

ارزیابی اثر ساخت سد خاکی بر کاهش پتانسیل روانگرایی پی‌های آبرفتی

حمیدرضا پاسه^۱، محمود یزدانی^{۲*}، رضا مهین روستا^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشگاه زنجان

myazdani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۲۳

چکیده- در این مقاله، اثر ساخت سد خاکی بر روانگرایی پی آبرفتی و همچنین اثر روانگرایی پی بر بدنه سد، در دو شرایط ژئوتکنیکی متفاوت پی بررسی شده است. برای بررسی از نرم‌افزار تفاضل محدود دو بعدی فلک و مدل رفتاری فین استفاده شده و نتایج آن با نتایج ارزیابی دینامیکی سد خاکی مستقر بر پی سنگی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساخت سد در نواحی پی زیر تاج سد، سبب افزایش تنش مؤثر و مدول برشی و کاهش کرنش‌های برشی و فشار آب حفره‌ای شده است. در پایان، بسته به ویژگی‌های ژئوتکنیکی لایه‌های پی آبرفتی، عمق استقرار آن‌ها و تراز شتاب وارد شد. پتانسیل روانگرایی در این نواحی کاهش یافته است. از بین رفتن پتانسیل روانگرایی در لایه‌های آبرفتی با تراکم نسبی ۶۵ تا ۸۰ درصد بیشینه شتاب وارد شده ۰/۳g در پی زیر تاج سد مشاهده شده است؛ ولی ساخت سد بر کاهش پتانسیل روانگرایی پی آبرفتی با تراکم نسبی کمتر از ۶۵ درصد تأثیری نداشته است. میزان افزایش حرکت ورودی سنگ بستر در تاج سد در بازه‌ی شتاب‌های بیشینه ۰/۳g، در پی آبرفتی، پیرامون ۱/۵ برابر پی سنگی بوده است.

کلیدواژگان: روانگرایی، پی آبرفتی، سد خاکی، مدل فین، تحلیل غیر خطی

۱- مقدمه

لایه‌های آبرفتی، سد بر پی سنگی مستقر شود تا با مشکلات آبرفت مانند نشست، نفوذپذیری و روانگرایی هنگام زلزله، روبرو نشود. اگر چه این کار در مورد سدهای بزرگ منطقی است، در سدهای کوچک خاکی به ویژه آن‌ها که در ساختگاه‌های آبرفتی عمیق ساخته می‌شوند، می‌تواند باعث صرف هزینه‌های هنگفت و یا غیراقتصادی شدن و در نتیجه توقف طرح شود. روانگرایی از سال ۱۹۶۴، پس از زلزله‌های

مطالعه پایداری لرزه‌ای، برآورد پتانسیل روانگرایی خاک‌ها طی زلزله، پیش‌بینی خرابی‌های احتمالی سازه‌های مهم روی این خاک‌ها و مطالعه روش‌های کاهش این خطرها، از موضوعات مهم در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای است که، برای کشورهای لرزه‌خیز منافع اقتصادی و ایمنی دارد. در اجرای سدهای خاکی معمولاً سعی می‌شود تا با برداشت

نیگاتای^۱ ژاپن و گودفرایدی^۲ آلاسکا، مورد توجه مهندسیین ژئوتکنیک قرار گرفت و کوشش اولیه برای تفسیر پدیده روانگرایی به وسیله کاساگرانده^۳ انجام شد [۱].

برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی، روش‌های زیادی مانند روش تنش دوره‌ای، کرنش دوره‌ای و روش ارزیابی پاسخ بر پایه‌ی تنش مؤثر تدوین شده است. اولین بار سید و ادريس^۴ در سال ۱۹۷۰، روش تنش دوره‌ای را ارائه دادند که به وسیله آن، خطر روانگرایی با ارائه یک ضریب ایمنی، ارزیابی می‌شد [۲].

در سال‌های نزدیک، این روش به وسیله‌ی سید، بولانژر^۵، ستین^۶، امبراسیس^۷ و غیره بازنگری و آثار شرایط ساختگاه، مانند تنش سربار و شیب خاکریز، در آن وارد شده است [۳].

نگرش جدید در بررسی عددی روانگرایی، استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی با در نظر گرفتن رفتار متقابل هیدرومکانیکی و مدل خاک بر پایه تنش مؤثر است که تولید فشار آب حفره‌ای را در فرایند بارگذاری - باربرداری دوره‌ای شبیه‌سازی کند [۴].

