لایه برای تحلیل لایه به لایه استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی صحیح زایل شدن فشار آب حفره‌ای و تغییر حجم رخ داده ناشی از آن از تحلیل تنش- کرنش به همراه تحلیل تحکیم استفاده شده است. برای انجام تحلیل لایه به لایه از مشخصات مصالح ارائه شده در جدول ۱ در حالت تحلیل تنش موثر استفاده شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل لایه به لایه در جدول ۲ و شکل ۳ آورده شده است.

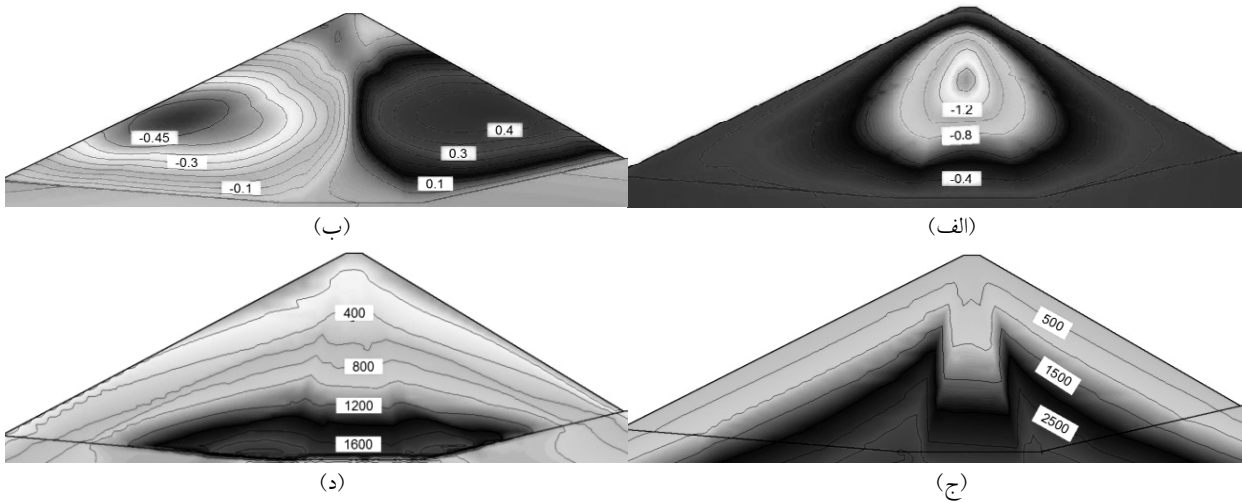
در این پژوهش انجام تحلیل‌های استاتیکی با نرم‌افزار Sigma/w انجام شده است [۱۲]. برای شبیه‌سازی سد به صورت لایه به لایه، پس از تشخیص تنش‌های برجا در پی سد، با صفر منظور کردن جابه‌جایی پی ناشی از وزن خود پی، اقدام به مدل‌سازی لایه‌های مورد نظر شده است. (Eisentein et al. (1972 نشان دادند که ده لایه برای یکسان ماندن تقریبی میزان تنش‌ها و تغییر شکل‌ها نسبت به افزایش تعداد لایه‌ها کافی است [۱۳]. Elgamal et al. (1987) با بررسی سدهای خاکی و مدل‌سازی آن‌ها، ۸ لایه را برای

جدول (۱) مشخصات مصالح استفاده شده در تحلیل لایه‌به‌لایه مدل سد خاکی مسجد سلیمان [۱۰]

مناطق مختلف بدنه	چسبندگی (kpa)	زاویه اصطکاک داخلی	ضریب ضریب پواسون	جرم مخصوص (kg/m ³)	زاویه اتساع	مدول الاستیسیته (10 ⁶ kPa)				
						۱۲ متر	۳۱ متر	۴۳ متر	۹۳ متر	۱۴۸ متر
هسته	۵۰	۱۰	۰/۳۴	۲۰۵۰	۰	-	۰/۳	-	۰/۷	۱/۶
پوسته بالادست	۰	۴۵	۰/۴	۲۳۵۰	۲۲	-	۰/۶۴	-	۱/۰۹	۱/۳۳
پوسته پایین دست	۰	۳۷	۰/۳۸	۲۲۰۰	۱۸	-	-	۰/۷	۱/۰۲	۱/۳
فیلتر اشباع	۰	۴۰	۰/۳۶	۲۳۵۰	۰	-	۰/۴۹	-	۰/۹۴	۱/۴۴
فیلتر مرطوب	۰	۴۰	۰/۳۶	۲۲۰۰	۰	-	۰/۷	-	۱/۰۶	۱/۵۵
فونداسیون	۷۰۰	۳۰	۰/۳	۲۵۰۰	-	-	-	-	۳/۸۷۲۲	-

جدول (۲) مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج به دست آمده از ابزار دقیق در مرحله پایان ساخت [۱۵]

