

تحلیل عددی رفتار یک سد خاکی با هسته مایل و مقایسه با رفتار سد با فرض هسته قائم

امیر حسین کاربر^۱ و عباس سروش^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتی امیر کبیر

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۲/۱۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۱۰/۱، تاریخ تصویب ۸۹/۱۱/۲۶)

چکیده

در این مقاله رفتار استاتیکی و لرزه‌ای یک سد خاکی (سد بیدواز) با هسته رسی مایل در پایان ساخت مورد بررسی و تحلیل عددی قرار می‌گیرد. تحلیل‌های عددی برای همان سد، ولی با فرض هسته قائم، تکرار شده است. مقایسه بین رفتار سد با هسته مایل و سد فرضی با هسته قائم در هر دو حالت قبل و بعد از زلزله انجام شده است. نتایج تحلیل به صورت مقایسه تغییر شکل‌ها، به ویژه در هسته سد ارائه خواهد شد. در مدل‌سازی عددی از مدل الاستوپلاستیک موهر-کولمب برای مصالح پوسته و هسته و از مدل الاستیک برای مصالح پی استفاده شده است. در این تحقیق با توجه به مطالعات لرزه‌خیزی انجام‌شده و انتخاب شتاب‌نگاشت مناسب، به ارزیابی و مقایسه تغییر شکل‌های دینامیکی سد با هسته رسی مایل و هسته رسی قائم پرداخته شده است. از نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی می‌توان به بیشتر بودن مقادیر تغییر شکل و تنش در سد با هسته مایل در مقایسه با هسته قائم و فشار آب حفره‌ای در سد با هسته قائم در مقایسه با هسته مایل اشاره کرد. آنالیزهای حساسیت انجام‌شده برای زلزله با شتاب‌های متفاوت نشان از ایجاد تغییر شکل‌های زیاد و تمایل بیشتر به ناپایداری در سد با هسته مایل نسبت به سد با هسته قائم دارد.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی، هسته رسی مایل، هسته رسی قائم، تحلیل دینامیکی

مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون تعداد سدهای خاکی و ارتفاع آن‌ها در کشور، اطمینان از عملکرد آنها در شرایط مختلف بارگذاری به‌ویژه بار زلزله، موضوعی حیاتی محسوب می‌شود. تا کنون در زمینه بررسی رفتار دینامیکی سدهای خاکی تحت اثر زلزله، تحقیقات گسترده‌ای انجام شده و روش‌هایی نیز در این مورد پیشنهاد شده است. به طور کلی می‌توان روش‌های موجود را به دو دسته تقسیم کرد:

روش‌های تحلیل پایداری و روش‌های تحلیل پاسخ

روش شبه‌استاتیکی و روش سید و مارتین از روش‌های آنالیز پایداری هستند. با استفاده از این روش‌ها می‌توان ضریب اطمینان در برابر لغزش را محاسبه کرد. روش‌های تیر برشی، جای‌کریشنا (۱۹۶۲)، نیومارک (۱۹۶۵)، سید و گودمن (۱۹۶۶)، مدل گوه برشی یک بعدی و سه بعدی نیز روش‌هایی هستند که برای تعیین پاسخ دینامیکی سازه‌های خاکی از جمله تغییر شکل، سرعت و دوره تناوب

استفاده می‌شوند [۱،۴]. ساده‌ترین شکل معادلات آنالیز دینامیکی برای یک ماده الاستیک، توسط زینکوویچ در سال ۱۹۷۷ و نیلور در سال ۱۹۷۵ ارائه شد. اما با توجه به غیرالاستیک بودن رفتار خاک، حتی در کرنش‌های کوچک باید معادلات دینامیکی اصلاح می‌شد. به موازات پیشرفت‌های انجام‌شده در حل معادلات دینامیکی و روش‌های عددی، مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تری برای خاک‌ها ارائه شد که قادر به پیش‌بینی رفتار دینامیکی و غیرخطی بودند [۵،۶،۷]. امروزه در روش‌های تحلیل دینامیکی از روش‌های حل عددی استفاده می‌شود که در این روش‌ها با استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته می‌توان معادلات پیچیده مربوط به مسائل اندرکنش آب و قسمت جامد خاک را با دقت زیادی تحلیل کرد [۸]. برای تعریف حرکت ورودی زمین نیز می‌توان از طیف‌های شتاب موجود برای زلزله‌های مورد نظر، عیناً در تحلیل سدها استفاده کرد. مهم‌ترین حسن روش‌های عددی، ارائه میدان‌های تنش و تغییر مکان در هر قسمت و المانی از