برخی مدل‌های موجود، برای پیش‌بینی رفتار خاک‌های دانه‌ای تحت بارگذاری دوره‌ای، بر اساس مفاهیم نرم‌شوندگی کرنش یا کاهش مدول برشی (فین^۸، ۱۹۷۷)، مدل‌های حالت بحرانی (کارت^۹، ۱۹۸۲)، مدل‌های سطح حدی (دافالیاس و هرمان^{۱۰}، ۱۹۸۲)، مدل‌های الاستیک ویسکو پلاستیک (اوبری^{۱۱}، ۱۹۸۵، بهاشیا و نانتیکسان^{۱۲}،

۱۹۸۷) و مدل ونگ^{۱۳} (۱۹۹۰) طراحی شده است. در این پژوهش، مدل رفتاری فین برای خاک‌های دانه‌ای همراه برنامه ارزیابی تفاضل محدود دویعدی فلک^{۱۴}، نسخه شماره ۵، برای بررسی عددی روانگرایی پی آبرفتی سدهای خاکی تحت بارگذاری دینامیکی و ارزیابی اثر ساخت سد بر روانگرایی پی، از روش غیرخطی استفاده شده است. در نظر گرفتن عواملی مانند مدول برشی در جای اولیه، تغییر مدول برشی با کرنش برشی، ایجاد و از بین رفتن هم‌زمان فشار آب حفره‌ای، تغییرات تنش نرمال متوسط مؤثر، میرایی هیسترتیک و سخت شدن در محاسبه پاسخ لایه‌های ماسه‌ای اشباع، هنگام وقوع زلزله و در نظر گرفتن آثار ساخت، تحلیل شبکه جریان و اعمال زلزله به روش دینامیکی، مبانی و پیش‌فرض‌های این پژوهش است.

۲- مدل رفتاری فین برای تولید فشار آب

حفره‌ای

پاسخ یک لایه ماسه اشباع به زلزله، فرایندی بسیار پیچیده است. اثر اولیه بارگذاری دوره‌ای، تراکم حجمی بازگشت‌ناپذیر 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، فشار سیال، افزایش و تنش مؤثر بین دانه‌ها کاهش می‌یابد. اگر آزمایش در حجم ثابت انجام شود، فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد.

ساز و کار بالا، به وسیله‌ی مارتین^{۱۵} و همکاران (۱۹۷۵) با در نظر گرفتن این امر که رابطه میان کرنش حجمی برگشت‌ناپذیر و دامنه تنش برشی دوره‌ای، جدا از تنش

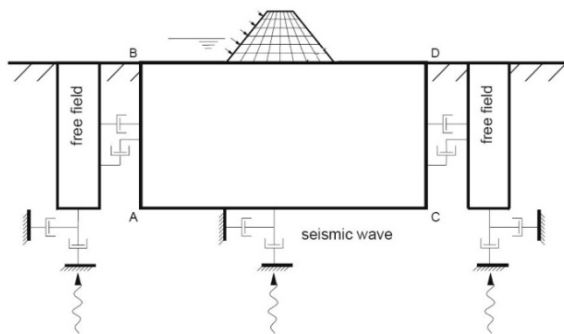
- 1- Nigata
- 2- Good Friday
- 3- Casagrande
- 4- Seed and Idris
- 5- Boulanger
- 6- Cetin
- 7- Ambraseys
- 8- Finn
- 9- Carter
- 10- Dafalias and Herrmann
- 11- Aubry
- 12- Bhatia and Nanthikesan

13- Wang
14- Flac
15- Martin

نرم افزار فلک، شامل مدلی ساختاری به نام مدل فین دارد که هر دو رابطه ۱ و ۳ را با مدل مور- کولمب ترکیب می کند؛ همچنین کاربر می تواند در این مدل، اشکال های مورد نظر را درست کند [۷].

۳- ملاحظات ارزیابی دینامیکی

بارگذاری دینامیکی، شرایط مرزی، میرایی و انتقال موج، وجوه مهم ارزیابی دینامیکی است. بارگذاری دینامیکی، با تاریخچه شتاب، سرعت، تغییر مکان، تنش یا نیرو انجام می شود. روش های عددی، به تقسیم یک ناحیه محدود از فضا وابسته است، شرایط مناسبی نیاز دارد مرزهای عددی ساختگی داشته باشد. در مسائل دینامیکی برای جلوگیری از برگشت امواج منتشرشونده به سمت خارج، پس از برخورد به مرزها، از مرزهای آرام/ میدان آزاد استفاده می شود تا مرزها، ویژگی غیر بازتابنده خود را حفظ کنند. روشی از این نوع، در نرم افزار فلک هم استفاده شده است که شامل اجرای محاسبات میدان آزاد یک بعدی، موازی با ارزیابی شبکه تفاضل محدود اصلی، مانند شکل ۱ است.



شکل (۱) مدل تحلیل لرزه ای سطحی همراه شبکه میدان آزاد

در ارزیابی دینامیکی بر خلاف ارزیابی شبه استاتیکی، میرایی باید از نظر بزرگی و شکل بتواند افت انرژی در سامانه طبیعی را هنگامی که تحت بارگذاری دینامیکی است، را بازتولید کند. در خاک و سنگ، میرایی طبیعی معمولاً

همه جانبه است، با رابطه تجربی ۱ که نمو کاهش حجم $(\Delta\varepsilon_{vd})$ را به دامنه کرنش برشی دوره ای (γ) ارتباط می دهد، بیان شده است [۵]:

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

C_1 تا C_4 ثابت است.