ابزار	موقعیت		نتایج ابزار دقیق			نتایج تحلیل عددی		
	تراز نصب	فاصله از خط مرکزی (متر)	فشار آب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای (Ru)	فشار آب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای (Ru)
EP2103, PPE212	۲۳۰	۰/۰	۲۲۱۵	۲۲۲۵	۰/۶۵	۲۱۵۰	۲۱۹۲	۰/۶
EP2104, PPE213	۲۳۰	۳۰	۲۰۹۶	۲۳۳۴	۰/۶۹	۲۰۲۰	۲۲۹۰	۰/۶۲
EP2102, PPE222	۲۷۰	۰/۰	۱۴۰۷	۱۴۵۵	۰/۵۸	۱۳۹۸	۱۴۰۵	۰/۵۲
EP2203, PPE223	۲۷۰	۱۹/۵	۱۴۱۲	۱۴۳۳	۰/۶۲	۱۴۰۲	۱۳۵۰	۰/۵۸
EP2304, PPE232	۳۱۰	۱۲/۸	۴۹۴	۶۹۶	۰/۳۲	۴۸۳	۶۲۰	۰/۲۷



شکل (۳) کانتور پارامترهای مختلف به دست آمده در مرحله پایان ساخت.

الف) تغییر مکان قائم (متر) ب) تغییر مکان افقی (متر) ج) تنش مؤثر قائم (کیلوپاسکال) د) تنش مؤثر افقی (کیلوپاسکال)

۴- تحلیل تراوش پایدار

می‌شود. برای انتخاب مشخصات مکانیکی خاک از جمله

چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه در این

تراوش پایدار پس از برقرار شدن جریان دائمی آب ایجاد

مرحله، رفتار مصالح زهکشی شده در نظر گرفته شده است. البته برای مصالح هسته حالت زهکشی شده همراه با تغییر فشار آب حفره‌ای مد نظر بوده است. در این مرحله آب و وزن مخزن سد به مدل محاسباتی افزوده شده است. مشخصات مصالح استفاده شده در مرحله تراوش پایدار مطابق جدول ۲ است. مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هسته ۴۰ کیلوپاسکال و ۱۹ درجه در نظر گرفته شده است. پس از بررسی و تحلیل تراوش پایدار، نتایج جدول ۳ به دست آمد.

شده است. خصوصیات مصالح با استفاده از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری تناوبی و ستون تشدید و همچنین مقادیر معرفی شده به وسیله‌ی مشاور طراح سد، مقادیر پیشینه‌ی مدول برشی و ضریب پواسون در بدنه و فونداسیون سد تعیین شده است [۱۰]. همچنین از ۴ شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله‌های حوزه دور به عنوان زلزله ورودی با پیشینه‌ی شتاب $g \ 0/34$ (که در گزارش‌های مشاور به عنوان MDE در ساختگاه مسجد سلیمان مقیاس شده) استفاده شده است. مشخصات مصالح در جدول ۴، مشخصات رکوردهای زلزله در جدول ۵ و شتاب‌نگاشتهای استفاده شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

۵- تحلیل دینامیکی

تحلیل‌های دینامیکی با نرم‌افزار Quake/w انجام

جدول (۳) مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج به‌دست‌آمده از ابزار دقیق در مرحله تراوش پایدار [۱۵]

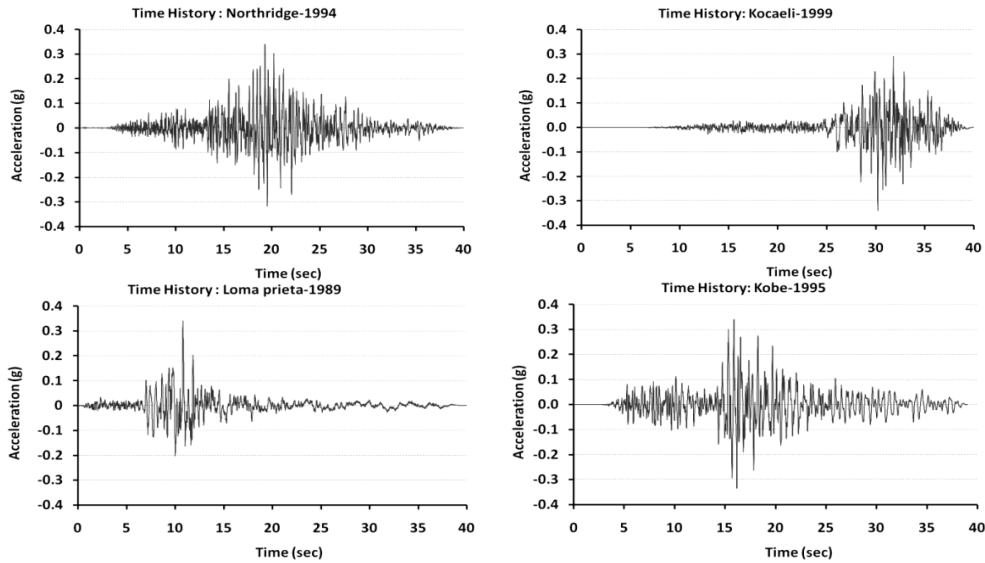
ابزار	موقعیت		نتایج ابزار دقیق			نتایج تحلیل عددی	
	تراز نصب	فاصله از خط مرکزی (متر)	ضریب فشار آب حفره‌ای (Ru) (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای (Ru) (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای (Ru) (kPa)
EP2103, PPE212	۲۳۰	۰/۰	۲۲۱۴	۲۳۳۰	۰/۶۸	۲۲۹۸	۰/۶۴
EP2104, PPE213	۲۳۰	۳۰	۲۱۸۵	۲۳۵۰	۰/۷۲	۲۳۰۲	۰/۶۸
EP2102, PPE222	۲۷۰	۰/۰	۱۵۲۳	۱۵۹۸	۰/۶۳	۱۵۷۲	۰/۶
EP2203, PPE223	۲۷۰	۱۹/۵	۱۵۳۳	۱۵۸۱	۰/۶۷	۱۵۵۳	۰/۶۵
EP2304, PPE232	۳۱۰	۱۲/۸	۶۱۲	۸۰۱	۰/۴	۷۸۳	۰/۳۸

