

ارزیابی مبتنی بر عملکرد رفتار سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله

حمیدرضا پاسه^۱، محمد علیائی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

M.Olyaei @ modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۶/۲۰

چکیده- در این پژوهش، رفتار یک سد خاکی نوعی در دو سطح عملکردی، موسوم به سطح عملکرد "مبنا" و "مطلوب"، با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی ارزیابی شده که، در هر سطح عملکرد، سطوح لرزه‌ای معین و سطوح تخریب مجاز متناظر تعریف شده است. همچنین، رفتار سد برای عواملی مانند شتاب‌نگاشت ورودی، مدل رفتاری و عدد نفوذ استاندارد پوسته حساسیت-سنجی و پایداری سد با انجام تحلیل‌های کاهش پارامترهای مقاومتی (تحلیل SRF) بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که الزامات عملکرد "مبنا" برای سد مطالعه شده با توجه به ویژگی‌های هندسی و ژئوتکنیکی آن قابل تأمین است. اما تأمین عملکرد "مطلوب" برای این سد، مستلزم ایجاد تغییرات در ساختار سد و یا بهسازی لرزه‌ای آن است. وجود ضرایب اطمینان پایین در سطوح لرزه‌ای مطالعه شده، این مطلب را تأیید می‌کند. تحلیل‌های حساسیت‌سنجی به شتاب‌نگاشت‌های "فریولی" و "ساکاریا"، با وجود تفاوت در پاسخ طیفی و چگالی انرژی آنها، نتایج یکسانی را ارائه می‌نماید. مدل فین بسته به تراز شتاب بیشینه اعمالی، فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در بالادست سد را ۲۰ درصد بیشتر از مدل رفتاری مور-کولمب پیش‌بینی می‌نماید. با تغییر عدد نفوذ استاندارد پوسته و تحلیل سد در شتاب‌های بیشینه مختلف مشاهده می‌شود که مدل فین در اعداد نفوذ استاندارد اصلاح شده کمتر از ۳۵ و در شتاب‌های بیشتر از ۰/۷g، وقوع پدیده روانگرایی را در خاکریز بالادست سد پیش‌بینی می‌نماید.

واژگان کلیدی: سد خاکی، ارزیابی مبتنی بر عملکرد، تحلیل دینامیکی غیرخطی، مدل فین، تحلیل SRF

۱- مقدمه

زیر و یا مجاور سدها نشان می‌دهد [۱]. به منظور تحلیل دینامیکی سدهای خاکی، روش‌هایی مانند روش شبه-استاتیکی^۱ (آمبراسیس^۲، ۱۹۶۰) و روش ساده شده ارزیابی تغییر مکان^۳ (نیومارک^۴، ۱۹۶۵، سارما^۵، ۱۹۷۵، ماکدیسسی^۶ و سید، ۱۹۷۷ و بری^۷، ۲۰۰۷) پیشنهاد شده است که در مناطق

مطالعه رفتار سدها در هنگام رخداد زلزله، گسیختگی سد را در قالب مکانیزم‌هایی مانند لغزش یا تغییر مکان برشی خاکریز و فونداسیون، ترک‌های عرضی و طولی، نشست غیر قابل قبول، روانگرایی بدنه سد و یا فونداسیون، کاهش ارتفاع آزاد سد به دلیل تراکم بدنه و یا فونداسیون، گسیختگی مجاری زیرزمینی، نشست و نشست نسبی، تغییر سطح آب به دلیل آسیب پرده آب‌بند و جابه‌جایی گسل‌های

1- Pseudo-static Analysis

2- Ambraseys

3- Simplified Procedure to Assess Deformation

4- Newmark

5- Sarma

6- Makdissi

7- Bray

کیلومتر را پوشش داده و تا شعاع ۳۰۰ کیلومتری توسعه- یابد تا تمامی گسل‌های مهم نزدیک سد را شامل شود. روش احتمالاتی^۱، به طور عددی، تمامی منابع و بزرگای بزرگتر از ۴ و یا ۵ ریشتر را کمی می‌نماید و شامل بزرگای بیشینه هر یک از منابع است [۵].

سد باید برای زلزله پایه طراحی^۳ (DBE) و زلزله طراحی بیشینه^۴ (MDE) طراحی شود که هر دو به سطح فعالیت لرزه‌ای وابسته است (وایلند^۵، ۲۰۰۳) [۷]. برای سطح زلزله DBE، حداقل تخریب قابل قبول است و می‌تواند با استفاده از روش احتمالاتی تعیین شود [۸]. در گذشته برای سطح زلزله MDE، روش جبری^۶ استفاده می‌شد (ICOLD 1983) [۹]، اما امروزه امکان استفاده از هر دو روش میسر است [۵].

ICOLD 1989، دو تراز فعالیت لرزه‌ای شامل، زلزله محتمل بیشینه^۷ (MCE) با دوره بازگشت ۱۰۰۰ - ۵۰۰ ساله و زلزله پایه طراحی (DBE) با دوره بازگشت ۱۴۵ ساله و با احتمال وقوع ۵۰ درصد در ۱۰۰ سال را پیشنهاد نموده- است [۱۰].

ICOLD 2002، سه تراز فعالیت لرزه‌ای شامل، زلزله طراحی بیشینه (MDE)، زلزله محتمل بیشینه (MCE) و زلزله پایه بهره‌برداری^۸ (OBE) را در نظر گرفته است. چهار سطح خطر شامل کم با $PGA < 0.1g$ ، متوسط با $0.1g < PGA < 0.25g$ ، زیاد با $PGA > 0.25g$ (بدون گسل فعال تا ۱۰ کیلومتر) و حدی با $PGA > 0.25g$ (با گسل فعال تا ۱۰ کیلومتر) تعریف شده است [۱۱].

در یورو کد^۹ (۱۹۹۸)، خطر با شتاب بیشینه موثر

با لرزه‌خیزی کم تا متوسط، جواب‌های قابل قبولی داده- است [۲]. برای سدهای بزرگتر در مناطق با لرزه‌خیزی بیشتر، روش‌های پیچیده‌تری مورد نیاز است (سید، ۱۹۸۰ و ICOLD، ۲۰۰۱) [۳] و [۴]. تحلیل‌های عددی دینامیکی خطی معادل، اولین جایگزین است که تغییر مکان دائمی را نمی‌تواند محاسبه نماید. به منظور غلبه بر این محدودیت، مدل‌های غیرخطی هیسترتیک^۱ با لحاظ تولید و استهلاک فشار آب حفره‌ای و با استفاده از تئوری الاستیک جزء به جزء و یا پلاستیک توسعه یافته‌اند [۵].

در این پژوهش، در ابتدا سطوح لرزه‌ای و سطوح تخریب توصیه شده مراجع مختلف برای طراحی و ارزیابی رفتار لرزه‌ای سدها، بررسی شده است. سپس مشخصات هندسی و ژئوتکنیکی اجزاء مختلف این سد خاکی نوعی، مدل‌های رفتاری استفاده شده، شتاب‌نگاشت‌های اعمالی، سطوح عملکردی مورد مطالعه، موسوم به سطوح "مبنا" و "مطلوب"، شامل سطوح لرزه‌ای و سطوح تخریب متناظر تعریف شده است. به عنوان هدف اصلی پژوهش، با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، جنبه‌های مختلف رفتار سد مورد نظر در سطوح عملکردی مطرح شده در بالا ارزیابی شده است. هم‌چنین در این پژوهش، رفتار سد برای عواملی مانند شتاب‌نگاشت ورودی، مدل رفتاری و عدد نفوذ استاندارد پوسته حساسیت‌سنجی و پایداری سد با انجام تحلیل‌های کاهش پارامترهای مقاومتی (تحلیل SRF) بررسی شده است.

۲- طراحی مبتنی بر عملکرد

انتخاب پارامترهای طراحی لرزه‌ای در مطالعات سد به شرایط ژئولوژی و تکتونیک محل اجرای سد وابسته است [۶]. مطالعه ژئولوژی باید کمینه ناحیه‌ای به شعاع ۱۰۰

2- Probabilistic Approach
3- Design Base Earthquake
4- Maximum Design Earthquake
5- Wieland
6- Deterministic Approach
7- Maximum Credible Earthquake
8- Operating Base Earthquake
9- Euro-code

1- Hystertic

ظرفیت، ارتفاع، الزامات تخلیه و پتانسیل تخریب در پایین دست حاصل است.

رابطه بین سطوح ریسک و ضریب ریسک کل براساس جدول (۳) است [۱۵].