باید توجه شود که در این رابطه، کرنش حجمی برگشت ناپذیر تجمعی (ε_{vd}) به گونه ای است که نمو کرنش حجمی با تجمع کرنش حجمی کاهش می یابد. اگر γ صفر شود، $\Delta\varepsilon_{vd}$ هم باید صفر شود؛ پس رابطه ۲ را ایجاد می شود:

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

رابطه جایگزین و مشابه رابطه فین، به وسیله ی بایرن^۱ (۱۹۹۱) ارائه شده است [۶]:

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

C_1 و C_2 ثابت هایی متفاوت با رابطه ۱ است.

بایرن رابطه ۴ را برای C_1 بر حسب چگالی 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 [۷]:

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

با استفاده از روابط ۴ و ۶، رابطه ۷ به دست می آید:

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

هیستریک است، یعنی مستقل از بسامد کار می‌کند.

نرم‌افزار فلک توانایی وارد کردن این نوع میرایی را در ارزیابی های دینامیکی دارد [۷].

دو پی آبرفتی بررسی شده، مشخص شده است [۸].

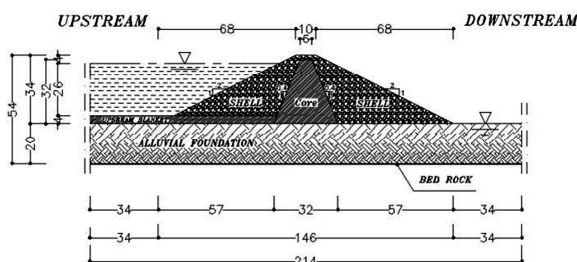
جدول (۱) ویژگی‌های ژئوتکنیکی اجزاء سد خاکی نوعی

اجزاء سد		ویژگی‌ها		
پوسته	هسته	واحد	پارامتر	
۲۲	۲۰/۵	kN/m ³	γ_t	وزن ویژه تر
۲۳	۲۱/۵	kN/m ³	γ_{sat}	وزن ویژه اشباع
۵۰	-	-	N ₁₆₀	عدد SPT
۱۰ ^{-۳}	۱۰ ^{-۱}	cm/s	k	نفوذپذیری
۹/۸	۳۹/۲	kPa	C	چسبندگی
۳۸	۲۵	deg.	ϕ	زاویه اصطکاک

۴- ورودی‌های مدل‌سازی

۴-۱- هندسه مدل

در این پژوهش، یک سد خاکی نوعی به بلندی ۳۴ متر، قرار گرفته بر سه ساختگاه مختلف، دو پی آبرفتی با ویژگی‌های ژئوتکنیکی گوناگون و با ضخامت ۲۰ متر و یک پی سنگی، بررسی شده است. سایر ویژگی‌های هندسی سد و پی آبرفتی در شکل ۲ نشان داده شده است. برای آب‌بند کردن مخزن سد از پوشش نفوذناپذیر در کف مخزن در بالادست استفاده شده است.



شکل (۲) هندسه پایه مدل (ابعاد به متر)

جدول (۲) مدول برشی و بالک اجزاء سد خاکی نوعی

اجزاء سد		عمق (متر)	ویژگی‌ها		پارامتر
پوسته	هسته		واحد	پارامتر	
۱۹۰	۱۱۰	۰-۵	MPa	G _{m0}	مدول برشی اولیه
۲۱۰	۱۲۰	۵-۱۵			
۲۴۰	۱۴۰	۱۵-۲۵			
۴۱۰	۵۲۰	۰-۵	MPa	K	مدول بالک
۴۵۰	۶۰۰	۵-۱۵			
۵۲۰	۷۲۰	۱۵-۲۵			

جدول (۳) ویژگی‌های ژئوتکنیکی پی آبرفتی اول

عمق (متر)			ویژگی‌ها	
۱۵-۲۰	۱۰-۱۵	۵-۱۰	واحد	پارامتر
۲۱	۲۰/۵	۲۰	kN/m ³	وزن ویژه
۲۵	۲۰	۱۵	-	عدد SPT
۷۵	۶۷	۵۸	%	چگالی نسبی
۱۳۰	۱۱۰	۶۲	MPa	مدول برشی اولیه
۱۸۰	۱۶۰	۱۱۰	MPa	مدول برشی (بعد از ساخت) سد
۳۹۰	۳۳۰	۱۹۰	MPa	مدول بالک
۱۰ ^{-۳}	۱۰ ^{-۳}	۱۰ ^{-۳}	cm/s	نفوذپذیری
۰	۰	۰	kPa	چسبندگی
۳۳	۳۱	۲۹	deg.	زاویه اصطکاک
۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۳۰	-	ثابت بایرن، C ₁
۲/۵۶	۱/۹۴	۱/۳۶	-	ثابت بایرن، C ₂

