

# تحلیل عددی فشار آب منفذی دینامیکی در سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله

محمود یزدانی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا پاسه<sup>۲</sup>، مسعود مسجودی<sup>۳</sup>

- ۱- استادیار مهندسی عمران، مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران، مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه تربیت مدرس

myazdani@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: آذر ۱۳۸۵، دریافت پذیرش: فروردین ۱۳۸۷)

**چکیده-** در این مقاله، رفتار دینامیکی و تولید فشار آب حفره‌ای اضافی در سد خاکی نمونه، با استفاده از نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و با در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای اضافی تولید شده در مدت زلزله، بررسی شده است. بر پایه نسخه بایرن<sup>۱</sup> از مدل فین<sup>۲</sup>، تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی در برابر تغییرات پارامترهای مقاومتی اجزای سد و نیز در برابر رفتار اتساعی یا انقباضی مصالح پوسته، که امکان رخداد روانگرایی در آنها ملحوظ شده- مطالعه شده است. همچنین با استفاده از روش مقیاس کردن بیشینه شتاب اعمالی، تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی و پدیده روانگرایی در شتاب‌های بیشینه متفاوت، بررسی شده است. نتایج حاصل، وابستگی پاسخ فشار آب حفره‌ای را به پارامترهای مقاومتی اجزای سد، زاویه اتساع مصالح و شتاب اعمالی بیشینه نشان می‌دهد و این که در صورت نبود تراکم مناسب در مصالح پوسته، پتانسیل گسیختگی بر اثر روانگرایی به شدت افزایش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در سدهای خاکی ساخته شده با تراکم مناسب مصالح، احتمال وقوع روانگرایی حتی در زلزله‌های با دامنه شتاب بسیار زیاد، ناچیز است.

**کلید واژگان:** تحلیل دینامیکی، روانگرایی، زاویه اتساع، سد خاکی، فشار آب حفره‌ای اضافی.

1. Byrne  
2. Finn

**۱- مقدمه**

به‌ویژه، اثر ورودی بیشینه و زاویه اتساع بر فشار آب حفره‌ای اضافی بررسی شده است.

در طراحی لرزه‌ای سدهای خاکی، به‌طور معمول حفظ مخزن سد در هنگام رخداد زلزله و در بدترین حالت، رهاشدن کنترل شده مخزن، به شیوه‌ای که به خسارت جانی منجر نشود، مدنظر قرار می‌گیرد. در دهه‌های اخیر، دریافت مهندسان از شدت خطرپذیری زلزله به‌دلیل داده‌های لرزه‌ای به‌دست‌آمده و پژوهش‌های زمین‌شناختی و لرزه زمین‌شناختی، دست‌خوش تغییر بزرگی شده است [۱]. ارائه شیوه‌های نوین تحلیلی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی و افت مقاومت خاک بر اثر زلزله، امکان پیش‌بینی تغییرشکل‌های ایجادشده بر اثر رخداد لرزه‌ای مشخص را ایجاد کرده است.

**۲- فشار آب حفره‌ای اضافی**

تحت اثر زلزله، خاک‌ها معمولاً رفتار نرم‌شوندگی یا کاهش مقاومت را از خود نشان می‌دهند. این می‌تواند موجب نشست سازه‌ها، گسیختگی شیروانی‌ها یا افت ظرفیت باربری پی‌ها شود. این پدیده به‌ویژه برای خاک‌های غیرچسبنده اشباع سست تا خاکهای با تراکم متوسط اهمیت می‌یابد که معمولاً به روانگرایی مربوط می‌شود.

سوابق مربوط به رفتار سدها در برابر زلزله موجب شده که در بسیاری از موارد، سدهای موجود با زلزله‌های مورد نظر در هنگام طراحی آنها و با روش‌هایی که در دسترس طراحان اصلی نبوده، بار دیگر بررسی شوند.