جدول (۴) مشخصات مصالح استفاده شده در تحلیل دینامیکی سد مسجد سلیمان [۱۰]

مناطق مختلف بدنه	چسبندگی (kpa)	زاویه اصطکاک داخلی	ضریب پواسون	جرم مخصوص (kg/m ³)	زاویه اتساع	مدول الاستیسیته (*10 ⁶ kPa)				
						۱۲ متر	۳۱ متر	۴۳ متر	۹۳ متر	۱۴۸ متر
هسته	۴۰	۱۹	۰/۴۵	۲۲۰۰	۰	۲/۲۳	-	-	۳/۸۵	۴/۲۱
پوسته بالادست	۰	۴۵	۰/۴	۲۳۵۰	۲۲	۲/۳۵	-	-	۲/۹۵	۳/۱۵
پوسته پایین‌دست	۰	۳۷	۰/۴	۲۲۰۰	۱۸	-	-	۳/۸	۵/۴	۵/۸
فیلتر اشباع	۰	۴۰	۰/۴	۲۳۵۰	۰	۱/۳۴	-	-	۱/۷۱	۱/۸۲
فیلتر مرطوب	۰	۴۰	۰/۴	۲۲۰۰	۰	۱/۷۴	-	-	۳/۰۷	۳/۳
فونداسیون	۷۰۰	۳۰	۰/۳	۲۵۰۰	-	-	-	-	۱۰/۹۲	-

جدول (۵) مشخصات رکورد زلزله‌های حوزه دور به کاررفته [۱۷]

شتاب‌نگاشت	ایستگاه	سال وقوع	بزرگی	فاصله از گسل (km)	شتاب بیشینه (g)	سرعت بیشینه (cm/sec)	جابجایی بیشینه (cm)
Loma Prieta	CDMG58338	۱۹۸۹	۶٫۹۳	۹۲٫۲۱	۰٫۰۷۲۶	۷٫۹۸	۳٫۰۱
Northridge	CDMG23572	۱۹۹۴	۶٫۶۹	۸۲٫۲۲	۰٫۰۷۵۸	۴٫۰۷	۰٫۴۳
Kobe	99999FUK	۱۹۹۵	۶٫۹	۱۹۶٫۱۸	۰٫۳۴	۴٫۳	۱٫۲۸
Kocaeli	Tekridag	۱۹۹۹	۷٫۵۱	۲۰۹٫۸۹	۰٫۰۳۵	۲٫۸	۱٫۲۹

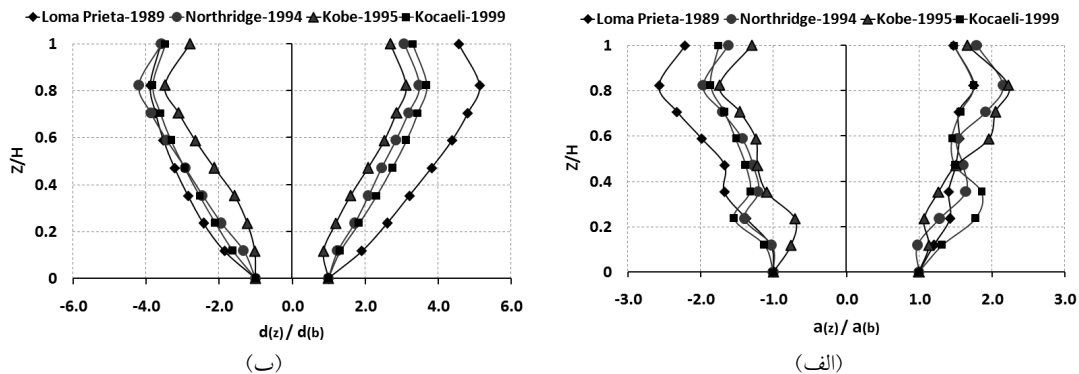


شکل (۴) شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور استفاده شده به عنوان تحریک ورودی [۱۷]