۴-۲- ویژگی‌های ژئوتکنیکی سد و ساختگاه

ویژگی‌های ژئوتکنیکی اجزای سد خاکی و دو پی آبرفتی بررسی شده، با فرض بافت غالب ماسه‌ای و درصد رس ناچیز و پی سنگی در جدول‌های ۱ تا ۵ آمده است. اجرای سد خاکی سبب ایجاد تراکم در پی آبرفتی می‌شود و پارامترهای ژئوتکنیکی، به ویژه مدول برشی مصالح آبرفتی زیر بدنه سد را افزایش می‌دهد. در این پژوهش، اثر ساخت سد خاکی بر مدول برشی اولیه (بیشینه) پی آبرفتی زیر بدنه سد در نظر گرفته شده و در جدول‌های ۳ و ۴، مقادیر مدول برشی اولیه، قبل و بعد از ساخت سد، در عمق‌های مختلف

۴-۳- حرکت ورودی سنگ بستر

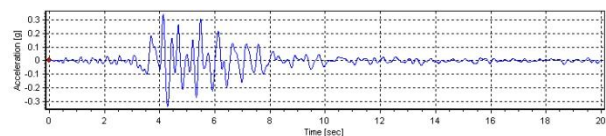
با این فرض که در سطح لرزه‌ای طراحی، شتاب پیشینه زلزله طرح، $0.3g$ باشد، از تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌ای مانند فریولی^۱ که بعد از پالودن کردن چنین شتاب پیشینه‌ای می‌گیرد، مانند شکل ۳، در تحلیل دینامیکی استفاده شده است [۹].

جدول (۴) ویژگی‌های ژئوتکنیکی پی آبرفتی دوم

ویژگی‌ها		عمق (متر)			
پارامتر	واحد	۰-۵	۵-۱۰	۱۰-۱۵	۱۵-۲۰
وزن ویژه	kN/m^3	۲۱/۵	۱۹/۵	۲۱/۵	۲۱/۸۵
عدد SPT	-	۳۰	۱۰	۳۰	۳۵
چگالی نسبی	%	۸۰	۴۷	۸۰	۸۵
مدول برشی اولیه	MPa	۴۰	۶۴	۱۱۳	۱۳۳
مدول برشی (بعد از ساخت) (سد)	MPa	۹۵	۱۱۴	۱۶۴	۱۸۴
مدول بالک	MPa	۱۱۷	۱۹۶	۳۳۸	۴۰۰
نفوذپذیری	cm/s	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
چسبندگی	kPa	۰	۰	۰	۰
زاویه اصطکاک	deg.	۳۵	۲۷	۳۵	۳۶
ثابت بایرن، C_1	-	۰/۱۲	۰/۴۹	۰/۱۲	۰/۱۰
ثابت بایرن، C_2	-	۳/۲۲	۰/۸۲	۳/۲۲	۳/۹۱

جدول (۵) ویژگی‌های پی سنگی

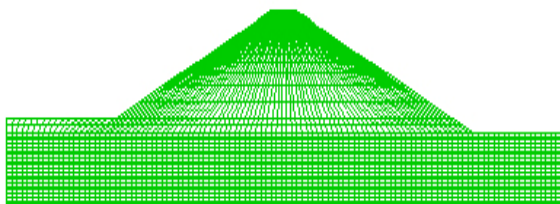
مقدار	واحد	پارامتر	
۲۴	kN/m^3	γ	وزن ویژه
۰/۲	-	n	تخلخل
10^{-8}	cm/s	k	نفوذپذیری
۷,۳۶۰	MPa	G	مدول برشی
۱۲,۳۰۰	MPa	K	مدول بالک
۳,۵۰۰	KPa	C	چسبندگی
۳۳	deg.	ϕ	زاویه اصطکاک



شکل (۳) تاریخچه زمانی درست شده شتاب زلزله فریولی

۵- مراحل مدل سازی سد خاکی و پی

مدل سازی هر یک از ساختگاه‌های بررسی شده، شامل پی آبرفتی اول، دوم و پی سنگی، مرحله به مرحله، شامل تعادل اولیه ساختگاه، ساخت سد خاکی در گام‌های اجرایی، اجرای پوشش نفوذناپذیر در کف مخزن سد، آب‌گیری مخزن و گسترش فشار آب حفره‌ای در پی و بدنه سد خاکی، انجام شده و تعادل هیدرومکانیکی به دست آمده است. پس از ایجاد تعادل هیدرومکانیکی، ساختگاه و سد خاکی نوعی، مطابق شتاب‌نگاشت تعریف شده تحت تحریکات دینامیکی، واقع شده است. با روش مقیاس کردن شتاب پیشینه شتاب‌نگاشت، تحلیل دینامیکی سد خاکی در شتاب‌های پیشینه $0.1g$ تا $0.5g$ انجام و برای شبیه‌سازی تولید فشار آب حفره‌ای، ناشی از تحریکات لرزه‌ای، از نسخه بایرن مدل فین استفاده شده است. شبکه تفاضل محدود مدل، مانند شکل ۴ است.