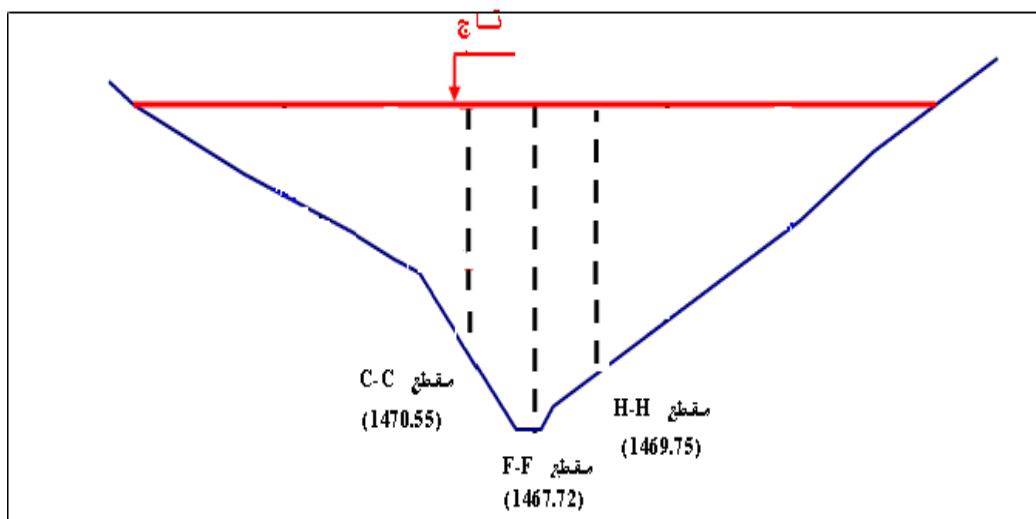
اسفراین ساخته شده است. سد از نوع خاکی با هسته رسی مایل و به ارتفاع حداکثر ۶۷ متر است. طول تاج سد ۱۰۴ متر و عرض تاج ۱۱ متر است. سد در دره تنگ و بر پی آبرفتی درشت دانه بسیار متراکم با ضخامت حداکثر ۲۳ متر واقع شده و آببندی پی آبرفتی توسط یک دیوار آببند بتن پلاستیک انجام می‌گیرد. حجم مخزن سد ۵۳ میلیون متر مکعب و تراز تاج سد ۱۵۳۴+ و تراز نرمال ۱۵۳۰+ است. مقطع شماتیک طولی و بلندترین مقطع عرضی سد بیدواز به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲-الف) نشان داده شده است. موقعیت ابزارهای نصب‌شده در بزرگ‌ترین مقطع سد (مقطع F-F) در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. شکل (۱) همچنین موقعیت مقاطع ابزارگذاری شده را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده روی مصالح هسته و پوسته، شامل دانه‌بندی، برش‌مستقیم، تک محوری، سه محوری و تراکم، در مدل‌سازی سد مورد استفاده قرار گرفته است. در ضمن برخی از نتایج قرائت شده از ابزار دقیق نیز در زمان ساخت و پایان ساخت سد در دسترس بوده که در تحلیل عددی برگشتی و تدقیق عوامل ورودی به کار رفته است. تدقیق عوامل ورودی با استفاده از قضاوت مهندسی و مقایسه نتایج حاصل از آنالیزهای عددی اولیه با مقادیر قرائت شده از ابزار دقیق انجام گرفته است.

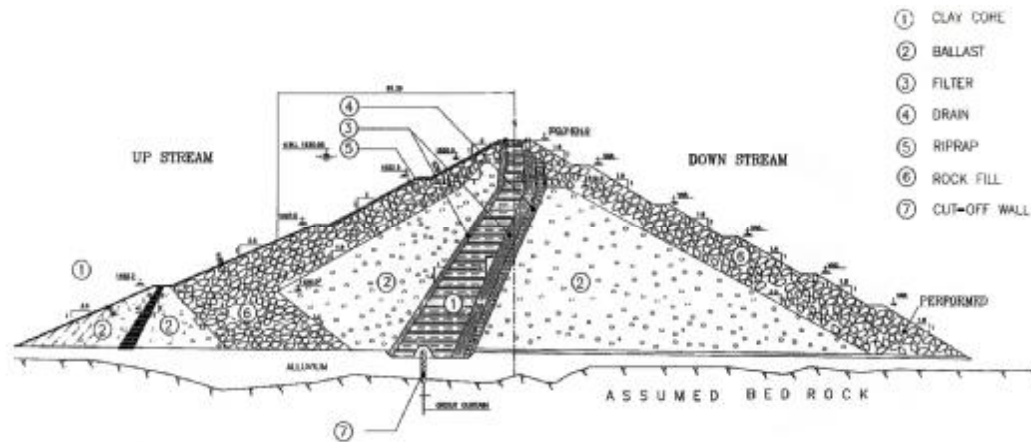
مدل است. مزیت دیگر روش‌های دینامیکی عددی، پیش‌بینی تغییرات فشار آب حفره‌ای طی سیکل‌های بارگذاری نامنظم زلزله است که در پیش‌بینی پدیده روان‌گرایی در سدها بسیار مؤثر خواهد بود. در رابطه با رفتارسنجی سدهای خاکی با هسته رسی قائم، مطالعات بسیاری با استفاده از تحلیل عددی توسط محققانی همچون Seed, Gazetas & Dakoulas، و Elgamal et al. انجام گرفته است [۱۱ و ۱۰ و ۹]، ولی پژوهش‌های کمی در رابطه با رفتار سدهای خاکی با هسته رسی مایل انجام گرفته است؛ از جمله بررسی‌های انجام شده در حوزه تحلیل دینامیکی سدهای خاکی با هسته مایل می‌توان به تحلیل عددی سدهایی همچون Marlin در گواتمالا [۱۲] یا Alamo در آمریکا [۱۳] اشاره کرد. بررسی رفتار این نوع سدها، با توجه به اینکه قسمت عمده‌ای از هسته در بالادست سد قرار می‌گیرد و با توجه به کم بودن نسبی ارتفاع خاکریز روی هسته، از نقطه نظر بررسی تغییرشکل‌ها و پایداری سد و فرسایش در کف هسته حائز اهمیت است. لازم به ذکر است که تعداد سدهای خاکی با هسته رسی قائم به مراتب بیشتر از سدهای خاکی با هسته رسی مایل است.

مشخصات سد بیدواز

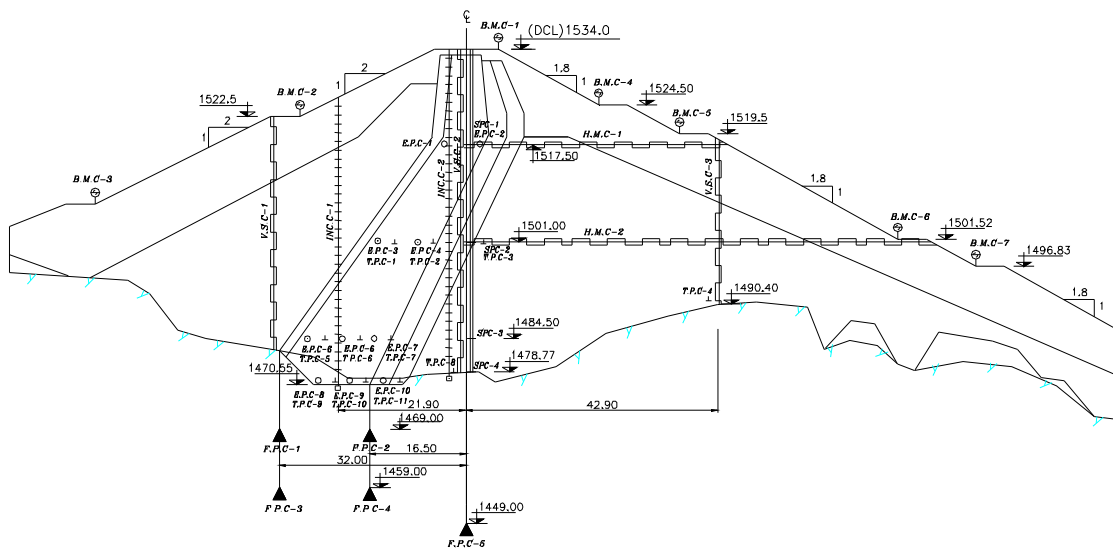
سد مخزنی بیدواز با هدف کنترل سیلاب و تنظیم آبدهی رودخانه بیدواز در ۲۰ کیلومتری شمال شرق شهر



شکل ۱: مقطع شماتیک طولی سد بیدواز و مقاطع ابزارگذاری شده.