معیار لرزه‌ای روش احتمالاتی که به وسیله‌ی آئین‌نامه کانادا توصیه شده‌است، به شرح جدول (۴) است. نیوزلند و انگلیس دوره بازگشت ۱۰,۰۰۰ ساله را برای سدهای با ریسک بالا و بیشتر، ۳۰۰ ساله را برای سدهای با ریسک متوسط و ۱۰۰ ساله را برای سدهای با ریسک کم پیشنهاد داده‌اند [۵].

جدول (۱) سطح مجاز تخریب، روش طراحی مبتنی بر عملکرد [۱۴]

ردیف	سطح مجاز تخریب	وضعیت سازه‌ای	وضعیت بهره‌برداری ^۸
۱	سطح ۱: قابل خدمت رسانی و استفاده ^۹	عدم آسیب و یا آسیب جزئی	عدم وقفه و یا وقفه جزئی در خدمت‌رسانی و بهره‌دهی
۲	سطح ۲: قابل بازسازی ^{۱۰}	آسیب کنترل شده	وقفه کوتاه‌مدت در خدمت‌رسانی و بهره‌دهی
۳	سطح ۳: نزدیک به فروپاشی	آسیب توسعه یافته	وقفه بلندمدت در خدمت‌رسانی
۴	سطح ۴: فروپاشی	تخریب کامل سازه	عدم قابلیت خدمت‌رسانی

جدول (۲) ضرایب ریسک سد در سطوح خطر مختلف (ICOLD 2009) [۱۵]

Risk Factor	Extreme	High	Moderate	Low
Capacity (hm) ^۳	>120 (6)	120-1 (4)	1-0.1 (2)	<0.1 (0)
Height (m)	>45 (6)	45-30 (4)	30-15 (2)	<15 (0)
Evacuation Requirements	>1000 (12)	1000-100 (8)	<100 (4)	None (0)
Potential Downstream Damage	High (12)	Mod. (8)	Low (4)	None (0)

8- Operational
9- Serviceable
10- Repairable

زمین در سنگ و خاک سخت که شتاب زمین طراحی^۱ نامیده می‌شود، به تعریف می‌شود. این شتاب در قالب فعالیت لرزه‌ای مرتبط با ۱۰ درصد احتمال رویداد در ۵۰ سال و یا دوره بازگشت برابر ۴۷۵ سال تعریف شده و این فعالیت لرزه‌ای، به عنوان الزام محدودیت تخریب^۲ در نظر گرفته می‌شود (سکو پیتو^۳، ۲۰۰۹) [۱۲].

در طراحی مبتنی بر عملکرد، دو الزام پایه تعریف می‌شود [۱۳]:

الف) الزام عدم فروپاشی^۴ (حالت حدی نهایی^۵)، بعد از وقوع زلزله، با در نظر گرفتن بارهای قائم و افقی و مقاومت پس‌ماند کافی، سازه باید یکپارچگی سازه‌ای خود را حفظ نماید، اگرچه در برخی بخش‌ها، آسیب قابل توجه ممکن است اتفاق افتد.

ب) به حداقل رساندن آسیب و تخریب بعد از زلزله با احتمال وقوع بالا در عمر مفید سازه (حالت حدی قابلیت خدمت‌رسانی بی وقفه^۶)، به گونه‌ای که برخی بخش‌ها می‌توانند بدون نیاز به بازسازی مجدد، آسیب جزئی را تحمل نمایند [۵].

سطوح آسیب مجاز در روش طراحی مبتنی بر عملکرد در جدول (۱) آمده است (ایایی^۷، ۲۰۰۹) [۱۴].

ICOLD 2009، ضرایب ریسک سدها را متناسب با ظرفیت، ارتفاع، الزامات تخلیه و پتانسیل تخریب در پایین دست، در ۴ سطح خطر مطابق جدول (۲) تعریف نموده است [۱۵]. اعداد داخل پرانتز، بیانگر ضرایب ریسک جزئی است.

ضریب ریسک کل از مجموع ضرایب ریسک مرتبط با

- 1- Design Ground Acceleration
- 2- Damage Limitation
- 3- Seco e Pinto
- 4- Non-collapse State
- 5- Ultimate Limit State
- 6- Serviceability Limit State
- 7- Iai

جدول (۳) رابطه بین سطوح ریسک و ضرایب ریسک کل

[۱۵] (ICOLD 2009)

Total Risk Factor	Risk Class
0-6	I (Low)
7-18	II (Moderate)
19-30	III (High)
31-36	IV (Extreme)

جدول (۴) معیار لرزه‌ای در روش احتمالاتی، توصیه شده به وسیله‌ی

آئین‌نامه کانادا [۵]

Consequence Class of Dam	Mean Annual Exceedance Probability of EQ Design Ground Motion
Low	1/500
Significant	1/1000
High	1/2500
Very High	1/5000
Extreme	1/10000

۳- مدل رفتاری فین^۱ برای تولید فشار آب خفه‌ای

پاسخ یک لایه خاک دانه‌ای اشباع به زلزله، فرآیندی بسیار پیچیده است. اثر اولیه بارگذاری تناوبی، تراکم حجمی بازگشت ناپذیر دانه‌های خاک است که وقتی مصالح در یک چرخه کرنش کامل با تنش همه‌جانبه ثابت قرار می‌گیرند، ایجاد می‌شود. با توجه به بازآرایی دانه‌ها، حجم فضای خالی، تحت تنش همه‌جانبه ثابت کاهش می‌یابد. اگر فضاهای خالی با سیال پر شده باشد و بارگذاری در شرایط زهکشی نشده (تحت حجم ثابت) صورت پذیرد، آنگاه فشار سیال افزایش یافته و تنش مؤثر بین دانه‌ها کاهش می‌یابد.

ساز و کار فوق، به وسیله‌ی فین و همکاران (۱۹۷۷) با در نظر گرفتن این امر که رابطه میان کرنش حجمی برگشت ناپذیر و دامنه تنش برشی سیکلی از تنش همه‌جانبه مستقل است، با رابطه تجربی (۱) که نمو کاهش حجم ($\Delta\varepsilon_{vd}$) را به دامنه کرنش برشی سیکلی (γ) ارتباط می‌دهد، بیان شده است [۱۶].

$$\Delta\varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2\varepsilon_{vd}) + \frac{C_3\varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4\varepsilon_{vd}} \quad (1)$$

که در آن، C_1 تا C_4 ثابت هستند.

شایان توجه است که این رابطه، شامل کرنش حجمی برگشت‌ناپذیر تجمعی (ε_{vd}) به‌گونه‌ای است که نمو کرنش حجمی ($\Delta\varepsilon_{vd}$) با تجمع کرنش حجمی کاهش می‌یابد. اگر γ صفر شود، $\Delta\varepsilon_{vd}$ هم باید برابر صفر شود. این امر رابطه (۲) را ایجاب می‌کند.

$$C_1 C_2 C_4 = C_3 \quad (2)$$

رابطه جایگزین و مشابه رابطه فین، به وسیله‌ی بایرن (۱۹۹۱)، مطابق رابطه (۳) ارائه شده است [۱۷]:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp\left(-C_2\left(\frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma}\right)\right) \quad (3)$$

در این رابطه، C_1 و C_2 ، ثابت‌هایی متفاوت با رابطه (۱) است. بایرن، رابطه (۴) را برای C_1 بر حسب تراکم نسبی و رابطه (۵) را برای C_2 ، ارائه داده است:

$$C_1 = 7600(D_r)^{-2.5} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (5)$$

در صورتی که رابطه تجربی (۶) را در نظر بگیریم [۱۸]:

$$D_r = 15(N_1)_{60}^{0.5} \quad (6)$$

با استفاده از روابط (۴) و (۶)، رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$C_1 = 8.7(N_1)_{60}^{-1.25} \quad (7)$$

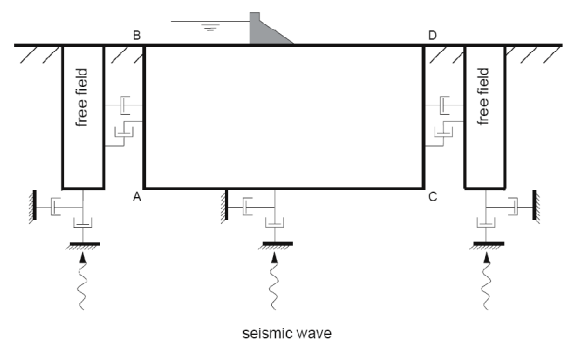
که در آن $(N_1)_{60}$ ، عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده است. نرم‌افزار FLAC، شامل مدل ساختاری‌ای به‌نام مدل فین است که روابط (۱) یا (۳) را با سطح تسلیم مدل مور-کولمب ترکیب می‌کند. همچنین کاربر می‌تواند در این مدل، اصلاحات را اعمال نماید [۱۸].