هنگامی که خاک‌های غیرچسبنده اشباع تحت بارگذاری تناوبی قرار می‌گیرند، به دلیل تراکم‌پذیری ناچیز آب، در زمان کوتاه بارگذاری، کاهش حجم نمی‌تواند رخ دهد و تمایل به کاهش حجم، به افزایش فشار حفره‌ای و کاهش تنش مؤثر منجر می‌شود. عواملی مانند تاریخچه تنش وارد بر خاک، اندازه و شکل ذرات، دانه‌بندی و طبیعت بارگذاری بر این پدیده اثر طمی‌گذارند [۲].

ارزیابی درست و واقع‌گرایانه از کارایی و پایداری سد خاکی در برابر زلزله، نیازمند تحلیل پاسخ دینامیکی برای تعیین تنش‌های دینامیکی و تغییرشکل‌های ایجاد شده است. این کار به دلایل زیر جزء دشوارترین مسائل مهندسی ژئو تکنیک به‌شمار می‌رود: رفتار پیچیده خاک به‌ویژه تحت بارهای دینامیکی، کافی نبودن تحلیل شبه‌استاتیکی، لزوم انجام بررسی امکان وقوع پدیده روانگرایی و ایجاد فشار آب حفره‌ای اضافی. در این مقاله، فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در اثر بارگذاری زلزله در سد خاکی نمونه با استفاده از نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی مطالعه شده است. مدل‌سازی فشار آب حفره‌ای اضافی با استفاده از مدل فین موجود در نرم‌افزار فلک<sup>۱</sup> در محیط دوبعدی انجام و

مدل‌های زیادی بر پایه آزمایش‌های آزمایشگاهی برای منظور کردن ایجاد فشار آب حفره‌ای در طی بارگذاری دینامیکی ارائه شده است. اشکال فهم این مدل‌ها، تکیه بر آزمایش‌های ویژه‌ای است که در بارگذاری‌های عمومی استفاده چندانی ندارند. مدل فین برای روانگرایی، علاوه بر سادگی، در مسایل واقعی نیز جواب‌های رضایت‌بخشی را به‌دست می‌دهد [۳].

**۲-۱- مدل فین برای تولید فشار آب حفره‌ای****اضافی**

در هر چرخه کامل بارگذاری دینامیکی در شرایط زهکشی‌شده وارد بر ماسه اشباع با تراکم پایین تا متوسط،

1. FLAC

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp(-C_2 \left(\frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma}\right)) \quad (4)$$

وی نشان داد که در بسیاری از موارد می‌توان از روابط:  $C_2 = \frac{0.4}{C_1}$  و  $C_1 = 7600(D_r)^{-2.5}$  بهره گرفت که در آن  $D_r$  تراکم نسبی خاک است. همچنین با توجه به همبستگی‌های آرایه شده میان  $D_r$  و  $(N_1)_{60}$ ، می‌توان پارامترهای مدل بایرن را فقط بر پایه عدد نفوذ استاندارد تخصیص داد [5].

### ۳- ملاحظات تحلیل دینامیکی

سه جنبه مهم تحلیل دینامیکی عبارت‌اند از:

۱- بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی

۲- میرایی

۳- انتقال موج

بارگذاری دینامیکی داخلی یا خارجی به صورت شرایط مرزی ورودی دینامیکی در نقاط گرهی داخلی و یا در مرزهای مدل اعمال می‌شود. می‌توان از تاریخچه شتاب، سرعت، تغییر مکان، تنش یا نیرو به عنوان ورودی بارگذاری دینامیکی استفاده کرد.

از سوی دیگر، مدل‌سازی مسائل ژئومکانیکی شامل محیط‌هایی است که در مقیاس تحلیل، به صورت نامحدود، به شکل بهتری توصیف می‌شوند. حفاری‌های زیرزمینی عمیق معمولاً به صورت محصور در محیطی نامتناهی در نظر گرفته می‌شوند. حال آنکه سطح زمین و سازه‌های نزدیک سطح زمین، واقع بر فضایی نیمه‌متناهی فرض می‌شوند. روش‌های عددی بر تقسیم ناحیه‌ای محدود از فضا متکی‌اند که ایجاب می‌کند شرایط مناسبی بر مرزهای عددی ساختگی تحمیل شود. در تحلیل‌های استاتیکی، مرزهای ثابت شده یا الاستیک را (مانند آنچه در روش