شکل ۲- الف : بلندترین مقطع عرضی سد بیدواز (مقطع F-F).



شکل ۲- ب : موقعیت ابزارهای نصب شده در بدنه سد بیدواز (مقطع F-F).

مراحل کلی تحلیل عددی

در این بخش روند و نتایج تحلیل عددی سد خاکی بیدواز برای بارگذاری‌های ساخت سد و زلزله معرفی می‌شود. علاوه بر این، در هر دو بارگذاری به منظور ارزیابی عددی و مقایسه کلی بین رفتار و عملکرد دو سد با یک سری خواص و عوامل مشترک، یک بار هم فرض شده که هسته سد به طور قائم (با حجم هسته و عرض در تاج یکسان با سد با هسته مایل) باشد. با توجه به اینکه اطلاعات ابزار دقیق تنها در زمان ساخت و پایان ساخت در دسترس بود، بنابراین تحلیل در دوران ساخت و پایان آن انجام شده و شرایط آگیری و تراوش پایدار مدل نشده است. برای بارگذاری ساخت سد، تحلیل با استفاده از

عوامل مکانیکی مؤثر مصالح سد و همراه با محاسبه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در طول ساخت در هسته انجام شده است. هسته سد به صورت اشباع کامل و بارگذاری ناشی از ساخت لایه‌های سد (در هسته) به صورت زهکشی نشده و بدون تحکیم در طول ساخت فرض شده است. از نتایج ابزار دقیق، برای تدقیق عوامل مصالح استفاده شده است. قابل ذکر است که تحلیل‌های عددی استاتیکی و دینامیکی برای بلندترین مقطع سد (F-F) و به صورت دویبعدی کرنش مسطح انجام شده است. پس از انجام تحلیل عددی استاتیکی (در طول و پایان ساخت)، تحلیل دینامیکی برای بارگذاری زلزله، با در نظر گرفتن عواملی نظیر در تحلیل استاتیکی و همچنین عوامل دینامیکی، انجام شده و نتایج در دو حالت (۱) سد با هسته مایل و

صفر شد و ساخت سد به صورت اضافه کردن ۲۶ لایه مجزا، هر لایه به ضخامت ۲/۵ متر، شبیه‌سازی شد. عوامل مصالح سد و پی که به تحلیل عددی معرفی شدند، در جدول (۲) ارائه شده است. همان گونه که گفته شد با انجام آنالیز برگشتی و آنالیز حساسیت، عوامل بالا که مقادیر اولیه آنها از گزارش‌های طراحی سد به دست آمده بود (مندرج در جدول ۱)، تدقیق شد. در آنالیز برگشتی، به طور طبیعی از مقادیر نشست‌ها و فشار آب حفره‌ای قرائت شده از ابزار نصب شده در هسته (مقطع F-F) استفاده شد.

نتایج

شکل‌های (۴) و (۵) و (۶) به ترتیب کانتورهای تغییر شکل قائم، تغییر شکل افقی و فشار آب حفره‌ای در پایان ساخت برای سد بیدواز و نیز برای همین سد با فرض هسته قائم را نشان می‌دهد. برخی از مقادیر محاسبه شده در جدول (۳) ارائه و مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که تغییر مکان‌های قائم و افقی حداکثر در سد با هسته مایل بیشتر است؛ ولی مقادیر حداکثر فشار آب حفره‌ای اضافی و تنش کل در مرکز هسته در سد با هسته قائم بیشتر است. شکل‌های (۷) و (۸) مقادیر نشست‌های محاسبه شده و قرائت شده از ابزار را به ترتیب برای ابزارهای INCF-2 و INCC-1 نشان می‌دهد. قابل ذکر است که ابزار- INCF-1 در مقطع F-F از کار افتاده بود؛ برای مقایسه از ابزار مشابه آن در مقطع C-C استفاده شده است. شکل (۸) نشان می‌دهد که روند کلی نشست‌های حاصل از تحلیل عددی و ابزار با یکدیگر مطابقت دارد. بیشتر بودن مقادیر محاسباتی بدین دلیل است که ارتفاع مقطع F-F از مقطع C-C بیشتر است (شکل ۱). همچنین شکل (۷) نیز تطابق خوبی را بین نشست‌های محاسباتی و ابزار دقیق INCF-2 نشان می‌دهد.

(۲) سد با فرض هسته قائم با یکدیگر مقایسه شده است. در تحلیل دینامیکی از شتاب‌نگاشت افقی زلزله طیس استفاده شده است. مبنای این انتخاب در دسترس بودن این شتاب‌نگاشت و همچنین مشابه بودن خطر لرزه‌ای طیس و اسفراین در پهنه‌بندی لرزه‌ای آیین نامه ۲۸۰۰ است. نرم‌افزار FLAC که مبتنی بر روش عددی تفاوت‌های محدود است برای همه تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) به ترتیب شبکه المان‌های مورد استفاده برای تحلیل سد بیدواز و همچنین سد با فرض هسته قائم را نشان می‌دهد. در این شبکه، نواحی مختلف بدنه سد، شامل فرازبند، پوسته، هسته، فیلتر و بخشی از پی سد (۳۳ متر در عمق و ۱۰۰ متر در جناحین) مدل شده‌است. المان‌ها اغلب چهاروجهی بوده که ابعاد آنها در هسته بسیار کوچک‌تر منظور شده است. برای مصالح بدنه سد از مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر-کولمب با قانون جریان غیرهمبسته^۱ و برای مصالح پی از مدل الاستیک خطی استفاده شده است.