۴- ملاحظات تحلیل دینامیکی

بارگذاری دینامیکی، شرایط مرزی، میرایی و انتقال موج، وجوه مهم تحلیل دینامیکی است. بارگذاری دینامیکی، از طریق تاریخچه شتاب، سرعت، تغییر مکان، تنش یا نیرو اعمال می‌شود.

روش‌های عددی بر تقسیم یک ناحیه محدود از فضا متکی اند که ایجاب می‌کند، شرایط مناسبی بر مرزهای عددی ساختگی تحمیل شود. در مسائل دینامیکی، به منظور جلوگیری از برگشت امواج منتشرشونده به سمت خارج، پس از برخورد به مرزها، از مرزهای آرام / میدان آزاد^۱ استفاده می‌شود تا مرزها، ویژگی غیربازتابنده خود را حفظ کنند. روشی از این نوع، در نرم‌افزار FLAC هم استفاده شده است که شامل اجرای محاسبات میدان آزاد یک‌بعدی، بطور موازی با تحلیل شبکه تقاضل محدود اصلی، مطابق شکل (۱) است [۱۸].

در تحلیل دینامیکی بر خلاف تحلیل شبه‌استاتیکی، میرایی باید از نظر بزرگی و شکل بتواند افت انرژی در سیستم طبیعی، وقتی که تحت بارگذاری دینامیکی واقع می‌شود را بازتولید نماید. در خاک و سنگ، میرایی طبیعی بیشتر هیسترتیک است، یعنی مستقل از فرکانس عمل می‌نماید. نرم‌افزار FLAC قابلیت اعمال این نوع از میرایی در تحلیل‌های دینامیکی را دارا است [۱۸].



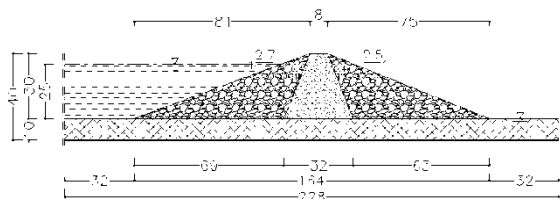
شکل (۱) مدل تحلیل لرزه‌ای سطحی به همراه شبکه میدان آزاد [۱۸]

- 1- Quiet Boundary
- 2- Free-field Boundary

۵- ورودی‌های مدل

۵-۱- هندسه مدل پایه

در این پژوهش، یک سد خاکی نوعی به ارتفاع ۳۰ متر، مستقر بر ساختگاه سنگی مطالعه شده است. سایر مشخصات هندسی سد و پی در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲) هندسه مدل پایه (ابعاد به متر)

۵-۲- مشخصات ژئوتکنیکی سد و ساختگاه

مشخصات ژئوتکنیکی اجزای سد خاکی و پی سنگی در جداول (۵) تا (۷) آمده است. با توجه به اینکه در این تحلیل، مدول برشی و میرایی متناسب با تراز کرنش تغییر می‌یابد، مدول برشی اولیه هسته و پوسته، در اعماق مختلف تعیین و به عنوان مدول برشی در کرنش‌های کم استفاده شده است [۱۹].

جدول (۵) مشخصات ژئوتکنیکی اجزاء سد خاکی نوعی

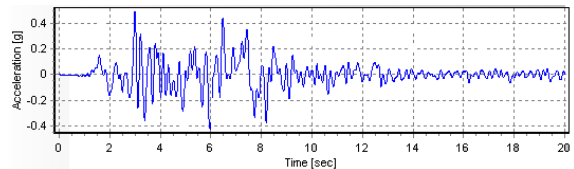
اجزاء سد		مشخصات		
پوسته	هسته	واحد	پارامتر	
۲۰	۱۹	KN/m ³	γ_t	وزن مخصوص تر
۲۲	۲۱	KN/m ³	γ_{sat}	وزن مخصوص اشباع
۵۰	-	-	(N ₁) ₆₀	عدد SPT
۱۰ ^{-۳}	۱۰ ^{-۶}	cm/s	k	نفوذپذیری
۰/۳	۰/۴	-	μ	ضریب پواسون
۱۰	۴۰	KPa	C	چسبندگی
۳۸	۲۵	Deg.	ϕ	زاویه اصطکاک

در تحلیل‌های انجام‌شده به منظور حساسیت‌سنجی نسبت به مدل‌های رفتاری پوسته، از دو مدل مور-کولمب و فین استفاده شده است. فرض بر این است که مشخصات ژئوتکنیکی پوسته،

به گونه‌ای است که مدل فین قابل اعمال به آن است.

۳-۵- بسامد طبیعی سد خاکی

تحلیل مودال برای سد خاکی مورد نظر در سه شرایط پس از ساخت، پس از آبیگری و پس از توسعه فشار آب منفذی و ایجاد جریان پایدار، انجام گرفته و بسامد طبیعی سد در مود اول، در شرایط مذکور، در جدول (۸) آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با آبیگری سد و بعد از آن توسعه فشار آب منفذی در بدنه سد و تشکیل شبکه جریان، بسامد طبیعی سد کاهش می‌یابد.



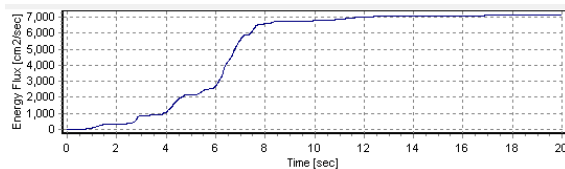
شکل (۳) تاریخچه زمانی تصحیح شده شتاب زلزله ساکاریا [۲۰]

جدول (۸) بسامد طبیعی سد در مود اول برای شرایط مختلف

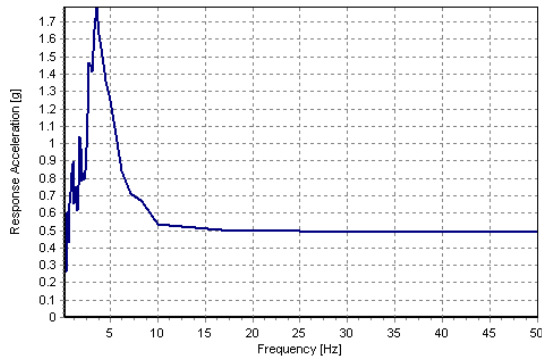
ردیف	شرایط	بسامد طبیعی سد	
		واحد	مقدار
۱	پس از احداث بدنه خاکی سد	هرتز	۳/۵۷
۲	آبیگری سد	هرتز	۱/۹۷
۳	تشکیل شبکه جریان پایدار	هرتز	۱/۶۷

۵-۴- حرکت ورودی سنگ بستر

در تحلیل دینامیکی سد خاکی مورد مطالعه از دو شتاب-نگاشت، به شرح زیر استفاده شده است. شتاب‌نگاشت‌ها، تصحیح تراز پایه شده و با توجه به ابعاد شبکه تفاضل محدود مدل، به منظور انتقال دقیق موج، فرکانس‌های بالاتر از ۵ هرتز در هر دو شتاب‌نگاشت فیلتر شده است.



شکل (۴) تاریخچه زمانی چگالی انرژی ویژه زلزله ساکاریا [۲۰]



شکل (۵) طیف پاسخ شتاب زلزله ساکاریا [۲۰]

الف- شتاب‌نگاشت زلزله کوکایی^۱ ترکیه (ساکاریا) که در ۷ اگوست ۱۹۹۹ میلادی به وقوع پیوسته و توسط ایستگاه ساکاریا ثبت شده است. تداوم کل و تداوم موثر این شتاب-نگاشت، به ترتیب ۲۰ و ۷ ثانیه، شتاب بیشینه ۰/۵g، چگالی

جدول (۶) مدول برشی و حجمی اجزاء سد خاکی نوعی

اجزاء سد	عمق		مشخصات	
	هسته	پوسته	واحد	پارامتر
مدول برشی اولیه	۱۲۰	۱۹۰	Mpa	G _{m0}
	۲۱۰	۲۱۰		
	۲۷۰	۲۴۰		
مدول حجمی	۶۰۰	۴۰۰	Mpa	K
	۹۵۰	۴۵۰		
	۱۳۰۰	۵۲۰		

جدول (۷) مشخصات ژئوتکنیکی پی سنگی

مقدار	واحد	پارامتر	
۲۴	KN/m ³	γ	وزن مخصوص
۰/۲	-	n	تخلخل
۱۰ ^{-۸}	cm/s	k	نفوذپذیری
۸,۵۰۰	Mpa	G	مدول برشی
۱۴,۵۰۰	Mpa	K	مدول حجمی
۵,۰۰۰	KPa	C	چسبندگی
۴۰	Deg	φ	زاویه اصطکاک

1- Kocaelei
2- Sakaria

جدول (۹) پارامترهای لرزه‌ای شتاب‌نگاشت‌های مورد مطالعه

فریولی		ساکاریا		شتاب
بیشینه پاسخ	چگالی	بیشینه پاسخ	چگالی	
شتاب	انرژی	شتاب	انرژی	
g	cm ² /s	g	cm ² /s	
۰/۸۰	۸۴	۰/۶۰	۴۱۴	۰/۱g
۱/۴۳	۴۶۶	۱/۰۷	۲,۴۸۸	۰/۳g
۲/۴۰	۱,۲۹۴	۱/۷۷	۶,۹۱۱	۰/۵g
۳/۳۰	۲,۵۳۷	۲/۵۰	۱۴,۱۰۰	۰/۷g
۴/۳۰	۴,۱۹۴	۳/۳۰	۲۳,۳۰۰	۰/۹g

با مقیاس نمودن شتاب‌های هر دو شتاب‌نگاشت، پارامترهای لرزه‌ای این شتاب‌نگاشت‌ها، به شرح جدول (۹) است.