با توجه به تراکم دانه‌ها، حجم فضای خالی کاهش می‌یابد. چنانچه فضاها خالی با سیال پر شده باشند، در شرایط زهکشی‌نشده، فشار سیال افزایش یافته و تنش مؤثر عمل‌کننده بر بافت دانه‌های خاک کاهش می‌یابد. بر این مبنای، رابطه زیر میان افزایش فشار آب حفره‌ای  $\Delta u$  در طی آزمایش برش ساده زهکشی‌نشده و نمو کرنش تراکمی حجمی ( $\Delta \varepsilon_{vd}$ ) در آزمایش برش ساده زهکشی شده بر اثر چرخه کرنش برشی برابر  $\gamma$  آرایه شده است [4]:

$$\Delta u = \frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\frac{1}{\bar{E}_r} + \frac{n_p}{K_w}} \quad (1)$$

در این رابطه:

$n_p$ : تخلخل مصالح

$K_w$ : ضریب حجمی آب

$\bar{E}_r$ : ضریب برگشتی یک‌بعدی ماسه

با توجه به اینکه در ماسه‌های اشباع،  $k_w \gg \bar{E}_r$ ، رابطه (۱) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\Delta u = \bar{E}_r \Delta \varepsilon_{vd} \quad (2)$$

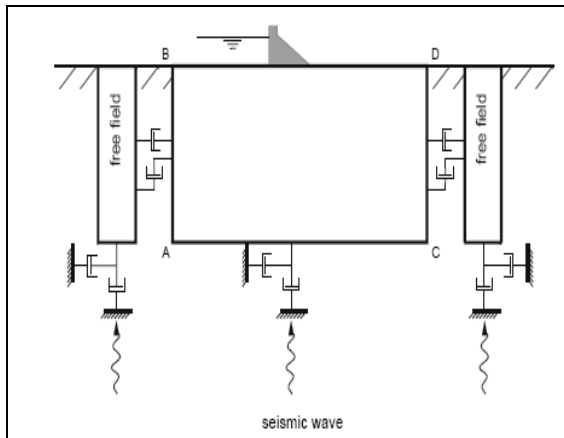
نمو کرنش حجمی در مدل فین با رابطه زیر به کرنش حجمی تجمعی ( $\varepsilon_{vd}$ ) و دامنه کرنش برشی ( $\gamma$ ) مرتبط می‌شود [4]:

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1 (\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (3)$$

در این رابطه،  $C_i$ ،  $i = 1, \dots, 4$ ، ثابت وابسته به نوع ماسه و چگالی نسبی آن است.

بایرن، ساده‌سازی زیر را برای رابطه (۳) آرایه کرد [5]:

یک بعدی به طور موازی با تحلیل شبکه تفاضل محدود اصلی است [۳].

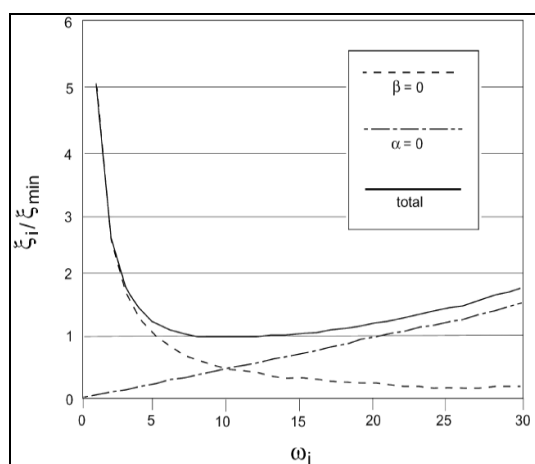


شکل ۱ مدل تحلیل لرزه‌ای سازه سطحی همراه با شبکه میدان آزاد [۳]