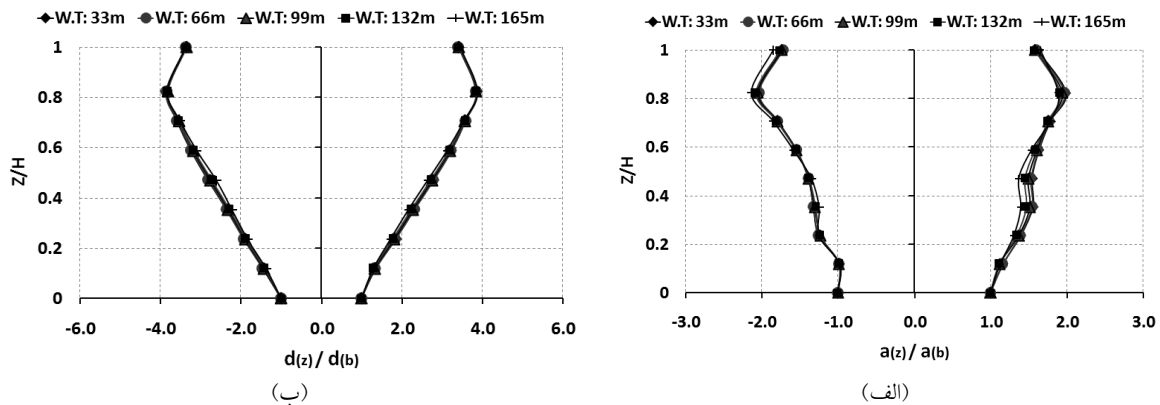
مرکزی سد نسبت به نقطه مبنای واقع بر پی سد به طور نسبی بررسی شده است. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.

۶- بررسی تغییرات بیشینه شتاب و جابجایی

بعد از تحلیل‌های دینامیکی، نقاط واقع بر محور مرکزی سد در هر ارتفاع به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و تغییرات شتاب و جابه‌جایی بیشینه در هر نقطه در امتداد قائم محور



شکل (۵) مقایسه بیشینه‌های نسبی رخ داده در محور مرکزی مقطع مورد نظر با تراز آب ۱۶۵ متری (الف) بیشینه شتاب (ب) بیشینه جابه‌جایی



شکل (۶) مقایسه مقادیر میانگین پارامترهای بیشینه برای ۴ شتاب‌نگاشت اعمال شده، الف) بیشینه شتاب ب) بیشینه جابه‌جایی

اثر ۲ شتاب‌نگاشت نشان داده شده است.

۸- تفسیر نتایج

ضریب اطمینان معادل دینامیکی در این پژوهش مطابق روش ارائه شده به وسیله‌ی Ghanbari et al, (2008) ارزیابی شده است [۱۹]. در روش ارائه شده با در نظر گرفتن میانگین ضرایب اطمینان کمتر از ضریب اطمینان حالت استاتیکی (برای گوه شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۱/۶۳ و ۲/۱۶ است) در کل حوزه زمان، ضریب اطمینان معادل دینامیکی به دست آمده است. به این ترتیب با تعریف ضریب اطمینان معادل دینامیکی، می‌توان یک معیار برای مقایسه ضرایب اطمینان قرار داد. در شکل ۱۱ تغییرات ضریب اطمینان دینامیکی معادل در ۲ گوه محتمل گسیختگی مقایسه شده است. در گوه محتمل گسیختگی پایین دست سد، تغییرات ضریب اطمینان دینامیکی هم‌زمان با افزایش تراز آب مخزن روند صعودی دارد، به طوری که با افزایش تراز آب مخزن از ۳۳ متر تا ۱۶۵ متر به طور میانگین حدود ۳ درصد بر ضریب اطمینان معادل دینامیکی افزوده شده است. در حالی که در گوه محتمل گسیختگی بالادست سد، تغییرات ضریب اطمینان معادل دینامیکی هم‌زمان با افزایش تراز آب مخزن ابتدا روند نزولی و سپس روند صعودی دارد. با افزایش تراز آب مخزن از ۳۳ متر تا ۹۹ متر ضریب اطمینان

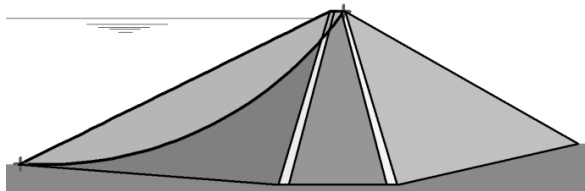
تغییر تراز آب مخزن در مقدار بیشینه شتاب با توجه به شکل ۶ تاثیر اندکی داشته است، البته تأثیر اندک یادشده در میانه‌های ارتفاعی سد و در شیب پایین دستی نمود بیشتری داشته است. همچنین در مورد بیشینه جابه‌جایی رخ داده در حوزه زمان، تغییرات حاصل از تغییر تراز آب مخزن بسیار اندک بوده است.