۵-۶- سطوح عملکردی مورد نظر سد مطالعه شده

به منظور مطالعه رفتار مبتنی بر عملکرد سد خاکی نوعی مورد مطالعه، براساس ICOLD 2002، سه تراز فعالیت لرزه‌ای به شرح زیر لحاظ و مقادیر شتاب بیشینه در هر سطح لرزه-ای، توسط پژوهشگران فرض شده‌است:

الف- زلزله پایه بهره‌برداری، OBE، با شتاب بیشینه ۰/۳g

ب- زلزله طراحی بیشینه، MDE، با شتاب بیشینه ۰/۵g

ج- زلزله محتمل بیشینه، MCE، با شتاب بیشینه ۰/۷g

خاطر نشان می‌سازد که در شرایط خاص مقدار MDE می‌تواند با MCE برابر شود.

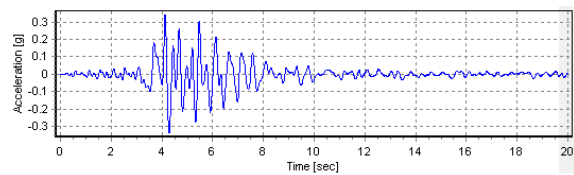
همچنین براساس مفاد جدول (۱)، دو سطح مجاز تخریب برای سد در نظر گرفته شده‌است:

الف- سطح تخریب ۱: قابل خدمت‌رسانی و استفاده (به لحاظ سازه‌ای): عدم آسیب و یا آسیب جزئی، به لحاظ بهره‌برداری: عدم وقفه و یا وقفه جزئی در خدمت‌رسانی و بهره‌دهی)

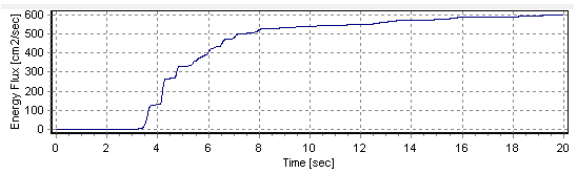
ب- سطح تخریب ۲: قابل بازسازی (به لحاظ سازه‌ای): آسیب کنترل شده، به لحاظ بهره‌برداری: وقفه کوتاه‌مدت در

انرژی ویژه ۶۹۱۱ سانتی‌مترمربع بر ثانیه و بیشینه شتاب پاسخ طیفی آن ۱/۷۷g در فرکانس ۳/۵ هرتز است. تاریخچه زمانی شتاب، چگالی انرژی ویژه و طیف پاسخ شتاب این زلزله بعد از فیلتر نمودن در شکل‌های (۳) تا (۵) آمده‌است [۲۰].

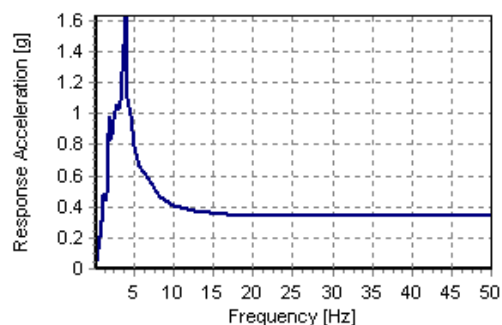
ب- شتاب‌نگاشت زلزله فریولی^۱ ایتالیا که در ۶ می ۱۹۷۹ میلادی به وقوع پیوسته‌است. تداوم کل و تداوم موثر این شتاب‌نگاشت، به ترتیب ۲۰ و ۵ ثانیه، شتاب بیشینه ۰/۳۴g، چگالی انرژی ویژه ۶۰۰ سانتی‌مترمربع بر ثانیه و بیشینه شتاب پاسخ طیفی آن ۱/۶۲g در فرکانس ۴ هرتز است. تاریخچه زمانی شتاب، چگالی انرژی ویژه و طیف پاسخ شتاب این زلزله بعد از فیلتر نمودن در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) آمده‌است [۲۰].



شکل (۶) تاریخچه زمانی تصحیح شده شتاب زلزله فریولی [۲۰]



شکل (۷) تاریخچه زمانی چگالی انرژی زلزله فریولی [۲۰]



شکل (۸) طیف پاسخ شتاب زلزله فریولی [۲۰]

خدمت‌رسانی و بهره‌دهی)

(نسخه بایرن) استفاده شده‌است.

بر مبنای سطوح لرزه‌ای و سطوح تخریب مورد نظر، دو

سطح عملکردی به شرح زیر بررسی شده است.

الف- سطح عملکرد مینا: در سطح لرزه‌ای (0.3g) OBE، سطح تخریب ۱ و در سطح لرزه‌ای (0.5g) MDE، سطح تخریب ۲ تامین شود.

ب- سطح عملکرد مطلوب: در سطح لرزه‌ای (0.5g) MDE، سطح تخریب ۱ و در سطح لرزه‌ای (0.7g) MCE، سطح تخریب ۲ تامین شود.

خاطر نشان می‌سازد، در این ارتباط می‌توان سطوح

بالاتری را نیز برای سد تعریف نمود (سطوح عملکردی ویژه).

۶- مراحل مدل‌سازی سد خاکی

مدل‌سازی سد خاکی به صورت مرحله به مرحله، شامل تعادل اولیه پی سنگی، احداث سد خاکی در گام‌های اجرایی، آبیگری مخزن و توسعه فشار آب حفره‌ای در پی و بدنه سد خاکی و تشکیل شبکه جریان پایدار انجام و تعادل هیدرومکانیکی حاصل شده‌است. شبکه تفاضل محدود مدل، مطابق شکل (۹) است. توزیع فشار آب حفره‌ای در پی و بدنه سد، پس از ایجاد تعادل هیدرومکانیکی در شکل (۱۰) آمده‌است. پس از ایجاد تعادل هیدرومکانیکی، سد خاکی نوعی، تحت تحریکات دینامیکی، مطابق شتاب-نگاشت‌های تعریف شده واقع شده‌است.

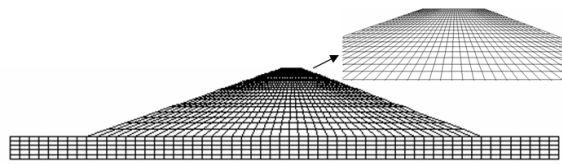
به منظور ارزیابی رفتار سد در سطوح لرزه‌ای و

عملکردی مورد نظر و حساسیت‌سنجی در شتاب، با استفاده از روش مقیاس‌نمودن شتاب بیشینه شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر، تحلیل دینامیکی سد خاکی در شتاب‌های بیشینه ۰/۱g تا ۰/۹g انجام شده‌است. مدل رفتاری هسته، مدل مور-کولمب فرض شده و به منظور حساسیت‌سنجی در مدل‌های رفتاری پوسته، از مدل‌های مور-کولمب و فین

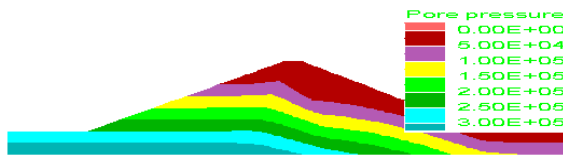
۷- نتایج تحلیل دینامیکی

۷-۱- تغییر مکان سد خاکی

پس از تحلیل دینامیکی غیرخطی سد خاکی نوعی، مستقر بر پی سنگی به ازاء شتاب‌های بیشینه متفاوت، نتایج تحلیل به شرح زیر ارائه شده‌است.