شکل (۴) شبکه تفاضل محدود ساختگاه آبرفتی و سد خاکی

۶- نتایج تحلیل دینامیکی

۶-۱- تغییر مکان سد خاکی

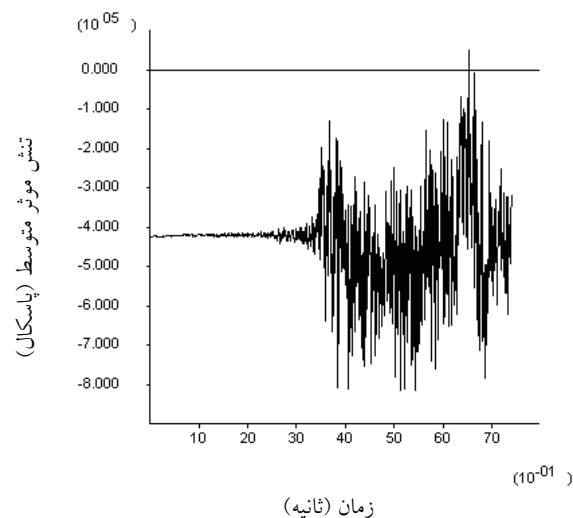
نتایج به دست آمده از ارزیابی دینامیکی غیرخطی سد خاکی نوعی، قرار گرفته بر پی آبرفتی اول، دوم و پی سنگی برای شتاب‌های پیشینه گوناگون، به ترتیب در جدول‌های ۶ تا ۸ و تغییر شکل، تغییر مکان افقی و قائم سد خاکی قرار گرفته بر پی آبرفتی نوع اول برای شتاب $0.5g$ ، به ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۷ دیده می‌شود.



شکل (۷) تغییر مکان قائم (متر) سد قرار گرفته بر پی اول در شتاب $0.5g$

۶-۲- نواحی روانگرا در پی آبرفتی اول و دوم

بر اساس تحلیل تاریخچه زمانی تنش مؤثر متوسط در عمق‌های گوناگون پی‌های آبرفتی اول و دوم، نواحی روانگرا شده، مشخص شده است. برای نمونه، در شکل ۸، در عمق $17/5$ متری از تراز روی پی آبرفتی اول و در نواحی تاج سد، در شتاب $0.3g$ ، تنش مؤثر متوسط، کاهش یافته و در ثانیه ۷ از آغاز زلزله به صفر رسیده و روانگرایی اتفاق افتاده است. شکل (۹) تاریخچه زمانی تنش مؤثر متوسط در همان موقعیت در پی آبرفتی دوم و همان شتاب را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در این موقعیت، روانگرایی اتفاق نیفتاده است.



شکل (۸) تاریخچه زمانی تنش مؤثر متوسط در عمق $17/5$ متری پی

آبرفتی اول

شکل ۱۰ تغییرات تنش برشی برابر کرنش برشی را در عمق $17/5$ متری پی آبرفتی اول، زیر تاج سد، در چرخه اول بارگذاری-

جدول (۶) مقادیر بیشینه تغییر مکان سد خاکی بر پی آبرفتی اول

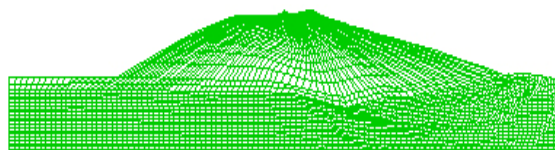
شتاب بیشینه وارد شده					شرح
$0.5g$	$0.4g$	$0.3g$	$0.2g$	$0.1g$	
۱۴	۱۳/۱	۱۲/۶	۱۱/۹	۱۰/۶	فرونشست تاج سد (متر)
۱/۲	۱/۰۹	۱/۰۳	۰/۳۸	۰/۲۹	تغییر مکان شیب خاکریز بالادست (متر)
۲۰/۲	۱۸/۴	۱۷/۱	۱۶/۵	۱۱/۸	تغییر مکان شیب خاکریز پایین دست (متر)

جدول (۷) مقادیر بیشینه تغییر مکان سد خاکی بر پی آبرفتی دوم

شتاب بیشینه وارد شده					شرح
$0.5g$	$0.4g$	$0.3g$	$0.2g$	$0.1g$	
۱۲/۴	۱۲/۲	۱۱/۲	۱۰/۲	۷/۱	فرونشست تاج سد (متر)
۱/۹	۱/۷	۱/۱	۰/۶۷	۰/۲	تغییر مکان شیب خاکریز بالادست (متر)
۱۴/۹	۱۴/۸	۱۳/۴	۱۲/۱	۹/۷	تغییر مکان شیب خاکریز پایین دست (متر)

جدول (۸) مقادیر بیشینه تغییر مکان سد خاکی بر پی سنگی

شتاب بیشینه وارد شده					شرح
$0.5g$	$0.4g$	$0.3g$	$0.2g$	$0.1g$	
۰/۶۵	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۲	۰/۰۱	فرونشست تاج سد (متر)
۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۳	تغییر مکان شیب خاکریز بالادست (متر)
۰/۶۲	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۲۱	۰/۰۴	تغییر مکان شیب خاکریز پایین دست (متر)