شکل ۳-الف: شبکه المان‌ها برای سد با هسته مایل.



شکل ۳-ب: شبکه‌ی المان‌ها برای سد با هسته قائم.

تحلیل زمان و پایان ساخت

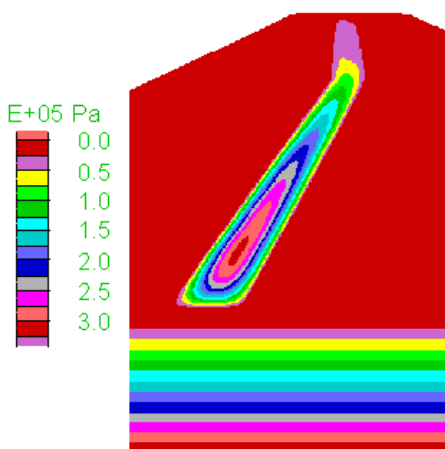
ابتدا با غیرفعال کردن المان‌های بدنه سد، تنش‌های برجا در پی قبل از شروع ساخت سد محاسبه شد. پی به صورت اشباع و با شرایط بارگذاری زهکشی شده فرض شد. سپس تغییر شکل‌های ایجاد شده در پی

جدول ۱: عوامل ژئومکانیکی مصالح درشت دانه و ریزدانه (استخراج شده از گزارش‌های طراحی سد).

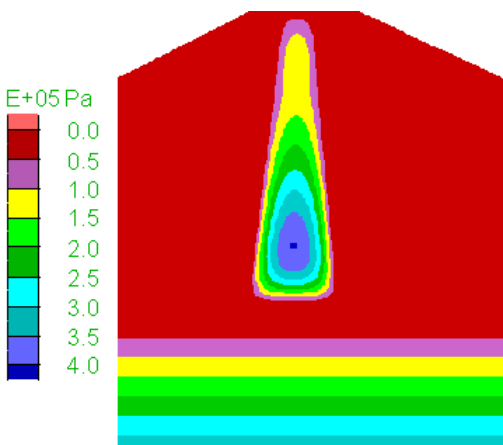
نوع مصالح	γ_d (kN/m ³)	$\omega_{natural}$	c (kPa)	ϕ (°)	درصد تراکم
ریز دانه (هسته)	۱/۷۶	۱۷/۶	۵۱	۱۲/۷	۹۸
درشت دانه (پوسته)	۱/۹۳	۱۲	۳۰	۳۹/۳	۸۴

جدول ۲: عوامل مصالح بدنه و پی سد بیدواز، مورد استفاده در تحلیل عددی.

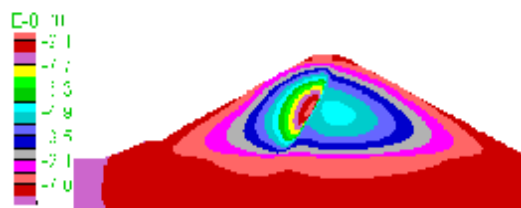
مدل رفتاری	Ψ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	ν	E (MPa)	k (cm/s)	γ (kN/m ³)	نوع مصالح
موهر-کولمب	۰	۴۷	۱۸	۰/۳۵	۱۷	۱e-۹	۱۷/۶۰	هسته
موهر-کولمب	۱۰	۰	۴۰	۰/۳	۳۴/۵	-	۲۱	پوسته
موهر-کولمب	۵	۰	۳۵	۰/۲۷	۲۴	-	۱۹	فیلتر
موهر-کولمب	۴	۰	۳۴	۰/۲۷	۲۶/۵	-	۱۹	زهکش
موهر-کولمب	۱۰	۰	۴۲	۰/۳	۳۵/۵	-	۲۱	سنگریزه
الاستیک	-	-	-	۰/۳	۲۰۰	۱e-۳	۲۰	پی آبرفتی
الاستیک	-	-	-	۰/۲۵	۱۶۰۰۰	تقریباً نفوذ ناپذیر	۲۲/۵	سنگ بستر



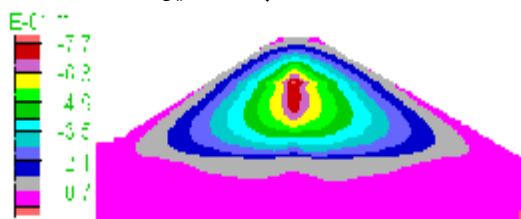
شکل ۶- الف: کنتورهای فشار آب حفره‌ای در هسته در پایان ساخت - سد با هسته مایل.



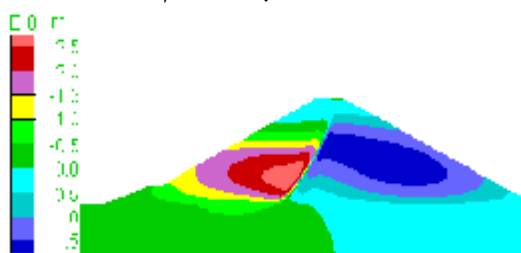
شکل ۶- ب: کنتورهای فشار آب حفره‌ای در هسته در پایان ساخت - سد با هسته قائم.



شکل ۴- الف: کنتورهای تنش در پایان ساخت - سد با هسته مایل.



شکل ۴- ب: کنتورهای تنش در پایان ساخت - سد با هسته قائم.



شکل ۵- الف: کنتورهای تغییر مکان افقی در پایان ساخت - سد با هسته مایل.



شکل ۵- ب: کنتورهای تغییر مکان افقی در پایان ساخت - سد با هسته قائم.