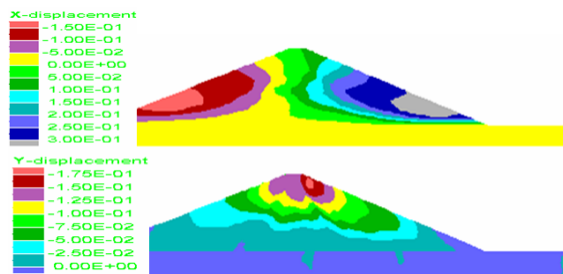
شکل (۹) شبکه تفاضل محدود سد خاکی و پی سنگی



شکل (۱۰) توزیع فشار آب حفره‌ای در پی و بدنه سد، پاسکال

در شکل (۱۱)، تغییر مکان افقی و قائم سد خاکی مستقر بر پی سنگی برای زلزله فریولی با شتاب ۰/۵g و پوسته با مدل رفتاری مور-کولمب آمده‌است.

تغییرات بیشینه کرنش برشی و بیشینه تغییر مکان افقی در پایین دست در زلزله‌های ساکاریا و فریولی با شتاب‌های بیشینه مختلف و پوسته با مدل‌های رفتاری مور-کولمب و فین در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) آمده‌است.



شکل (۱۱) تغییر مکان افقی و قائم سد خاکی، متر (زلزله فریولی،

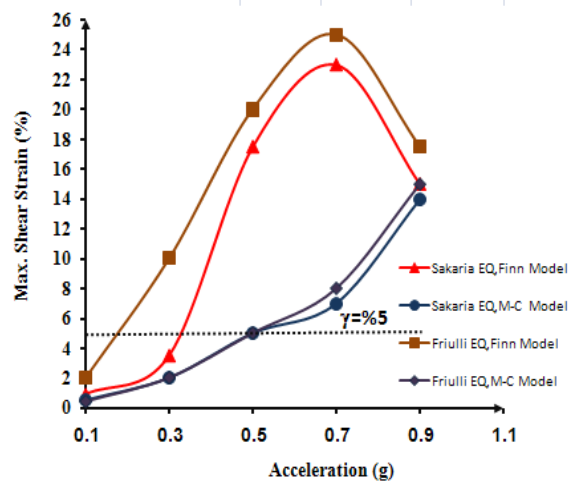
۰/۵g - پوسته با مدل رفتاری مور-کولمب)

نتایج مرتبط با مدلسازی پوسته پایین دست با مدل های مور-کولمب و فین، دارای تفاوت چشمگیری با یکدیگر است. مدل فین، کرنش برشی و تغییر مکان پایین دست سد را در مقایسه با مدل مور-کولمب بسیار زیاد ارزیابی می نماید و این می تواند به دلیل عدم انطباق فرضیات مدل با شرایط غیر اشباع محدوده وسیعی از پوسته پایین دست باشد. نوعی سخت شدگی مجدد در خاک مدلسازی شده با مدل فین در شتاب های بالا در رفتار مصالح پوسته پایین دست مشاهده می شود.

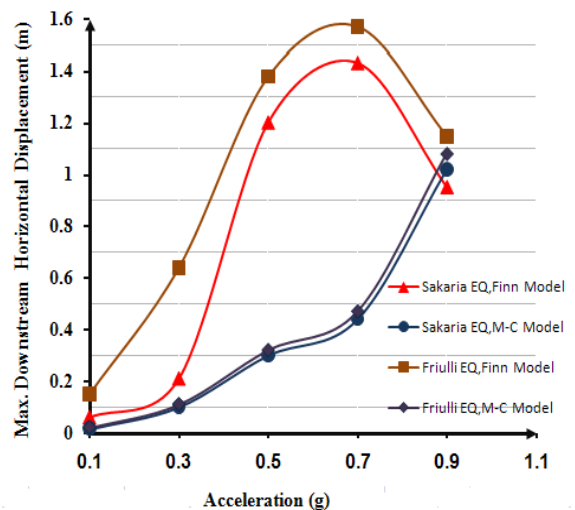
چنانچه کرنش برشی مجاز سد ۵ درصد در نظر گرفته شود [۵]، در هر دو زلزله ساکاریا و فریولی با در نظر گرفتن مدل رفتاری مور-کولمب برای پوسته پایین دست، سد تا شتاب $0.5g$ (سطح لرزه ای MDE) پایدار خواهد ماند. برای این مدل رفتاری، نرخ تغییرات تغییر مکان سد در پایین دست در شتاب $0.7g$ (سطح لرزه ای MCE) و بیشتر، در هر دو شتاب نگاشت فریولی و ساکاریا روند صعودی داشته و مقادیر تغییر مکان در این سطح لرزه ای زیاد ارزیابی می شود. نمودار تغییرات میزان نشست تاج در زلزله های ساکاریا و فریولی با شتاب های بیشینه مختلف و پوسته با مدل های رفتاری مور-کولمب و فین در شکل (۱۴) آمده است.

همان گونه که ملاحظه می شود در شرایط مدل رفتاری یکسان، زلزله فریولی آهنگ تغییرات مشابه ای را در نشست تاج سد در مقایسه با زلزله ساکاریا و مقادیر نشست بیشتری را ایجاد می نماید. مشابه نتایج تغییر مکان پایین دست سد، نشست در تاج سد در شرایط مدلسازی پوسته با مدل رفتاری فین در مقایسه با مدل مور-کولمب بسیار زیاد ارزیابی می شود. میزان این اختلاف، با افزایش شتاب اعمالی، افزایش می یابد. برای مدل مور-کولمب، نشست تاج سد تا شتاب $0.5g$ (سطح لرزه ای MDE)، در هر دو شتاب نگاشت فریولی و ساکاریا کنترل شده است.

همان گونه که مشاهده می شود با در نظر گرفتن مدل رفتاری یکسان برای پوسته، روند تغییرات کرنش برشی و تغییر مکان افقی پایین دست برای زلزله های ساکاریا و فریولی مشابه است. اگرچه زلزله فریولی که دارای دامنه فوریه و پاسخ طیفی شتاب بیشتر و چگالی انرژی کمتر در مقایسه با زلزله ساکاریا است، کرنش ها و تغییر مکان هایی بیشتر از زلزله ساکاریا را ایجاد نموده است.



شکل (۱۲) بیشینه کرنش برشی در برابر شتاب بیشینه زلزله



شکل (۱۳) حداکثر تغییر مکان افقی در پایین دست در برابر شتاب بیشینه زلزله

نمودار تغییرات بیشینه تغییر مکان افقی در بالادست در شکل (۱۵) آمده است. نتایج تحلیل های حساسیت سنجی به زلزله ورودی، شتاب بیشینه شتاب نگاشت و مدل رفتاری، در خاکریز بالادست سد نزدیک به یکدیگر است. مدل فین، بسته به تراز شتاب بیشینه اعمالی، ۱۰ تا ۳۰ درصد، تغییر مکان خاکریز بالادست سد را بیشتر از مدل مور-کولمب پیش بینی می نماید و علت این امر تخمین بیشتر فشار آب حفره ای است که در ادامه درباره آن بحث خواهد شد. نتایج نشان می دهد که مدل فین، با توجه به شرایط اشباع پوسته بالادست، قابل اعمال به پوسته بالادست سد است.

به طور کلی خاکریز بالادست رفتار پایدارتری را در مقایسه با خاکریز پایین دست در شتاب های بالا نشان می دهد.

۲-۷- فشار آب حفره ای

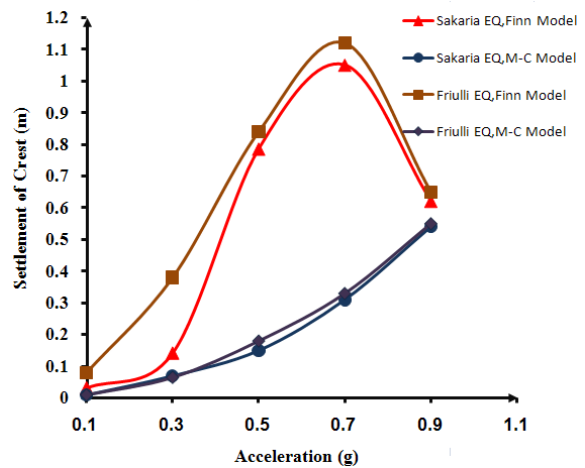
نسبت فشار آب حفره ای اضافی با رابطه زیر تعریف می شود:

$$r_u = \frac{u_{excess}}{\sigma'_{3c}} \quad (8)$$

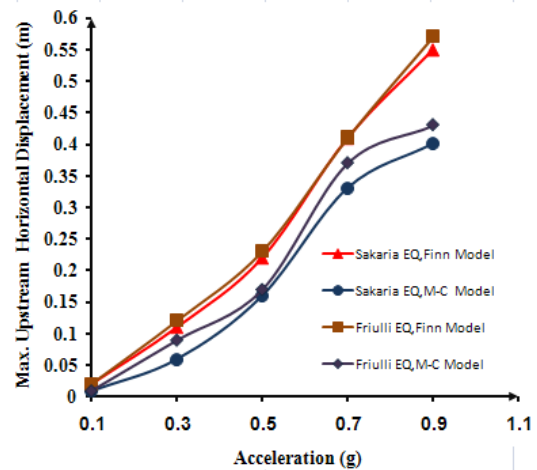
در این رابطه، u_{excess} فشار آب حفره ای اضافی و σ'_{3c} تنش همه جانبه مؤثر است.