شکل (۵) تغییر شکل سد خاکی بر پی آبرفتی اول در شتاب $0.5g$



شکل (۶) تغییر مکان افقی (متر) سد قرار گرفته بر پی اول در شتاب $0.5g$

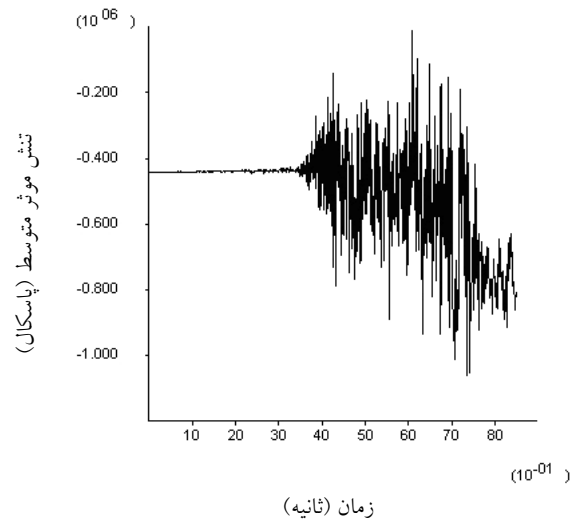
با بررسی جدول ۹ درمی یابیم که در پی آبرفتی اول، از تراز پی تا عمق ۱۰ متری، در مصالح آبرفتی با چگالی نسبی کمتر از ۶۵ درصد ($Dr < 65\%$) در همه شتاب‌های بیشینه وارد شده، روانگرایی اتفاق افتاده و ساخت سد بر اتفاق نیفتادن این پدیده اثری نداشته است. از عمق ۱۰ تا ۱۵ متری، با مصالح آبرفتی با تراکم نسبی ۶۵ درصد تا ۷۰ درصد ($70\% > Dr > 65\%$)، تا شتاب $0.3g$ ، نواحی تاج سد، غیرروانگرا و نواحی بالادست و پایین دست سد، روانگرا و در شتاب بیشتر از $0.3g$ ، همه نواحی پی، روانگرا شده است. این امر اثر ساخت سد بر کاهش پتانسیل روانگرایی نواحی تاج سد، در رده تراکمی و اعماق ویژه‌ای از آبرفت و متناظراً تراز و ویژه‌ای از شتاب وارد شده را نشان می‌دهد.

جدول (۹) وضعیت دو پی آبرفتی مطالعه شده از دیدگاه روانگرایی با شتاب‌های بیشینه گوناگون

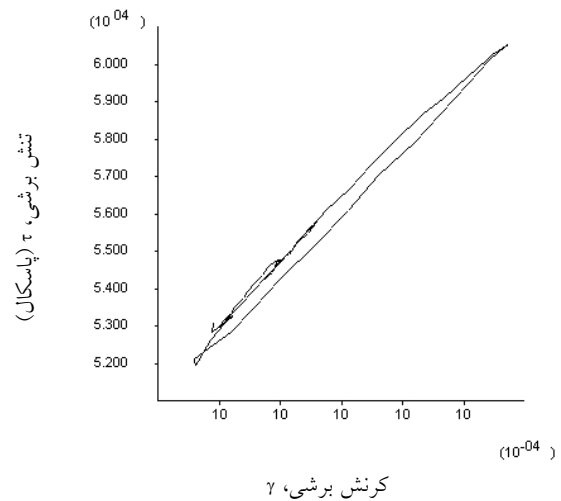
شتاب بیشینه اعمالی									N ₁₆₀	عمق	پی
0.5g			0.3g			0.1g					
پ	ت	ب	پ	ت	ب	پ	ت	ب			
ر	ر	ر	ر	ر	ر	ر	ر	ر	۱۰	۰-۵	اول
ر	ر	ر	ر	ر	ر	ر	ر	ر	۱۵	۵-۱۰	
ر	ر	ر	ر	غ	ر	ر	غ	ر	۲۰	۱۰-۱۵	
ر	غ	ر	غ	غ	غ	غ	غ	غ	۲۵	۱۵-۲۰	
ر	غ	ر	غ	غ	غ	غ	غ	غ	۳۰	۰-۵	دوم
ر	ر	ر	ر	ر	ر	غ	غ	غ	۱۰	۵-۱۰	
غ	غ	غ	غ	غ	غ	غ	غ	غ	۳۰	۱۰-۱۵	
غ	غ	غ	غ	غ	غ	غ	غ	غ	۳۵	۱۵-۲۰	

در پی آبرفتی دوم، هیچ‌یک از نواحی پی تا شتاب $0.1g$ ، حتی لایه سست واقع در عمق ۵ تا ۱۰ متری ($50\% > Dr < 45\%$) روانگرا نشده است. در شتاب $0.3g$ ، لایه سست قرار گرفته در عمق ۵ تا ۱۰ متری ($50\% > Dr < 45\%$) روانگرا شده و ساخت سد اثری بر این رده تراکمی آبرفت نداشته است. در شتاب $0.5g$ ، در نواحی بالادست و

باربرداری ارزیابی دینامیکی با شتاب $0.3g$ نشان می‌دهد.