۷- تحلیل نیومارک

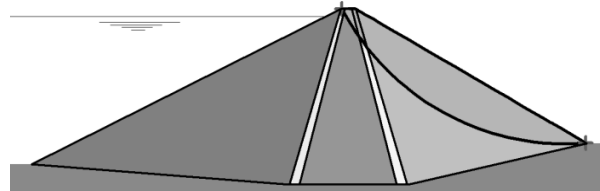
Newmark (1965) ثابت کرد در صورتی که نیروهای مؤثر بر یک توده لغزشی به اندازه‌ای بزرگ شوند که کل نیروهای محرک از نیروهای مقاوم خاک تجاوز کنند، ضریب اطمینان کوچک‌تر از ۱ خواهد شد و به این ترتیب تغییر مکان ماندگار در گوه محتمل گسیختگی رخ خواهد داد [۱۸]؛ بنابراین پس از تحلیل دینامیکی برای دستیابی به مقادیر ضریب اطمینان معادل دینامیکی، ضریب اطمینان کمینه و تغییر مکان ماندگار، تحلیل نیومارک با نرم افزار Slope/w انجام شده است. در این مرحله، موقعیت سطوح محتمل لغزش با استفاده از مشخصات ارائه شده به وسیله‌ی مشاور طرح در نظر گرفته شده است. نحوه قرارگیری سطح لغزش محتمل در بالادست و پایین دست سد در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است [۱۰]. در شکل ۹ و ۱۰ نحوه تغییر ضریب اطمینان در کل حوزه زمان برای مدل‌هایی با ارتفاع قرارگیری آب ۱۶۵ متری تحت

حوزه زمان برای زلزله‌های مختلف در ۲ گوه محتمل گسیختگی نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که با افزایش تراز آب مخزن از ۳۳ متر به ۱۶۵ متر در گوه محتمل گسیختگی واقع در پایین دست سد، به طور میانگین حدود ۱۰ درصد بر ضریب اطمینان کمینه اضافه شده است. در حالی که با افزایش تراز آب مخزن از ۳۳ متر به ۱۶۵ متر در گوه محتمل گسیختگی بالادست سد به طور میانگین حدود ۳۰ درصد از ضریب اطمینان کمینه کاسته شده است.

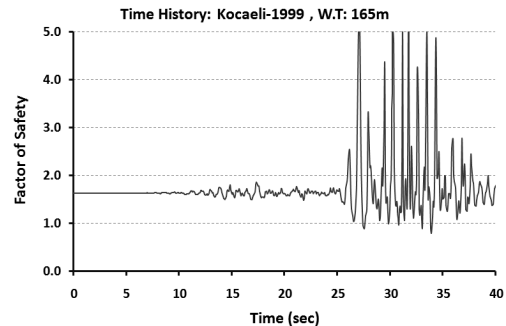
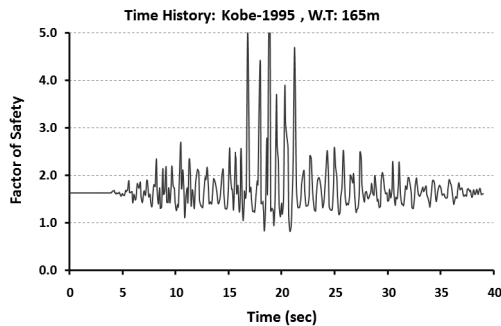
معادل دینامیکی حدود ۱۲ درصد کاهش نشان می‌دهد و سپس با افزایش این تراز از ۹۹ متر تا ۱۶۵ متر حدود ۶ درصد بر ضریب اطمینان معادل دینامیکی افزوده شده است. تغییرات رخ داده در میزان کم به محدود شدن حرکت سد در اثر افزایش تراز آب مخزن و در میزان زیاد به وزن ناشی از اضافه شدن آب مخزن به وزن گوه محتمل گسیختگی در بالادست مربوط است. ضریب اطمینان کمینه، کمترین ضریب اطمینانی است که گوه مستعد گسیختگی در کل حوزه زمان تجربه کرده است. در شکل ۱۲ تغییرات ضریب اطمینان کمینه در کل



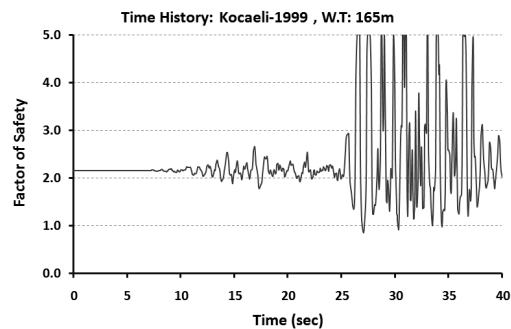
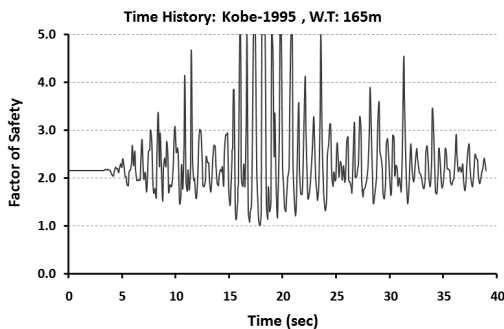
شکل (۸) موقعیت سطح لغزش واقع در بالادست سد