در تحلیل‌های دینامیکی به خلاف تحلیل‌های شبه-استاتیکی، میرایی باید بتواند از نظر بزرگی و شکل، افت انرژی را در سیستم طبیعی، وقتی تحت بارگذاری دینامیکی واقع می‌شود بازتولید کند. در خاک و سنگ، میرایی طبیعی معمولاً هیسترتیک است، یعنی مستقل از فرکانس عمل می‌کند. بازتولید این نوع میرایی به صورت عددی، حداقل به دو علت کار بسیار دشواری است. اول اینکه بسیاری از توابع هیسترتیک ساده، وقتی امواج مختلفی بر مدل اعمال می‌شوند، همه مولفه‌ها را میرا نمی‌کنند. دوم اینکه توابع هیسترتیک، به جواب‌های وابسته به مسیر منجر می‌شوند که تفسیر نتایج را با مشکل روبه‌رو می‌کنند. با این وجود، اگر مدل ساختاری یافت شود که به میزان کافی دربردارنده رفتار هیسترتیک موجود در مصالح واقعی باشد، آنگاه کاربرد انواع دیگر میرایی ضروری نخواهد بود. در این تحقیق از میرایی «رایلی» برای تأمین نوعی از میرایی که در محدوده

المان‌های مرزی آرایه می‌شود) می‌توان به صورت واقعی در فاصله‌ای از ناحیه مورد نظر قرار داد. در مسائل دینامیکی، این نوع شرایط مرزی موجب می‌شود که امواج منتشرشونده به سمت خارج، با برخورد به مرزها، به داخل مدل بازگردند و از پخش انرژی (که در عمل اتفاق می‌افتد) جلوگیری شود. استفاده از مدلی بزرگتر می‌تواند این مشکل را کاهش دهد، زیرا میرایی خود مصالح، بیشتر انرژی بازتابیده از مرزهای دوردست را جذب می‌کند. البته، این موجب افزایش حجم محاسبات می‌شود.

در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های سطحی مانند سدها، باید ناحیه‌ای از مصالح مجاور پی نیز مدل سازی شود. حرکت ورودی زلزله اغلب به صورت امواجی صفحه‌ای که از مصالح زیرین به سمت بالا منتشر می‌شوند، اعمال می‌شود. شرایط مرزی در جوانب باید بتوانند حرکت میدان آزاد را در غیاب سازه ملحوظ کنند. در برخی حالتها، استفاده از کرانه‌های جانبی ابتدایی کافی است. برای مثال چنانچه در شکل (۱) فقط یک موج برشی در کرانه افقی AC اعمال شود، می‌توان کرانه‌های AB و CD را در جهت‌های عمودی ثابت کرد. این مرزها را باید در فواصل کافی قرار داد تا از بازتاب امواج جلوگیری شده، و شرایط میدان آزاد حاکم باشد. برای خاک‌های با میرایی بالا، شرایط میدان آزاد را می‌توان با فواصل کوتاه هم ایجاد کرد. البته در حالتی که میرایی مصالح کم باشد، فاصله لازم برای ایجاد شرایط میدان آزاد، ممکن است به مدلی غیر اقتصادی (از نظر محاسباتی) منجر شود. جایگزینی مناسب برای این فاصله، «تحمیل» حرکت میدان آزاد به نحوی است که مرزها، ویژگی غیر بازتابنده خود را حفظ کنند؛ یعنی امواج حاصل از سازه به نحو مناسبی جذب شوند. روشی از این نوع، در نرم‌افزار فلک نیز استفاده شده که شامل اجرای محاسبات میدان آزاد



شکل ۲ تغییر نسبت میرایی بحرانی نرمال شده با تغییر فرکانس زاویه‌ای

به طوری که مشاهده می‌شود، میرایی متناسب با جرم، در محدوده فرکانس‌های زاویه‌ای پایین، و میرایی متناسب با سختی، در محدوده فرکانس‌های زاویه‌ای بالا غالب است.

منحنی نشان‌دهنده جمع این دو مولفه، در مقدار زیر به حداقل خود می‌رسد:

$$\xi_{\min} = (\alpha\beta)^{1/2} \quad (7)$$

$$\omega_{\min} = (\alpha/\beta)^{1/2} \quad (8)$$

فرکانس مرکزی با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$f_{\min} = \omega_{\min}/2\pi \quad (9)$$

در فرکانس مرکزی و فقط در این فرکانس، میرایی مربوط به جرم و میرایی مربوط به سختی، هر کدام نیمی از نیروی میراگر کل را تأمین می‌کنند.