در شکل (۹) تغییرات فشار آب حفره‌ای در کف هسته در طول زمان ساخت، به دست آمده از تحلیل عددی مقطع F-F، با مقادیر قرائت‌شده از پیزومترهای الکتریکی در کف هسته در مقاطع C-C و H-H مقایسه

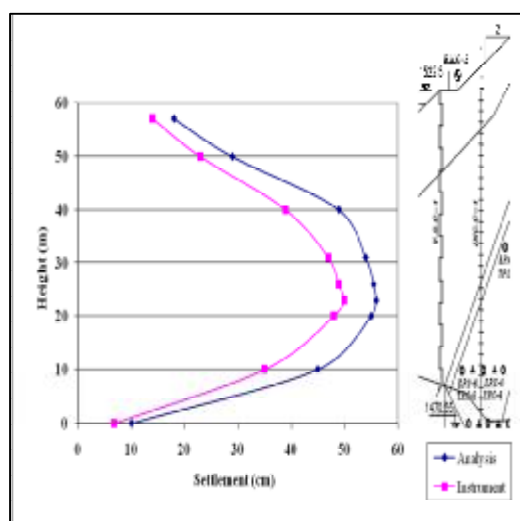
شده است که همه بدنه سد (هسته و پوسته) به طور همزمان و لایه به لایه ساخته شده است، در صورتی که در سد با هسته مایل در عمل، ابتدا بخش عمده‌ای از پوسته بالادست ساخته می‌شود و بعد هسته و در نهایت پوسته بالادست اجرا می‌شود. با در نظر گرفتن این موضوع، مقادیر قوس‌زدگی نیز در سد با هسته مایل کمتر از قوس‌زدگی در سد با هسته قائم می‌بود. نتیجه دیگری که از مقایسه نتایج محاسباتی سد با هسته مایل و سد با هسته قائم به دست می‌آید، این است که مقادیر تنش برشی در فیلتر بالادست، به ویژه در ترازهای پایین بدنه، در سد با هسته مایل به مراتب بیشتر از مقادیر مشابه در سد با هسته قائم است. توجه به این موضوع از نقطه نظر ارزیابی پایداری شیب بالادست در سد با هسته مایل اهمیت دارد.

شده است. در این مورد نیز، پیژومتر EPF-8 از کار افتاده بود و در نتیجه مقاطع C-C و H-H برای مقایسه انتخاب شد. ملاحظه می‌شود که روند کلی مقادیر محاسبه شده با مقادیر قرائت شده تطابق دارد. همان گونه که انتظار می‌رود (مقطع F-F) است، اکثراً از مقادیر قرائت شده مربوط به مقاطع C-C و H-H بیشتر است.

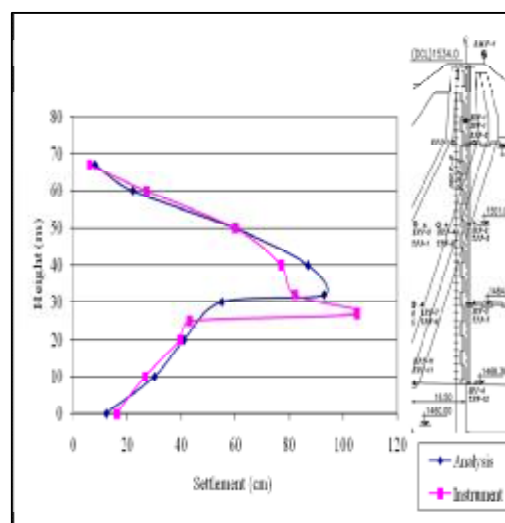
شکل (۱۰) تنش مؤثر قائم حاصل از تحلیل عددی برای مرکز هسته و دو نقطه واقع در بالادست و پایین دست هسته، برای سه تراز مختلف در هر دو سد با هسته مایل و قائم را نشان می‌دهد. این شکل اثر قوس‌زدگی در هسته را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌شود که اثر قوس‌زدگی در تراز کف هسته در سد با هسته مایل بیشتر از سد با هسته قائم است. به نظر می‌رسد که اختلاف موجود به این علت است که در مدلسازی این سد فرض

جدول ۳: خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از تحلیل عددی پایان ساخت سد.

تنش قائم کل در مرکز هسته در تراز کف هسته (kPa)	تغییر مکان افقی (موقعیت) (cm)	اضافه فشار آب حفره‌ای (kPa) (موقعیت نسبت به کف هسته، m)	نشست حداکثر (cm) (موقعیت نسبت به کف هسته، m)	نوع سد
۷۵۶	۲۵ (پوسته بالادست)	۳۰۰ (۱۵ مرکز هسته)	۹۳ (۳۰ نزدیک به فیلتر پایین دست)	سد با هسته مایل
۸۷۰	۱۵ (پوسته پایین دست)	۴۱۰ (۲۲/۵ مرکز هسته)	۷۷ (۴۰ مرکز هسته)	سد با هسته قائم



شکل ۸: مقایسه نشست حاصل از تحلیل عددی و ابزار INCC-1 در سد بیدواز.



شکل ۷: مقایسه نشست حاصل از تحلیل عددی و ابزار INCF-2 در سد بیدواز.

مرزهای سازگار (یا زمین آزاد) که یکی از شرایط مرزی موجود در نرم افزار FLAC و مناسب برای بارگذاری دینامیکی است، استفاده می شود.

برای تخمین عوامل دینامیکی مصالح بدنه سد و پی، با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات واقعی، از روابط و نمودارهای تجربی استفاده شد. برای تخمین و محاسبه سرعت موج برشی از عامل حداکثر مدول برشی G_{max} و بر اساس روابط زیر استفاده شد [۳ و ۶]:

$$G_{max} = \frac{625}{(0.3 + 0.7e^2)} (Pa)^{0.5} (OCR)^n (\sigma'_m)^{0.5} \quad (1)$$

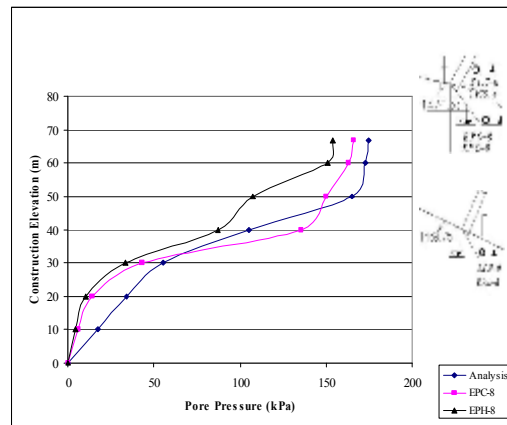
$$G_{max} = \frac{\gamma}{g} v_s^2 \quad (2)$$

در روابط بالا، Pa فشار اتمسفر و σ'_m میانگین تنش های مؤثر در هر نقطه و e تخلخل مصالح هسته و OCR نسبت پیش تحکیمی خاک رس است.