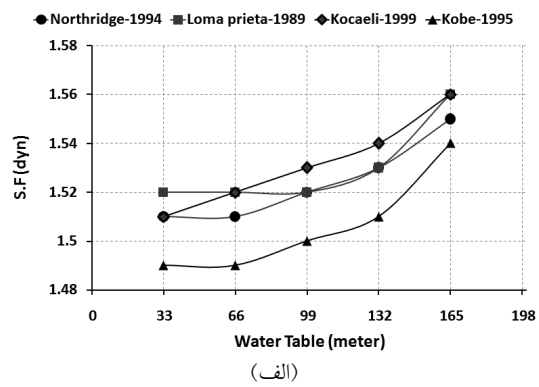
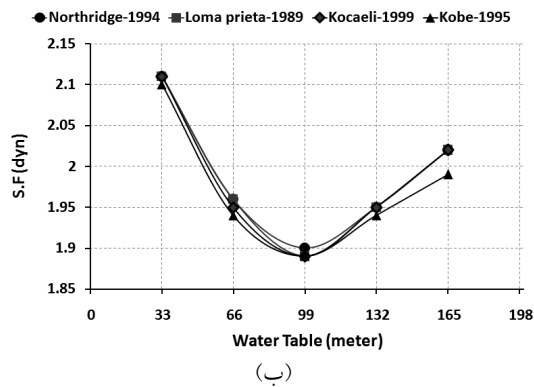
شکل (۷) موقعیت سطح لغزش واقع در پایین دست سد



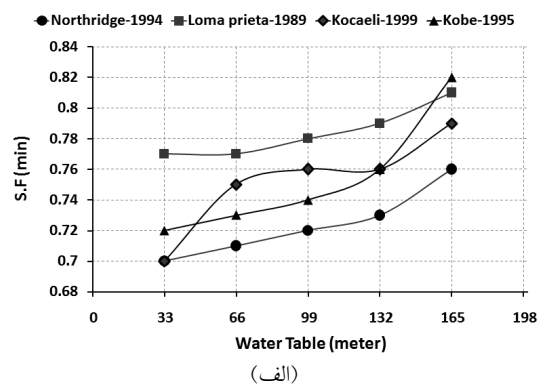
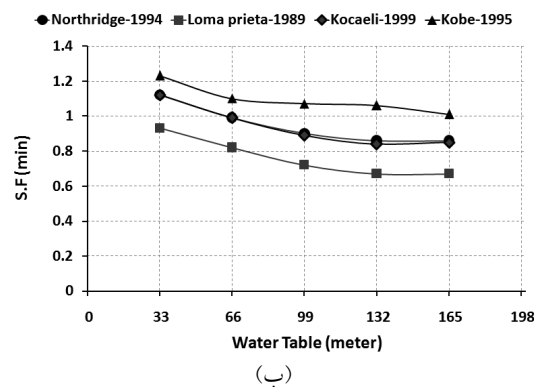
شکل (۹) نحوه تغییر ضریب اطمینان برای گوه محتمل گسیختگی واقع در پایین دست سد در حوزه زمان



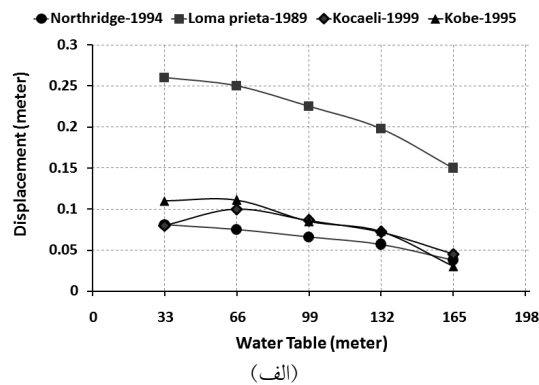
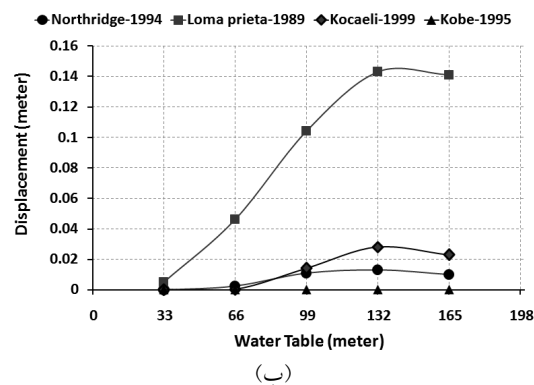
شکل (۱۰) نحوه تغییر ضریب اطمینان برای گوه محتمل گسیختگی واقع در بالادست سد در حوزه زمان



شکل (۱۱) مقایسه مقادیر ضریب اطمینان دینامیکی برای ۴ شتابنگاشت اعمال شده، الف) گوه پایین دستی، ب) گوه بالادستی