در نرم‌افزار فلک، میرایی رایلی با پارامترهای  $f_{\min}$  و  $\xi_{\min}$  به هرتز معرفی می‌شود. از آنجا که در مصالح ژئوتکنیکی معمولاً میرایی مستقل از فرکانس است، اغلب طوری انتخاب می‌شود که در مرکز فرکانس‌های موجود

فرکانس‌های محدودی به صورت مستقل از فرکانس رفتار کند، استفاده می‌شود.

میرایی رایلی در اصل در تحلیل سازه‌ها و محیط‌های الاستیک، برای میرا کردن مدهای ارتعاشی طبیعی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین معادلات آن هم به شکل ماتریسی ارائه می‌شود. ماتریس میرایی  $C$  با مؤلفه‌های متناسب با جرم ( $M$ ) و متناسب با سختی ( $K$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (5)$$

برای سیستم با چند درجه آزادی، نسبت میرایی بحرانی  $\xi_i$ ، برای هر فرکانس زاویه‌ای سیستم  $\omega_i$  از رابطه زیر به دست می‌آید [۶]:

$$\alpha + \beta\omega_i^2 = 2\omega_i\xi_i \quad (6)$$

$\xi_i$  نسبت میرایی بحرانی مود  $i$ ام با فرکانس زاویه‌ای  $\omega_i$  است. در شکل (۲) تغییرات نسبت میرایی بحرانی نرمال شده نسبت به فرکانس زاویه‌ای  $\omega_i$  نشان داده شده است. سه منحنی، شامل مؤلفه‌های مربوط به جرم و سختی به طور مجزا و جمع آنها است [۶].

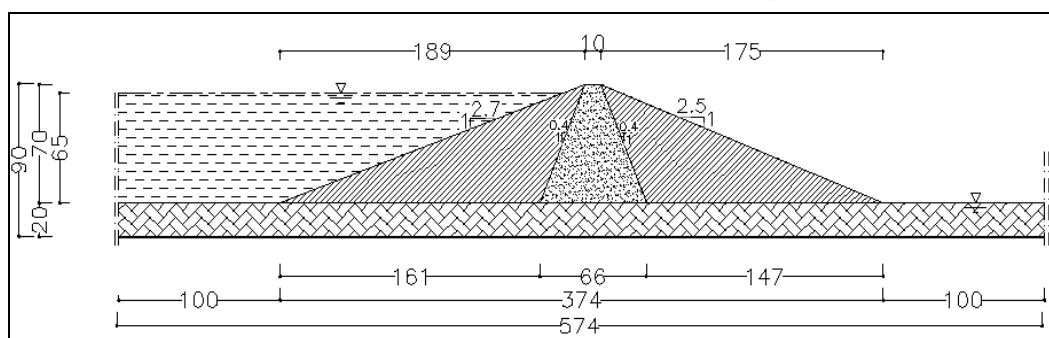
لرزه‌ای، ارتفاع آب مخزن، شرایط آب حفره‌ای، رفتار مکانیکی پی و خاکریز با احتساب پتانسیل روانگرایی و پاسخ لرزه‌ای، انجام شود. این ملاحظات در مدلی که ارائه می‌شود، مد نظر قرار گرفته است. در این مطالعه، سدی خاکی با مشخصات نشان داده شده در شکل (۳) در نظر گرفته شده که ویژگی‌های ژئوتکنیکی اجزای آن شامل پی سنگی، هسته رسی و پوسته‌های بالادست و پایین دست آن در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل (۴)، شبکه تفاضل محدود نیمی از سد نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی عددی قرار داشته باشد (فرکانس طبیعی مدل یا فرکانس‌های ورودی غالب). به این شیوه، تقریبی از میرایی هیسترتیک در تحلیل منظور می‌شود.