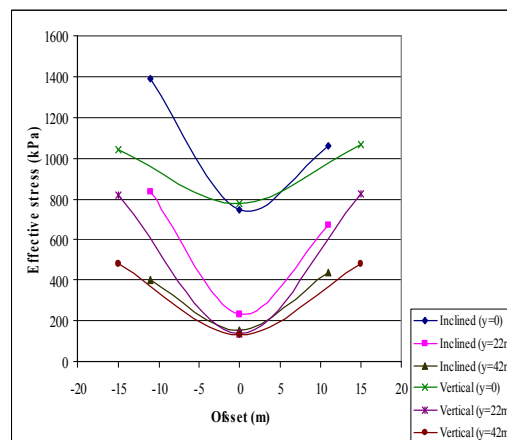
جدول (۴) مقادیر محاسبه شده سرعت موج برشی برای مصالح سد و پی را نشان می دهد. همچنین ضریب میرایی رایلی ۲ درصد برای استهلاک انرژی برای همه مصالح سد در نظر گرفته شد. مقادیر سایر عوامل مورد نیاز، مشابه مقادیر به کار رفته در تحلیل های استاتیکی منظور شد (جدول ۱). برای بار زلزله، تاریخچه شتاب افقی زلزله طبس (۱۹۷۸) که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، مورد نظر قرار گرفت. حداکثر شتاب افقی این زلزله $0.9g$ بوده که مقدار کم سابقه ای است. همچنین برای حساسیت سنجی، تحلیل عددی برای همین شتاب نگاشت، ولی تعدیل شده برای شتاب های حداکثر $0.4g$ و $0.7g$ و $0.8g$ تکرار شد. با توجه به ابعاد المان ها (شکل ۳) و برای اینکه فرکانس های اضافی وارد محاسبات نشوند، شتاب نگاشت زلزله طبس به فرکانس حداکثر ۱۵ هرتز فیلتر شد. شکل (۱۲) شتاب نگاشت زلزله طبس که برای فرکانس ماکزیمم ۱۵ هرتز فیلتر شده و شتاب حداکثر آن به $0.4g$ کاهش داده شده است را نشان می دهد.

جدول ۴: سرعت موج برشی در نظر گرفته شده برای مصالح.

نوع مصالح	هسته	پوسته و سنگریزه	فیلتر و زهکش	پی آبرفتی
سرعت موج برشی ($\frac{m}{s}$)	۱۷۰	۳۴۰	۲۶۰	۵۰۰



شکل ۹: تغییرات فشار آب حفره ای در کف هسته در طول زمان ساخت سد- مقایسه بین مقادیر محاسباتی و مقادیر ابزار دقیق.



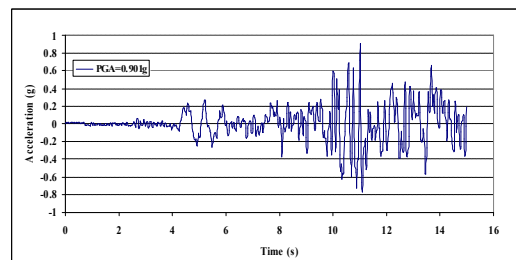
شکل ۱۰: تغییرات تنش مؤثر قائم در عرض هسته در سه تراز مختلف - مقایسه بین سد با هسته مایل و سد با هسته قائم (y ارتفاع از کف هسته).

تحلیل عددی سد در برابر زلزله

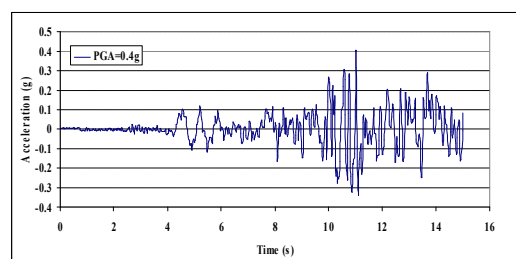
در تحلیل عددی رفتار سد در برابر زلزله، فرضیات اساسی زیر در نظر گرفته شد:

- زلزله در پایان ساخت سد اتفاق می افتد.
- آنالیز به شکل تنش کل، بدون محاسبه فشار آب حفره-ای انجام می شود.
- تغییر شکل های ایجاد شده بر اثر ساخت در سد صفر فرض می شود.
- برای تعریف هر چه واقعی تر شرایط مرزی در پی، از

هسته مایل ناپایدار ولی سد با هسته قائم پایدار است، گرچه تغییر مکان‌های قابل توجهی در آن اتفاق می‌افتد. در شتاب‌های حداکثر $0.7g$ و کمتر از آن هر دو سد پایدار باقی می‌مانند. با این وجود، مقادیر حداکثر تغییر مکان‌های افقی و قائم که در سد با هسته مایل ایجاد می‌شود، در همه موارد از مقادیر متناظر برای سد با هسته قائم بیشتر است. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب تاریخچه تغییر مکان افقی و نشست مرکز هسته در تراز تاج سد برای هر دو سد، با بار زلزله طیس با شتاب حداکثر $0.4g$ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر تغییر مکان افقی و نشست برای سد با هسته مایل به ترتیب ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و برای سد با هسته قائم به ترتیب ۵ و ۴۰ سانتی‌متر است.



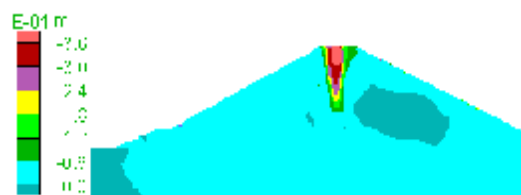
شکل ۱۱: شتاب‌نگاشت افقی زلزله طیس.



شکل ۱۲: شتاب‌نگاشت افقی زلزله‌ی طیس فیلتر شده برای فرکانس ۱۵ هرتز و کالیبره شده برای $0.4g$.