شکل (۱۲) مقایسه مقادیر ضریب اطمینان کمینه رخ داده برای ۴ شتابنگاشت اعمال شده، الف) گوه پایین دستی، ب) گوه بالادستی



شکل (۱۳) مقایسه مقادیر تغییر مکان ماندگار برای ۴ شتابنگاشت اعمال شده الف) گوه پایین دستی ب) گوه بالادستی

ماندگار بیشتری داشته است. در صورتی که زلزله‌های دیگر رفتار نسبتاً مشابهی دارند. همچنین در گوه محتمل گسیختگی پایین دست سد، روند نزولی در میزان تغییر مکان ماندگار مشاهده شده است به طوری که با افزایش تراز آب

در شکل ۱۳، مقادیر تغییر مکان ماندگار برای ۴ شتابنگاشت در ۲ گوه محتمل گسیختگی نشان داده شده است. زلزله Lomaprieta-1989 به دلیل داشتن نقاط اوج شتاب بیشتر در مقایسه با زلزله‌های دیگر، تغییر مکان

۱۰- مراجع

- [1] Dinka, M., Agoston, E., Berczik, A., Kutrucz, G., "Influence of water level fluctuation on the spatial dynamic of the water chemistry at Lake" Ecology and Management of Inland Waters, 2004, Volume 34, Issues 1-2, Pages 48-56.
- [2] Steffen, H., Kaufmann, G., "Numerical modeling of deformation changes induced by lake-level fluctuations of the Hohenwarte reservoir", Journal of Geodynamics, 2006, Volume 41, Issue 4, Pages 411-421.
- [3] Peinke, J., Matcharashvili, T., Chelidze, T., Gogiashvili, J., Nawroth, A., Lursmanashvili, O., Javakhishvili, Z., "Influence of periodic variations in water level on regional seismic activity around a large reservoir", Physics of The Earth and Planetary Interiors, 2006, Volume 156, Issues 1-2, Pages 130-142.
- [4] Akkose, M., Bayraktar, A., Dumanoglu, A., "Reservoir water level effects on nonlinear dynamic response of arch dams", Journal of Fluids and Structures, 2008, Volume 24, Issue 3, Pages 418-435.
- [5] Pytharouli, S., Stiros, S., "Ladon dam (Greece) deformation and reservoir level fluctuations: evidence for a causative relationship from the spectral analysis of a geodetic monitoring record", Engineering Structures, 2005, Volume 27, Issue 3, Pages 361-370.
- [6] Wells, J., Bhohe, R., Yang, C.Y., "Transient response of dam reservoir systems to random earthquake excitation", Engineering Mechanics, 1989, Volume 4, Issue 3, Pages 142-149.
- [7] Yang, C.Y., Debessay, M., Li, W.G., "Random vibration of simple flexible arch dam reservoir systems from earthquakes", Engineering Mechanics, Volume 6, Issue 1, March 1991, Pages 18-32.
- [8] Calayir, Y., Dumano, A., Bayraktar, A., "Earthquake analysis of gravity dam-reservoir systems using the Eulerian and Lagrangian approaches", Computers and Structures, 1996, Volume 59, Issue 5, Pages 877-890.
- [9] Bilici, Y., Bayraktar, A., Soyuluk, K., Hacıfendioglu, K., Ateş, Ş., Adanur, S., "Stochastic dynamic response of dam-reservoir-foundation systems to spatially varying

مخزن به طور میانگین حدود ۲/۲ برابر از میزان تغییر مکان ماندگار کاسته شده است. درحالی‌که در گوه محتمل گسیختگی بالادست سد، روند صعودی در میزان تغییر مکان ماندگار مشاهده شده است. این روند تا ۰/۸ ارتفاع سد با افزایش تراز آب مخزن ادامه داشته ولی برای مقادیر بیشتر تراز آب مخزن، روند صعودی تغییر مکان ماندگار به روند نزولی تبدیل شده است.

۹- نتیجه گیری

این پژوهش با در نظر گرفتن سد مسجد سلیمان به عنوان مطالعه موردی به روش اجزاء محدود انجام شده است. نتایج به دست آمده عبارتند از:

- مقایسه مقادیر میانگین بیشینه شتاب و بیشینه جابه‌جایی رخ داده، نشان‌دهنده تأثیر نداشتن تراز آب مخزن بر رفتار لرزه‌ای سد خاکی است.
- مقدار ضریب اطمینان کمینه در گوه محتمل گسیختگی پایین دست سد با افزایش ارتفاع آب مخزن زیاد شده است، در حالی‌که در گوه بالادستی مقدار ضریب اطمینان کمینه کم شده است.
- مقدار ضریب اطمینان دینامیکی هم‌زمان با افزایش سطح تراز آب در گوه پایین دست سد، روند صعودی، ولی در گوه بالادست سد تا ۰/۶ ارتفاع سد، روند نزولی و سپس روند صعودی داشته است. این شرایط نشان‌دهنده بحرانی شدن پایداری گوه بالادست سد با قرار گرفتن تراز آب در ۰/۶ ارتفاع سد است.
- مقدار تغییر مکان ماندگار در گوه پایین دستی با افزایش سطح آب، روند نزولی داشته در حالی‌که برای گوه بالادستی سد روند صعودی داشته است.