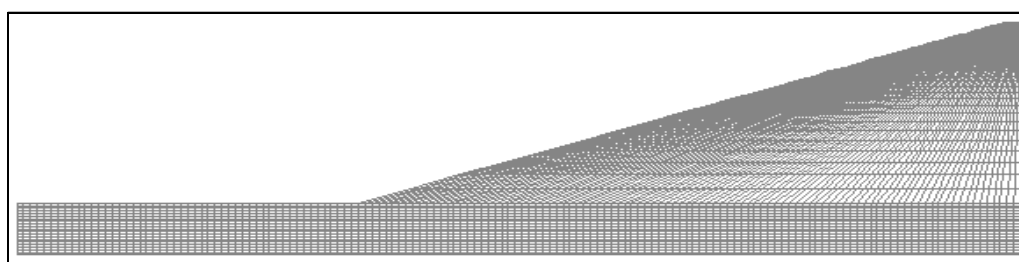
## ۴- مدل‌سازی

### ۴-۱- ویژگی‌های عمومی مدل

در تحلیل کارایی لرزه‌ای سدهای خاکی، باید تعادل استاتیکی و شرایط آب حفره‌ای وابسته نیز مانند سایر فرایندهای دینامیکی در نظر گرفته شود. لازم است محاسبات مربوط به حالت تنش پیش از بارگذاری



شکل ۳ هندسه سد خاکی نوعی مورد مطالعه (ابعاد بر حسب متر)



شکل ۴ شبکه تفاضل محدود نیمی از سد خاکی از محور تقارن آن

است، در تحلیل دینامیکی استفاده شده است. تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان زلزله فریولی در شکل (۵) ارائه شده است.

با فرض اینکه در سطح لرزه‌ای طراحی<sup>۱</sup>، شتاب حداکثر زلزله طرح برابر  $g/3$  است، از تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌ای نظیر فریولی<sup>۲</sup> که دارای چنین شتاب حداکثری

1 . Desing Base Earth quake (DBE)