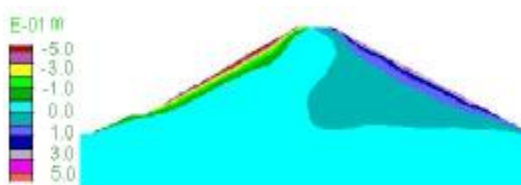
شکل ۱۳- الف: کنتورهای نشست پس از زلزله - سد با هسته مایل.



شکل ۱۳- ب: کنتورهای نشست پس از زلزله - سد با هسته قائم.



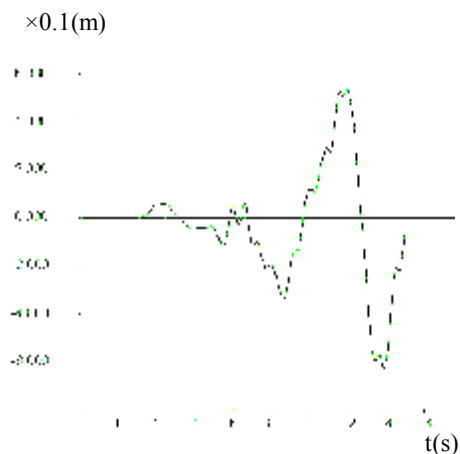
شکل ۱۴- الف: کنتورهای تغییر مکان افقی پس از زلزله - سد با هسته مایل.



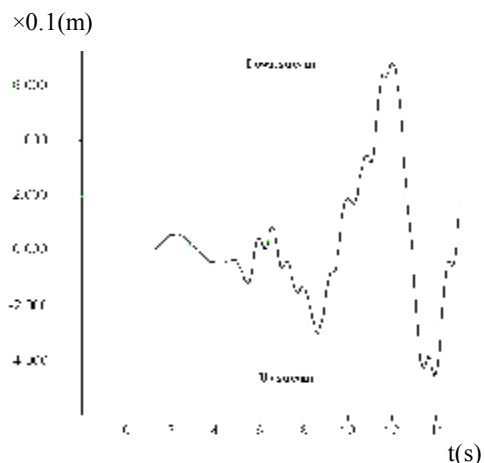
شکل ۱۴- ب: کنتورهای تغییر مکان افقی پس از زلزله - سد با هسته قائم.

نتایج

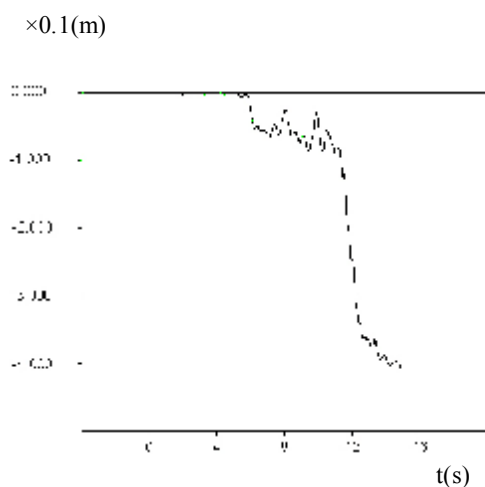
در ارائه نتایج، به ارائه تغییر مکان‌های محاسبه شده در دو سد با هسته مایل (سد بیدواز) و سد با فرض هسته قائم اکتفا می‌شود. به طور کلی، الگوی تغییر مکان‌های ایجاد شده بر اثر زلزله، در سد با هسته مایل به طور محسوسی متفاوت از الگوی تغییر مکان‌های ایجاد شده در سد با هسته قائم است. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب کنتورهای تغییر مکان قائم و تغییر مکان افقی برای دو سد بالا، با فرض شتاب حداکثر معادل $0.4g$ را نشان می‌دهد. از مقایسه شکل (۱۳-الف) با شکل (۱۳-ب) ملاحظه می‌شود که در سد با هسته مایل نشست حداکثر در تراز بالایی تاج و در بالادست آن اتفاق افتاده، ولی در سد با هسته قائم، این نشست در مرکز تاج سد متمرکز شده است. همچنین مقایسه شکل‌های (۱۴-الف) و (۱۴-ب) نشان می‌دهد که مقادیر تغییر مکان‌های افقی حداکثر که در رقوم‌های سطحی پوسته اتفاق می‌افتد، در سد با هسته مایل بیشتر از مقادیر متناظر در سد با هسته قائم است. جدول (۵) خلاصه‌ای از نتایج تحلیل عددی دو سد با شتاب‌نگاشت افقی زلزله طیس برای شتاب‌های حداکثر معادل $0.4g$ و $0.7g$ و $0.8g$ و $0.9g$ را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در شتاب حداکثر $0.9g$ هر دو سد ناپایدار هستند. در شتاب حداکثر $0.8g$ سد با



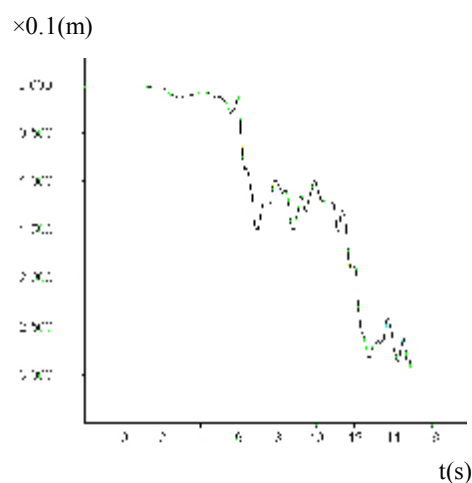
شکل ۱۵-ب: تاریخچه‌ی تغییر مکان افقی مرکز هسته در تراز تاج - سد با هسته قائم.



شکل ۱۵-الف: تاریخچه تغییر مکان افقی مرکز هسته در تراز تاج - سد با هسته مایل.



شکل ۱۶-ب: تاریخچه‌ی نشست مرکز هسته در تراز تاج - سد با هسته قائم.



شکل ۱۶-الف: تاریخچه‌ی نشست مرکز هسته در تراز تاج - سد با هسته مایل.

جدول ۵: خلاصه نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت در برابر بار زلزله.