- [16] Krahn, J., "Dynamic modeling with quake/w", Geo-slope International ltd, Calgary, Alberta, Canada, 2007.
- [17] www.peer.berkeley.edu
- [18] Newmark. N. M., "Effect of earthquake on dams and embankments", Geotechnique, 1964, V15, pp-135-160.
- [19] Ghanbari, A., Davoodi, M. Ahmadi, B., "Pseudo-static analysis for the masjed soleiman dam", International Water Power and Dam Construction, Dam Engineering, 2008, Vol XIX, Issue 2, pp. 123-144.
- [10] Davoodi, M., "Evaluating dynamic characteristics of embankment dams using ambient and forced vibration tests", PhD thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2003.
- [11] Kuhlemeyer, R., Lysmer, J., "Finite element method accuracy for wave propagation problems", Journal of Soil Mechanics and Foundation, Div, ASCE, 1973, 99, 421-427.
- [12] Krahn, J., "Stress and deformation modeling with sigma/w", Geo-slope International ltd, Calgary, Alberta, Canada, 2007
- [13] Eisenstein, Z., "Computer analyses in earth dam engineering", Computers in soil mechanics: present and future, R. L, 1979.
- [14] Elgamal, A. W. M., Abdel-Ghaffar, A. M., Prevost, J. H., "2-D Elasto plastic Seismic Shear Response of Earth Dam", ASCE, Journal of the Engineering Mechanics, 1987, Vol. 113, No. 5, pp. 702-719.
- [15] Soroush, A., Akhtarpor, A., "Study of excess pore water pressure applied on core of masjed soleiman dam", 7th International Congress on Civil Engineering, iran

«Research Note»

Evaluating the Effect of the Reservoir Water Level on Seismic Behavior of Embankment Dams

M. Shirdel¹, A. Ghanbari^{2*}, M. Davoudi³

1- Young Researcher Club, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

2- No. 49, Tarbiat Moallem University, Mofatteh St., Tehran, Iran

3- International Institutes of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran

ghanbar@tmu.ac.ir

Abstract:

Level of the water table on reservoir is one of the parameters that effects on the seismic behavior of embankment dams. Water table in embankment dams changes every month of the year. Also changing of water table causes to the change of stress and strain in the body of dam. In this situation, earthquake can always happen. So to evaluate the effect of this parameter, Masjed Soleiman dam as a case study was selected. The Masjed Soleiman dam is a rock-fill type with clay core and a maximum height of 177m located on the Karoon River in the Southwest Iran. This embankment dam is located in Khuzestan province at the distance of 25.5 km to Masjed Soleiman town. Finite element model of Masjed Soleiman dam was constructed. The Mohr-coulomb elastic-perfectly plastic constitutive model was taken into account to reflect the soil stress-strain relation. First, layer analysis was carried out considering 12 layers at the end of construction stage. Then, the analysis was continued considering the water table and weight of the dam reservoir in steady seepage condition. The 4 earthquake records in the far field condition were applied horizontally to the bedrock as the input for dynamic analysis. Then, by considering the result of dynamic analysis, changing of the maximum acceleration and maximum displacement in time domain was evaluated. In this study, to perform stability analysis and calculate the factor of safety, critical sliding surface on upstream and downstream, as reported by the consultant engineers, were considered. The semi-empirical Newmark method used for estimating permanent earthquake-related deformation of the slopes is based on the sliding block framework. This conceptual framework approximates the potential sliding mass as a rigid body resting on a rigid sloping base. Using the Newmark method, the equal dynamic factor of safety, minimum factor of safety and applied deformation were evaluated. For studying the water table effect on the behavior of embankment dams, 20 models were used with different water tables in the reservoir. In this study, dynamic analyses were done for 4 earthquake records and for 5 elevations of water table that were considered. Then the seismic response of embankment dam was investigated. The results showed that the level of the water table has low effect on occurred maximum acceleration and maximum displacement. Minimum factor of safety in the downstream critical slip surface was has increased when the water table elevation was increased. But this parameter in the upstream critical slip surface was decreased when the water table elevation was increased. Equal dynamic factor of safety in the downstream critical slip surface was increased when the water table elevation was increased. But the upstream critical slip surface was decreased when the water table elevation was increased to 0.6 height of the dam, and then the equal dynamic factor of safety was decreased. So water table elevation in the upstream wedge was in critical condition when the water table elevation was equal to 0.6 height of the dam. Permanent deformation occurred after the earthquake in the downstream critical slip surface was decreased when the water table elevation was increased but the permanent deformation occurred in the upstream wedge was increased when the water table elevation was increased.

Keywords: Embankment dams, Masjed Soleiman dam, Dynamic analyses, Water table