نمودار بیشینه تاریخچه نسبت فشار آب حفره ای اضافی در زلزله های ساکاریا و فریولی با شتاب های بیشینه مختلف و پوسته با مدل های رفتاری مور-کولمب و فین در شکل (۱۶) آمده است.

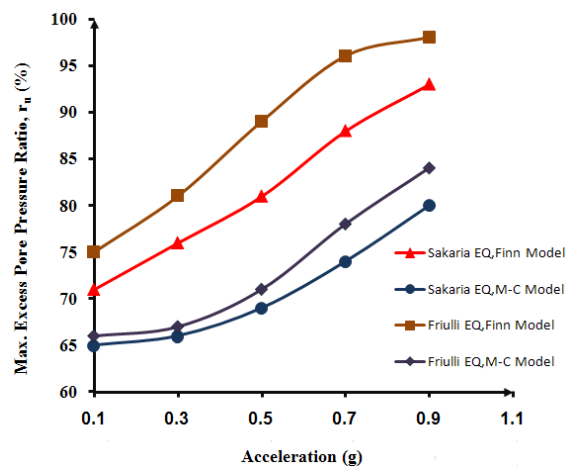
بیشینه نسبت فشار آب حفره ای اضافی در سد خاکی مطالعه شده، به ۰/۹۸ در شتاب ۰/۹g افزایش یافته است. بنابراین با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی نواحی بالادست، در هیچ یک از نقاط این ناحیه، حتی در شتاب ۰/۹g



شکل (۱۴) فرونشست تاج در برابر شتاب بیشینه زلزله

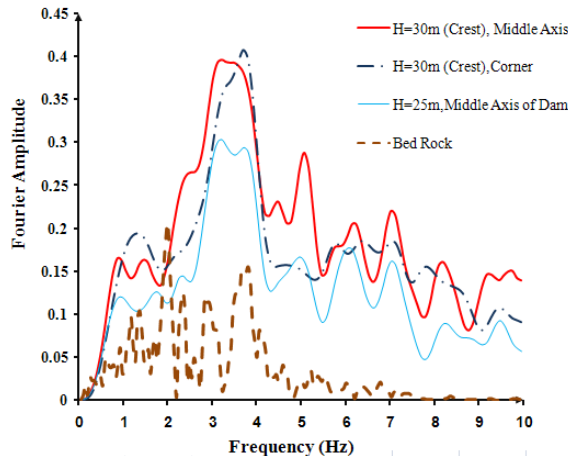


شکل (۱۵) بیشینه تغییر مکان افقی در بالادست در برابر شتاب بیشینه زلزله

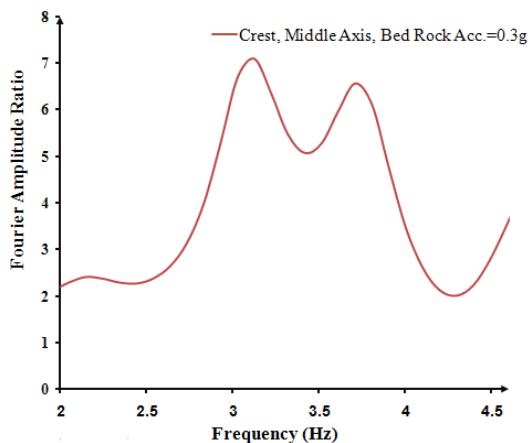


شکل (۱۶) بیشینه تاریخچه نسبت فشار آب حفره ای اضافی در برابر شتاب بیشینه زلزله (پوسته بالادست)

نشان می‌دهد. بیشینه دامنه فوریه شتاب‌های بیشینه ورودی مختلف در محدوده فرکانس‌های $2/5$ تا 3 هرتز واقع شده- است.



شکل (۱۷) طیف فوریه در نقاط مختلف سد (شتاب بیشینه $0/3g$)



شکل (۱۸) نسبت دامنه فوریه تاج سد به سنگ بستر

۸- تحلیل‌های حساسیت‌سنجی

۸-۱- ارزیابی تاثیر تغییر پارامترهای مقاومتی

به منظور بررسی پایداری سد، از روش اعمال ضریب کاهش مقاومت^۱ استفاده می‌گردد. در این روش، ایمنی، برابر بزرگترین مقدار SRF که سد به ازای آن پایدار می‌ماند، تعریف می‌شود.

روانگرایی اتفاق نیفتاده است. لیکن در زلزله فریولی در شتاب‌های $0/7g$ و $0/9g$ با مدل رفتاری فین برای پوسته، حداکثر نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی و ضریب اطمینان در برابر روانگرایی به عدد یک نزدیک می‌باشد. در این شرایط، در صورت بروز عوامل پیش‌بینی نشده، وقوع روانگرایی در بدنه سد بسیار محتمل خواهد بود.

مدل فین در شرایط زلزله یکسان، افزایش فشار آب حفره‌ای را در پوسته بالادست، بسته به نوع شتاب‌نگاشت و تراز شتاب بیشینه اعمالی، 15 تا 25 درصد بیشتر از مدل مور-کولمب برآورد می‌نماید. در شرایط مدل رفتاری یکسان، نتایج دو زلزله مورد مطالعه به یکدیگر نزدیک است. با افزایش شتاب بیشینه ورودی، اختلاف نتایج حاصل از اعمال دو شتاب‌نگاشت افزایش می‌یابد.

۷-۳- پاسخ لرزه‌ای سد خاکی

در زمان تحلیل، تاریخچه شتاب نقاط مختلف پی و بدنه سد ثبت شده و براساس این شتاب‌نگاشت‌ها، طیف فوریه متناظر در نقاط مختلف سد بدست آمده است.

در شکل (۱۷)، طیف فوریه در میانه تاج سد، گوشه تاج سد، عمق 5 متری از تراز تاج (در محور سد) و سنگ بستر با در نظر گرفتن مدل رفتاری مور-کولمب در هسته و پوسته و زلزله فریولی در شتاب بیشینه $0/3g$ آمده است. در شکل (۱۸)، نسبت دامنه فوریه حاصل از شتاب ثبت شده در محور میانی تراز تاج سد به دامنه فوریه در سنگ بستر برای زلزله فریولی در شتاب بیشینه ورودی سنگ بستر $0/3g$ در محدوده فرکانس‌های مهم آمده است. براساس این نمودار، دامنه حرکت قوی زمین در محور تاج سد، به میزان 7 برابر تقویت شده است.

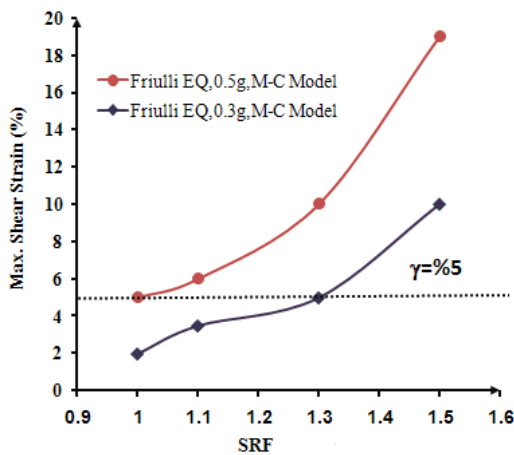
شکل (۱۹)، طیف فوریه محور میانی تراز تاج سد را برای زلزله فریولی در شتاب‌های بیشینه ورودی مختلف

1- Strength Reduction Factor

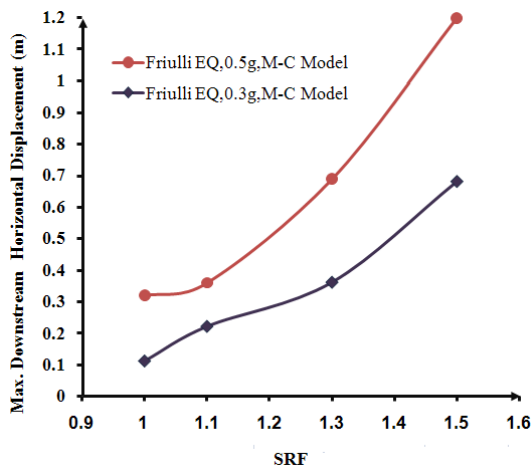
۸-۲- ارزیابی تاثیر عدد نفوذ استاندارد

به منظور بررسی تاثیر عدد نفوذ استاندارد بر اضافه فشار آب منفذی، برای ارزیابی روانگرایی در پوسته بالادست، پاسخ سد به تغییرات عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده در شتابنگاشت زلزله فریولی و با در نظر گرفتن مدل رفتاری فین، حساسیت سنجی شده است.