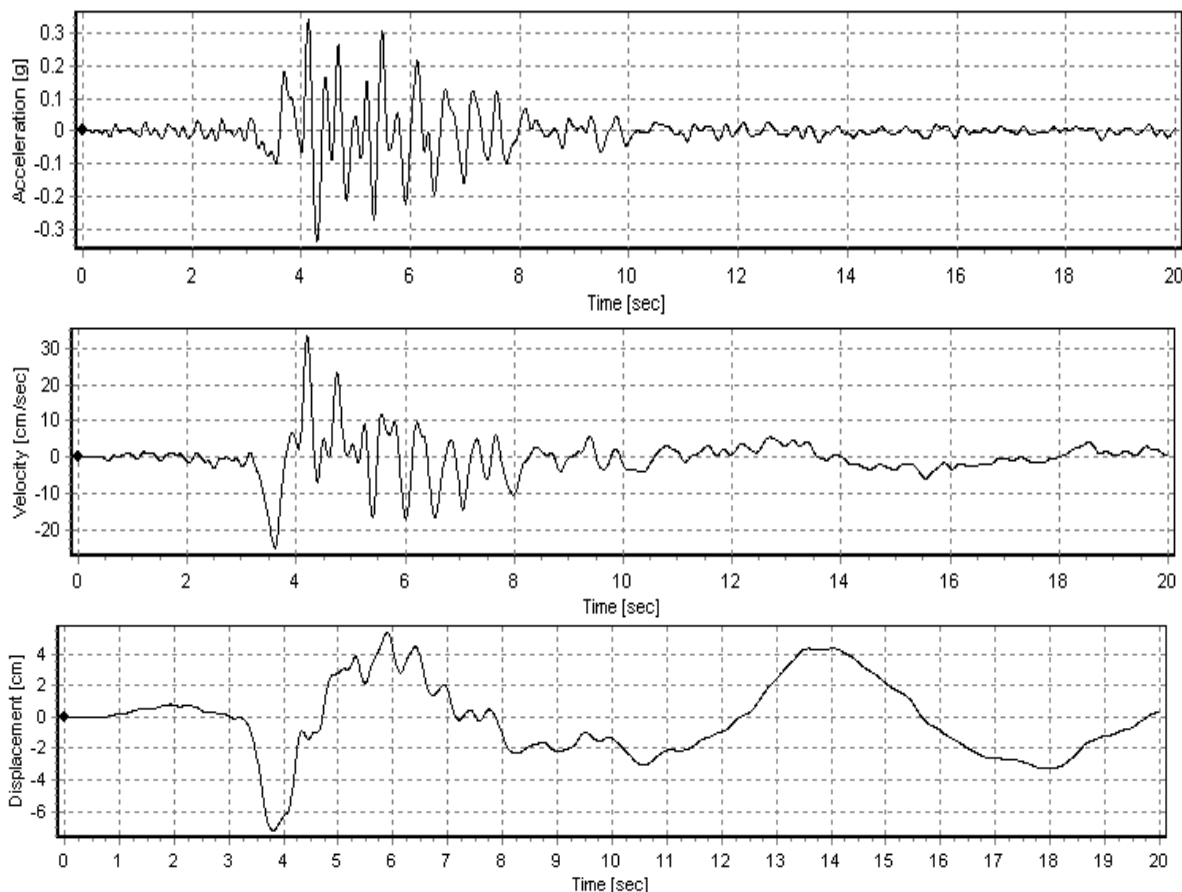
2 . Friulli

## ۴-۲- تعیین فرکانس طبیعی سد خاکی

جدول ۱ ویژگی‌های ژئوتکنیکی اجزای سد خاکی

ویژگی	پوسته	پی سنگی	هسته
وزن مخصوص مرطوب ( $KN/m^3$ )	۲۳	۲۵	۲۲
مدول الاستیسیته ( $MPa$ )	۵۰	۱۰۰۰	۲۰
نسبت پواسون	۰/۳۰	۰/۲۵	۰/۴
چسبندگی ( $KPa$ )	۵	۱۰۰	۴۰
زاویه اصطکاک داخلی	۳۸	۳۸	۲۵
نفوذپذیری ( $cm/s$ )	$۱۰^{-۳}$	$۱۰^{-۶}$	$۱۰^{-۶}$
تخلخل	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۳۱

در این پژوهش، برای تعیین کمترین فرکانس طبیعی ارتعاش سد خاکی از نرم‌افزار فلک استفاده شده است. با تحلیل دینامیکی سد خاکی، بدون اعمال بار و ملحوظ نکردن میرایی و با استفاده از نمودار سرعت - زمان نقاط شبکه تفاضل محدود سد، مطابق شکل (۶)، فرکانس طبیعی سیستم برابر ۰/۵ هرتز به دست می‌آید. پارامتر  $f_{min}$  میرایی رایلی مطابق محاسبات، ۰/۵ هرتز در نظر گرفته شده است.