نوع سد	حداکثر شتاب زلزله	وضعیت پایداری	حداکثر نشست (متر)	حداکثر تغییر مکان افقی پوسته بالادست (متر)	حداکثر تغییر مکان افقی پوسته پائین دست (متر)
هسته مایل	۰/۹g	ناپایدار	-	-	-
هسته قائم	۰/۹g	ناپایدار	-	-	-
هسته مایل	۰/۸g	ناپایدار	-	-	-
هسته قائم	۰/۸g	پایدار	۱/۸۶	۲	۱/۷
هسته مایل	۰/۷g	پایدار	۱/۹۲	۲/۳۵	۱/۷۵
هسته قائم	۰/۷g	پایدار	۱/۵۲	۱/۶۵	۱/۵
هسته مایل	۰/۴g	پایدار	۰/۴۳	۰/۷۶	۰/۶۱
هسته قائم	۰/۴g	پایدار	۰/۳۷	۰/۵۵	۰/۵۲

نتیجه گیری

در این مقاله، رفتار سد خاکی بیدواز، که هسته مایل دارد، در طول ساخت و در برابر زلزله به وسیله تحلیل عددی دوبعدی مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر آن، تحلیل‌های بالا برای همین سد، ولی با فرض قائم بودن هسته، تکرار شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از تحلیل عددی به این شرح زیر است.

تحلیل‌های استاتیکی

- تغییرشکل‌های افقی و قائم پایان ساخت سد با هسته مایل بیشتر از این تغییر شکل‌ها در سد با هسته قائم است؛ میزان این افزایش به ترتیب حدود ۶۶ درصد و ۲۰ درصد است. در سد با هسته مایل حداکثر نشست در تراز پایین‌تری نسبت به سد با هسته قائم اتفاق می‌افتد. همچنین حداکثر تغییر مکان‌های افقی در رقوم‌های سطحی پوسته بالادست سد اتفاق می‌افتد.

- بررسی کمیت‌هایی نظیر تنش قائم و ضریب قوس‌زدگی در کف هسته نشان از افزایش این کمیت‌ها در فیلتر بالادست سد با هسته مایل نسبت به مقادیر نظیر در سد با هسته قائم داشت که میزان این افزایش به ترتیب برابر با ۲۵ و ۲۰ درصد بود. در ضمن با مایل شدن هسته سد، افزایش شدید تنش برشی در حوالی فیلتر بالادست سد اتفاق می‌افتد.

- فشار آب حفره‌ای پایان ساخت سد با هسته قائم بیشتر از مقادیر نظیر در سد با هسته مایل است که مقادیر

حداکثر در مرکز هسته و در ترازوی حدود یک سوم ارتفاع آن از پی اتفاق می‌افتد. مقادیر حداکثر فشار آب حفره‌ای و ضریب فشار آب حفره‌ای در سد با هسته قائم به ترتیب ۳۳ و ۲۸ درصد بیشتر از مقادیر نظیر در سد با هسته مایل است.

تحلیل‌های دینامیکی

- آنالیزهای حساسیت با حداکثر شتاب‌های افقی زلزله (۰/۴ گرم تا ۰/۹ گرم) نشان داد که به طور کلی، احتمال ناپایداری سد با هسته مایل در مقابل زلزله بیشتر از سد با هسته قائم است. وقوع ناپایداری‌ها در شیب بالادست سد است؛ همان مکان که هسته مایل به سمت آن متمایل است. .

- حداکثر نشست در تاج سد با هسته قائم در محور سد اتفاق می‌افتد، در صورتی که در سد با هسته مایل به سمت بالادست تاج متمایل است. همچنین حداکثر نشست در پوسته بالادست در سد با هسته مایل نسبت به سد با هسته قائم بیشتر است. همچنین تغییر مکان افقی شیب بالادست سد با هسته مایل نسبتاً بیشتر است.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای مهندس علی اخترپور و شرکت طوس آب که اطلاعات به دست آمده از ابزار دقیق را برای این پژوهش در اختیار قرار دادند، قدردانی می‌شود.

مراجع

- 1 - Mohajeri, M. (1374). *A Review of Dynamic Analysis Method of Earth and Rock-Fill Dams*, Msc Thesis; Tehran University, Iran.
- 2 - Karbor shiadeh, A. H. (1385). *Numerical Analysis of Earth dams with Inclined Core, Subjected to Earthquake Loading (Case-Study: BIDVAZ Dam)*, Msc Thesis; Amirkabir University of technology, Iran.
- 3 - TOOSAB Co. (1382). *Result of CD, CU and UU for Shell and Core material of BIDVAZ Dam*. Shahrivar.
- 4 - Ozkan, M. Y. (1998). "A review of considerations on seismic safety of embankments and earth and rock-fill dams." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 17, PP. 439-458.
- 5 - Jian, Z., Goux, Z. and Shimming, W. (1991). "Comparison of 2-D and 3-D dynamic analysis of effective stress of earth dams." *Proc of Second Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake and Soil Dynamics Marc, St Louis, Missouri*.
- 6 - Seed, H. B. (1980). "Earthquake-resistant design of earth dams." *Symposium on Problems and Practice of Dam Engineering*, Bangkok, PP. 41-59.

- 7 - Mejia, L. H. and Seed, H. B. and Lysmer, J. (1982). "Dynamic analysis of earth dams in three dimensions." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 108, No. Gt12, PP. 1586-1604.
- 8 - "Earthquake Analysis for Dams", *state of the art, ICOLD, ICOLD, international commission on large dams, bulletin n52, paris*, (1986).
- 9 - Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. and Tokimetsu, K. (1986). "Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soils." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 112, No. 11, PP. 1016-1032.
- 10 - Gazetas, G. and Dakoulas, P. (1992). "Seismic analysis and design of rockfill dams." *State of the Art, Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 11, PP. 27-61.
- 11- Elgamal, A. W. M., Scott, R. F., Succarieh, M. F and Yan, L. P. (1990). "La villita dam response to five earthquake including permanent deformation." *J. Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 10.
- 12 - Byrne, P. M. (2005). *Seismic Review of Marlin Embankment Dam*.
- 13 - Bowles, D. S., Anderson, L. R., Evelyn, J. B. and Glover, T. F. (1989). "Alamo dam demonstration risk assessment." *Proceedings of the Australian Committee on Large Dams (ANCOLD) Annual Meeting, Jindabyne, New South Wales, Australia*.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Non-associated Flow Rule