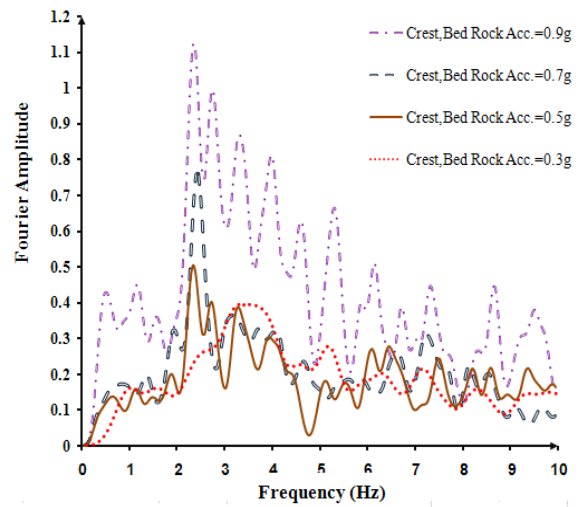
شکل (۲۲) تغییرات بیشینه نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی را در برابر عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده نشان می‌دهد. با کاهش عدد نفوذ استاندارد، فشار آب حفره‌ای بیشتری در بدنه سد ایجاد می‌شود.



شکل (۲۰) بیشینه کرنش برشی در ضرائب کاهش مقاومت مختلف



شکل (۲۱) حداکثر تغییر مکان افقی پایین دست سد در ضرائب کاهش مقاومت مختلف



شکل (۱۹) طیف فوریه تاج سد برای شتاب‌های ورودی مختلف

ضریب کاهش مقاومت به پارامترهای مقاومتی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) به صورت زیر اعمال می‌شود:

$$C_d = \frac{C}{SRF} \quad (9)$$

$$\varphi_d = tg^{-1} \left(\frac{tg \varphi}{SRF} \right) \quad (10)$$

در این روابط C_d و φ_d به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است.

با توجه به مقادیر بیشتر پاسخ سد به زلزله فریولی، شتابنگاشت این زلزله و نیز مدل موهر-کولمب، برای تحلیل حساسیت سنجی پارامترهای مقاومتی مصالح تشکیل دهنده هسته و پوسته انتخاب شده است. شکل‌های (۲۰) و (۲۱) تغییرات کرنش برشی و بیشینه تغییر مکان خاکریز پایین دست سد را در ضرائب کاهش مقاومت مختلف نشان می‌دهد. چنانچه کرنش برشی ۵ درصد، حد مجاز پایداری سد در نظر گرفته شود [۵]، براساس ارزیابی فوق‌الشاره، در شتاب ۰/۳g، ضریب اطمینان پایداری سد در حدود SF=1.3 و در شتاب ۰/۵g، ضریب اطمینان پایداری سد در حدود SF=1 تخمین زده می‌شود.

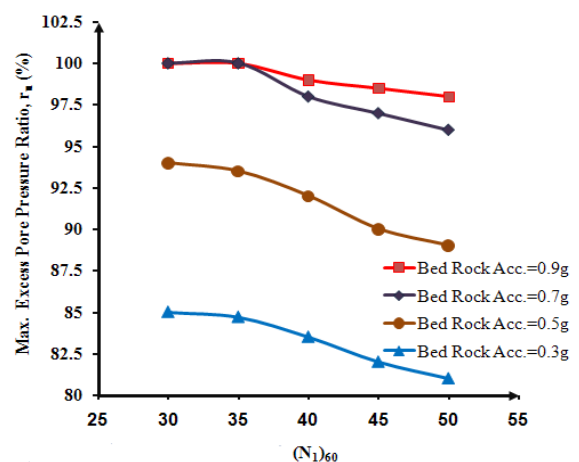
انجام تحلیل‌های پایه و تحلیل‌های حساسیت‌سنجی بررسی شده‌است. حساسیت‌سنجی برای شتاب‌نگاشت و شتاب بیشینه اعمالی، مدل رفتاری پوسته، کاهش پارامترهای مقاومتی هسته و پوسته و تغییر در شاخص عدد نفوذ استاندارد پوسته بوده‌است.

در تحلیل‌های حساسیت‌سنجی مرتبط با شتاب‌نگاشت ورودی مشاهده می‌شود که با توجه به یکسان بودن تداوم کل و موثر شتاب‌نگاشت‌های فریولی و ساکاریا، محدود نمودن فرکانس آنها به ۵ هرتز برای ارضاء شرط انتقال دقیق موج در مدل و مقیاس نمودن بیشینه شتاب آنها، باوجود تفاوت در پاسخ طیفی و چگالی انرژی، نتایج نزدیکی به یکدیگر از هر دو زلزله حاصل شده‌است. این امر، تاثیر عوامل شتاب بیشینه، محتوای فرکانسی و تداوم موثر شتاب‌نگاشت‌ها را در نتایج نشان می‌دهد. بنابراین به نظر می‌رسد که با یکسان نمودن سه عامل مطرح‌شده در بالا برای شتاب‌نگاشت‌های انتخابی، نتایج نزدیکی را در تحلیل باید انتظار داشت. با این وجود، زلزله فریولی که از پاسخ طیفی بیشتری برخوردار است، تغییر مکان‌های بیشتری را در بدنه سد ایجاد نموده‌است.

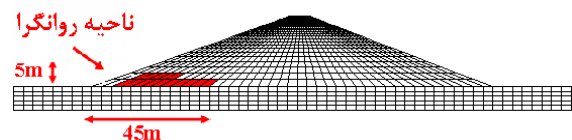
تحلیل‌های حساسیت‌سنجی به مدل رفتاری پوسته نشان می‌دهد که مدل رفتاری فین در مقایسه با مدل مور-کولمب، تغییر مکان نقاط پوسته پایین‌دست سد را بسیار زیاد ارزیابی می‌نماید و در نتیجه این مدل قابل اعمال به پوسته پایین‌دست نیست. این امر با توجه به اشباع نبودن بخش عمده‌ای از پوسته پایین‌دست توجیه‌پذیر است. در پوسته بالادست، هر دو مدل الگوی تغییر مکانی تقریباً مشابهی را برای رفتار سد پیش‌بینی می‌کنند. اگرچه مدل اضافی را حدوداً ۲۰ درصد بیشتر از مدل رفتاری مور-کولمب پیش‌بینی نموده و به این دلیل، تغییر مکان‌های به‌دست

در اعداد نفوذ استاندارد بیشتر از ۴۰، در تمامی شتاب‌های بیشینه مورد مطالعه، مقدار پارامتر نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی کمتر از ۱ بوده و لذا در هیچ‌یک از نواحی بدنه سد روانگرایی اتفاق نیفتاده‌است. اگرچه در زلزله‌ها با شتاب بیشینه ورودی ۰/۷g و ۰/۹g، نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی به عدد ۱ نزدیک بوده و خطر وقوع روانگرایی را محتمل می‌سازد.

در اعداد نفوذ استاندارد کمتر از ۳۵ و زلزله‌ها با شتاب بیشینه ورودی ۰/۷g و ۰/۹g، در برخی از نواحی پوسته بالادست، پارامتر نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی به مقدار ۱ رسیده‌است. این نواحی که دچار روانگرایی شده‌اند، در شکل (۲۳) برای شتاب بیشینه ورودی ۰/۹g نشان داده شده‌است.



شکل (۲۲) بیشینه نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی در اعداد نفوذ استاندارد مختلف



شکل (۲۳) ناحیه روانگرا شده در زلزله با بیشینه شتاب ۰/۹g

۹- نتیجه‌گیری

در این پژوهش وجوه مختلف رفتار مبتنی بر عملکرد سد با

مورد مطالعه، ضریب اطمینان $1/3$ در سطح $OBE (0.3g)$ و ضریب اطمینان 1 در سطح $MDE (0.5g)$ ، موید مطلب فوق بوده و به طور کلی بهبود رفتار لرزه‌ای سد به منظور تامین الزامات سطوح عملکردی موردنظر و حصول ضرایب اطمینان بیشتر الزامی است.