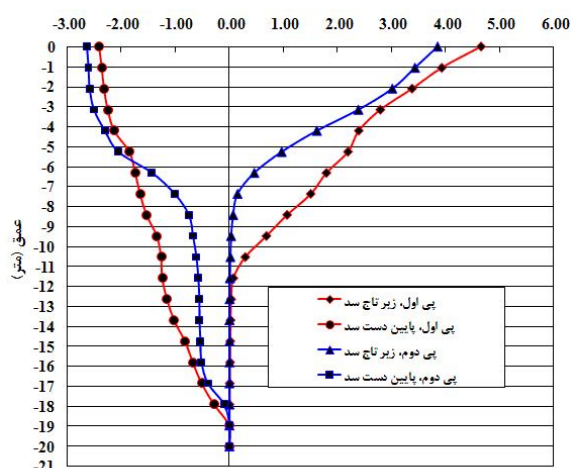
شکل (۹) تاریخچه زمانی تنش مؤثر متوسط در عمق ۱۷/۵ متری پی آبرفتی دوم



شکل (۱۰) تنش برشی - کرنش برشی در چرخه اول بارگذاری -

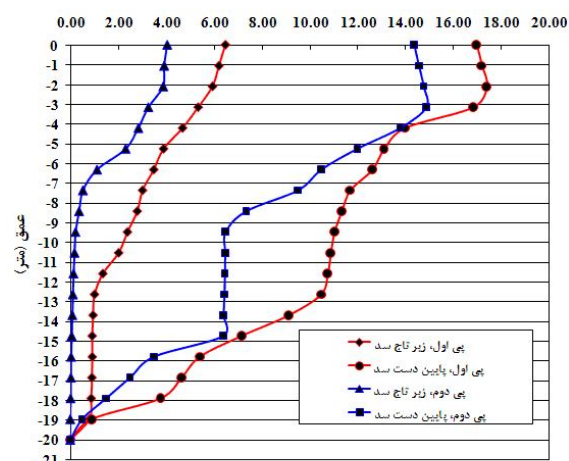
باربرداری در عمق ۱۷/۵ متری پی آبرفتی اول

وضعیت روانگرایی دو پی آبرفتی بررسی شده در نواحی بالادست، تاج و پایین دست سد که به ترتیب با شاخص "ب"، "ت" و "پ" مشخص شده، در شتاب‌های بیشینه گوناگون، در جدول ۹ با نمادهای "ر" (روانگرا) و "غ" (غیرروانگرا) نشان داده شده است.



تغییر مکان قائم (متر)

شکل (۱۳) تغییر مکان قائم پی‌های آبرفتی در شتاب $0.3g$



تغییر مکان افقی (متر)

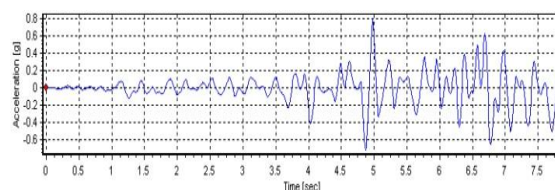
شکل (۱۴) تغییر مکان افقی پی‌های آبرفتی در شتاب $0.3g$

بر اساس شکل‌های ۱۳ و ۱۴، نشست در پی آبرفتی اول در نواحی تاج سد و بالادگی آن در نواحی خاکریز پایین دست سد، تا عمق ۱۵ متر و در پی آبرفتی دوم تا عمق ۱۰ متر را در بر می‌گیرد. در هر دو پی آبرفتی بررسی شده، بیشترین تغییر مکان افقی در نواحی پایین دست اتفاق افتاده است. تغییر مکان افقی پی آبرفتی اول در نواحی زیر تاج سد مربوط به عمق تا ۱۵ متر و پی آبرفتی دوم تا عمق ۱۰ متر است.

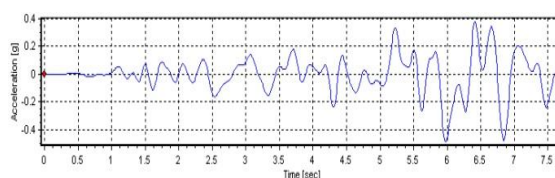
پایین دست سد، تا عمق ۱۰ متری و در نواحی تاج سد، تنها لایه سست عمق ۵ تا ۱۰ متری، روانگرا شده است. این امر اثر ساخت سد بر کاهش پتانسیل روانگرایی پی آبرفتی بارده تراکمی ۶۵ تا ۸۰ درصد را ($80\% < Dr < 65\%$) نشان می‌دهد.