۱۰- منابع

- [1] Sêco e Pinto, P.S., (2001), "Dam Engineering-Earthquake Aspects". Special Lecture. Proc. of 4th ICSDEE, San Diego, CD.
- [2] Sêco e Pinto, P.S., (1993), "Dynamic Analysis of Embankment Dams", Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering Seminar, Edited by Sêco e Pinto, Balkema Publisher, pp. 159-269.
- [3] Seed, H.B., (1980), "Earthquake-Resistant Design of Earth Dams", Symposium and Practice of Dam Engineering, Bangkok, pp. 41-60.
- [4] ICOLD, (2001), "Design Features of Dams to Effectively Resist Seismic Ground Motions", Bulletin 120.
- [5] Sêco e Pinto, P.S., (2010), "Understanding Seismic Embankment Dam Behavior Through Case Histories", Fifth International Conference on Recent Advance in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California.
- [6] Sêco e Pinto, P.S., (2006), "Dam Engineering-New Challenges", Schezy Lecture, Budapest, 33 pages.
- [7] Wieland, M., (2003), "Seismic Aspects of Dams", General Report Q 83, 21 st ICOLD, Montreal.
- [8] SRB - Subcommission of Dam Codes, (1990), "Dams Safety Code" (in portuguese).
- [9] ICOLD, (1983), "Seismicity and Dam Design", Bulletin n 46.
- [10] ICOLD, (1989), "Selection Seismic Parameters for Large Dams - Guidelines", Bulletin 72.
- [11] ICOLD, (2002), "Earthquake Design and Evaluation of Structures Appurtenant to Dams", Bulletin 123, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, ICOLD, Paris.
- [12] Sêco e Pinto, P.S., (2009), "Interaction Between Eurocode 7-Geotechnical Design and Eurocode 8-Design for Earthquake Resistance of Geotechnical Design Concept", Special Lecture. Proceedings of the 2nd International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Gifu, Editors Y. Honjo, M. Susuki, T. Hara & F. Zhang, Gifu Conference, pp 51- 66.

آمده از مدل فین است. پس پیشنهاد می‌شود که مدل مور-کولمب برای تحلیل تغییر مکان و پایداری سد و مدل فین برای ارزیابی روانگرایی پوسته بالادست به کار گرفته شوند. با تغییر عدد نفوذ استاندارد پوسته و تحلیل سد در شتاب‌های بیشینه مختلف مشاهده می‌شود که در اعداد نفوذ استاندارد اصلاح شده کمتر از 35 و در شتاب‌های بیشتر از $0.7g$ ، خاکریز بالادست روانگرا می‌شود. اگرچه در اعداد نفوذ استاندارد اصلاح شده بیشتر از 35 نیز در شتاب‌های بیشتر از $0.7g$ ، وقوع روانگرایی محتمل است.

با توجه به ارزیابی‌های انجام شده، تغییر مکان‌های افقی و قائم و آسیب‌های سازه‌ای سد در سطح لرزه‌ای $OBE (0.3g)$ ناچیز بوده و عدم وقفه و یا وقفه جزئی در خدمت‌رسانی و بهره‌دهی (سطح مجاز تخریب ۱) پیش‌بینی می‌شود. در سطح لرزه‌ای $MDE (0.5g)$ نیز با توجه به نتایج ارزیابی تغییر مکان‌های افقی و قائم، آسیب سازه‌ای کنترل شده در سازه سد و وقفه کوتاه‌مدت در خدمت‌رسانی و بهره‌دهی (سطح مجاز تخریب ۲) قابل پیش‌بینی می‌باشد. بنابراین سد دارای سطح عملکرد مینا، مطابق تعریف از پیش تعیین شده است. اما با توجه به میزان تغییر مکان‌های افقی و قائم سد، در دو سطح لرزه‌ای $MDE (0.5g)$ و $MCE(0.7g)$ ، به ترتیب سطوح تخریب مجاز ۱ و ۲ حاصل نگردیده و در نتیجه الزامات عملکرد مطلوب، مطابق تعریف از پیش تعیین شده، برای سد تامین نمی‌شود.

به منظور تامین عملکرد مطلوب برای سد مورد مطالعه، ایجاد تغییرات در مشخصات هندسی سد مانند تغییر شیب خاکریزها، ایجاد سکوها پایدار در دو سمت خاکریزها، استفاده از روش‌های بهسازی لرزه‌ای مانند ترکیب عمیق خاک با سیمان^۱ و یا سایر راهکارهای بهینه فنی الزامی است. وجود ضرایب اطمینان پایین در سطوح لرزه‌ای (خطر)

1- Cement Soil Deep Mixing

- [16] Finn, W.D.L., Lee, W. and Martin, G.R., "An Effective Stress Model for Liquefaction", J. Geotech. Engng Div., ASCE, 103(GT6), pp. 517-533, 1977.
- [17] Byrne, P., (1991), "A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand", In Proceeding of Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp. 1-24.
- [18] Manual of FLAC, Ver.5.0, (2005), "Dynamic Analysis", Itasca Consulting Group Inc.
- [19] Das, Braja M., (1992), Principles of Soil Dynamics, Southern Illinois University at Carbondale, USA.
- [20] Seismo Signal Software, Ver.3.2.0, (2007) Seismosoft co., <http://www.seismosoft.com>.
- [13] Sêco e Pinto, P.S. [2009]. "Seismic Behaviour of Geotechnical Structures-Past, Present and Future". Proc. Of Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Editors T. Kokusho, Y. Tsukamoto & M. Yoshimine, pp. 341-349.
- [14] Iai, S., (2009), "Discussion Session on Performance Criteria for Designing Geotechnical", Proc. of Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Editors T. Kokusho, Y. Tsukamoto & M. Yoshimine, pp. 265-267.
- [15] ICOLD, (2009), "Selection Seismic Parameters for Large Dams - Guidelines", Bulletin 72, 2009 Revision.

Based Performance Evaluation of Earth Dams under Seismic Loading

H.R. Paseh¹, M. Oliaei^{2*}

1- Ph.D. Student of Civil Engineering, Soil and Foundation Mechanics, Tarbiat Modares University

2- Assistant Professor of Civil Engineering, Soil and Foundation Mechanics, Tarbiat Modares University

M.Olyaei @ modares.ac.ir

Abstract:

Dams shall safely retain the reservoir and any stored solids, and pass environmentally acceptable flows, as required for all loading conditions, ranging from normal to extreme loads, commensurate with the consequences of failure.

The new trend for performance-based design is to consider 2 levels of seismic actions and analyze the situation where the limit of force balance is exceeded for high intensity ground motions, associated with a very rare seismic event. For the design, two basic requirements are defined: (i) Non-collapse requirement (ultimate limit states), i.e. after the occurrence of the seismic event, the structure shall retain its structural integrity, with respect to both vertical and horizontal loads, and adequate residual resistance, although in some parts considerable damage may occur, (ii) Minimization of damage (serviceability limit state), i.e. after seismic actions with high probability of occurrence, during the design life of the structure, some parts can undergo minor damage without the need of immediate repair.

This study evaluates the behavior of a typical earth dam by nonlinear seismic analyses, in two performance levels, named "Base Performance Level" and "Desired Performance Level." The level of seismic action and related acceptance level of damage are defined for each performance level. In "Base Performance Level," with seismic levels of OBE (0.3g) and MDE (0.5g), the structure shall be serviceable and repairable and in "Desired Performance Level", with seismic levels of MDE (0.5g) and MCE (0.7g), the structure shall be serviceable and repairable, respectively. Also, the stability of dam has been assessed by the "Strength Reduction Analysis."

The analyses are nonlinear and the constitutive law of the materials was assumed to follow "Finn" and "Mohr-Coulomb" models, incorporated into "FLAC 2D" finite difference analysis program. The factors such as initial shear modulus, variation of shear modulus versus shear strain, generation and dissipation of pore pressure and hysteretic damping are considered in this study. In addition, using the scaling method of applying maximum acceleration, the response of dam is investigated in different maximum accelerations.

The results show that the dam needs to be changed in geometrical specifications or seismically improved in "Desired Performance Level", in contrast with "Base Performance Level." Results are confirmed by low amount of safety factors of stability in dam, which are calculated for different seismic loads.

Also, the behavior of dam is examined by sensitivity analysis for type of accelerograms, constitutive model and the standard penetration number in shell of dam.

Two accelerograms, including “Friulli” and “Sakaria” are considered. Maximum acceleration and duration of both of them are equalized and frequencies more than 5Hz are filtered. Sensitivity analyses of “Friulli” and “Sakaria” accelerograms, despite the difference in response spectra and specific energy density, show approximately similar results.

“Finn” model predicts the amount of excess pore water pressure to be more than "Mohr-Coulomb" up to %20, and shows the occurring of liquefaction in SPT more than 35 and acceleration more than 0.7g, in shell of upstream of dam.

Keywords: Earth Dam, Based Performance Evaluation, Nonlinear Dynamic Analysis, Finn Model, SRF Analysis