۳-۶ بررسی آثار ساختگاه بر شتاب وارد شده به سنگ بستر

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، به ترتیب، تاریخچه زمانی شتاب در تاج سد خاکی قرار گرفته بر پی آبرفتی اول و پی سنگی، ارائه شده است. شتاب بیشینه وارد شده بر سنگ بستر $0.3g$ ، در تراز پی آبرفتی به $0.66g$ و در تاج سد به $0.81g$ افزایش یافته است. میزان این افزایش در تاج سد قرار گرفته بر پی سنگی، $0.48g$ بوده است.



شکل (۱۱) تاریخچه زمانی شتاب در تاج سد، قرار گرفته روی پی آبرفتی



شکل (۱۲) تاریخچه زمانی شتاب در تاج سد، قرار گرفته روی پی سنگی

۴-۶ بررسی تغییر مکان ایجاد شده در پی‌های آبرفتی

تغییر مکان‌های افقی و قائم دو پی آبرفتی مطالعه شده در اعماق گوناگون، در نواحی تاج و گوشه خاکریز پایین دست سد خاکی و در شتاب بیشینه $0.3g$ در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ دیده می‌شود.

۷- نتیجه گیری

۸- مراجع

- [1] Kramer, S.L., (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
- [2] Idriss, I.M. and Boulanger, R.W, I.M., (2004), "Semi-Empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes," Proceedings 11th ICSDEE and 3rd ICEGE.
- [3] Boulanger, R.W., and Idriss, I.M., (2004), "State Normalization of Penetration Resistance and the Effect of Overburden Stress on Liquefaction Resistance," Proceedings 11th SDEE and 3rd ICEGE, Uni of California, Berkeley, CA.
- [4] Wang, Z.L. and Makdisi, F.I., (2004), "Practical Applications of a Nonlinear Approach to Analysis of Earthquake-Induced Liquefaction and Deformation of Earth Structure," Geomatrix Consultants.
- [5] 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.
- [6] 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, 47-55.
- [7] Manual of FLAC, Ver.5.0, (2005), "Dynamic Analysis," Itasca Consulting Group Inc.
- [8] Das, Braja M., (1992), Principles of Soil Dynamics, Southern Illinois University at Carbondale, USA, 1992.
- [9] Seismo Signal Software, Ver.3.2.0, (2007) Seismosoft co., <http://www.seismosoft.com>.

ساخت سد، بسته به ویژگی‌های ژئوتکنیکی، و عمق استقرار لایه‌های آبرفتی و تراز شتاب وارد شده، به خاطر ایجاد سربار ماندگار، سبب افزایش تراکم نسبی، تنش مؤثر و مدول برشی و کاهش متناظر کرنش‌های برشی و در نتیجه فشار آب حفره‌ای می‌شود. این فرایند، باعث کاهش یا از بین رفتن پتانسیل روانگرایی در برخی نقاط پی آبرفتی می‌شود. هرچه به گوشه‌های خاکنیز بالادست و پایین‌دست سد نزدیک می‌شویم، این تأثیر ناچیز می‌شود. در پژوهش انجام‌شده، ایجاد سربار ناشی از ساخت سد مطالعه شده، با ارتفاع مشخص، در کاهش پتانسیل روانگرایی مصالح آبرفتی ماسه‌ای با تراکم ۶۵ تا ۸۰ درصد، مؤثر و در مصالح آبرفتی ماسه‌ای با تراکم کمتر از ۶۵ درصد، غیرمؤثر بوده است.

با وجود کاهش یا از بین رفتن پتانسیل روانگرایی در برخی نقاط پی آبرفتی، تغییر مکان افقی و قائم سد خاکی قرار گرفته بر هر دو نوع پی آبرفتی در همه‌ی شتاب‌های پیشینه وارد شده در مقایسه با پی سنگی، بسیار زیاد ارزیابی می‌شود؛ بنابراین پایداری کلی سد در شرایط وقوع زلزله به خطر می‌افتد. دلایل تغییر مکان زیاد سد خاکی قرار گرفته بر پی آبرفتی، سختی برشی کم پی آبرفتی، وقوع روانگرایی در بالادست و پایین‌دست سد و افزایش بیشتر حرکت ورودی سنگ بستر در پی آبرفتی در مقایسه با پی سنگی است.

با توجه به نتایج به دست آمده، برای حفظ پایداری سد هنگام وقوع زلزله، برداشتن پی آبرفتی بر پایه‌ی روش متداول ضروری است؛ مگر آن‌که با انجام بررسی‌های جامع عددی و فیزیکی، روش‌های مؤثری برای اصلاح و بهبود پی آبرفتی در حفظ پایداری سد، شناسایی شود. این روش‌ها باید افزون بر دیدگاه‌های فنی از دیدگاه هزینه و سرعت اجرا، هم شرایط مناسب‌تری را نسبت به راه‌کار برداشتن پی‌های عمیق آبرفتی در سدهای کوچک خاکی، ایجاد کند.