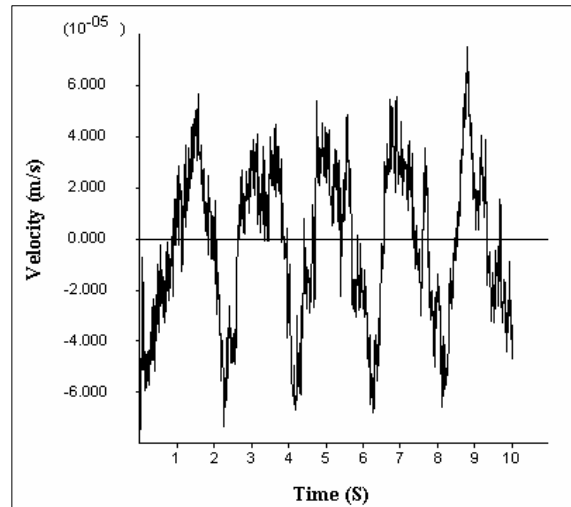


شکل ۵ تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان زلزله فریولی

#### ۴-۳-۲- گام دوم: محاسبات لرزه‌ای با فرض

##### استفاده از مدل مور-کولمب

در این گام، از مدل مور-کولمب برای مصالح استفاده می‌شود. در این مصالح، تغییر فشار آب حفره‌ای فقط بر اثر تغییرات حجمی دینامیکی ایجاد شده توسط تحریک لرزه‌ای، امکان وقوع دارد و تولید فشار آب حفره‌ای بر اثر بازآرایی دانه‌ها پیش نمی‌آید. از آنجا که فرض می‌شود تحریک دینامیکی در زمانی بسیار کمتر از زمان مورد نیاز برای محو فشار آب حفره‌ای انجام می‌شود، محاسبات جریان آب در این گام انجام نمی‌شود.



شکل ۶ نمودار سرعت- زمان ارتعاش سدخاکی

#### ۴-۳-۳- گام سوم: محاسبات لرزه‌ای با فرض استفاده

##### از مدل فین - بایرن

در این گام، برای شبیه‌سازی تولید فشار آب حفره‌ای ناشی از بازآرایی دانه‌ها، از مدل بایرن در مصالح پوسته سد استفاده می‌شود. سایر شرایط دینامیکی به شیوه‌ای مشابه با تحلیل پیشین در نظر گرفته می‌شود. برای بررسی اثر ایجاد فشار آب حفره‌ای، تغییرات دو پارامتر فشار آب حفره‌ای اضافی و نسبت فشار آب حفره‌ای در طول تحلیل دینامیکی محاسبه می‌شود.

#### ۵- مطالعات پارامتری

##### ۵-۱- بررسی اثر کاهش پارامترهای مقاومتی

برای بررسی ایمنی مدل سد، از روش اعمال ضریب کاهش مقاومت<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در این روش، ایمنی برابر با بزرگترین مقدار SRF ای که سد به‌ازای آن پایدار می‌ماند، تعریف می‌شود. ضریب کاهش مقاومت بر

#### ۴-۳-۴- مراحل مختلف تحلیل

##### ۴-۳-۴-۱- گام یکم: برقراری حالت اولیه تنش

تحلیل، از حالت پیش از ساخت خاکریز شروع می‌شود. فرایند ساخت می‌تواند بر حالت تنش اثرگذار، به‌ویژه اگر فشار حفره‌ای اضافی در خاک‌ها ایجاد شود و این فشار حفره‌ای به‌طور کامل در طی مراحل ساخت، محو نشود. باید توجه کرد که مدل‌سازی چند مرحله‌ای ساخت خاکریز، تنش‌های استاتیکی اولیه را بطور دقیق‌تری ارائه می‌دهد. این کار به‌ویژه در تحلیل روانگرایی از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا تنش‌های برشی استاتیکی اولیه می‌تواند بر شروع روانگرایی مؤثر باشد. مصالح خاکریز به‌طور موقت از مدل حذف می‌شوند. این مصالح پس از محاسبه حالت تعادل اولیه در پی سد، در طی چند مرحله به مدل اضافه می‌شوند. پیش از هر مرحله، تغییر مکان‌ها در مدل صفر قرار داده می‌شوند. در دوره ساخت، تحلیل در حالت کرنش‌های کوچک انجام می‌شود. چنانچه تغییر شکل‌های بزرگی مورد انتظار باشد، می‌توان تحلیل را در حالت کرنش‌های بزرگ انجام داد.

1. Streng the Reduction Factor (SRF)



SRF برابر  $1/3$ ، سد پایدار است، لذا ضریب ایمنی سد مورد تحلیل، بزرگتر از  $1/3$  است و البته تعیین دقیق آن، به انجام تعداد بیشتر تحلیل برای تعیین بزرگترین مقدار SRF که به ازای آن سازه خاکی مورد نظر پایدار بماند، می‌باشد.

### ۵-۲- بررسی اثر شتاب بیشینه زلزله

مطابق جدول ۲ با کاهش پارامترهای مقاومتی، بیشینه تاریخچه نسبت فشار آب حفره‌ای، روندی افزایشی را نشان می‌دهد. این اثر را می‌توان به مرتبه تغییرشکل‌ها نسبت داد که شرایط انتقال تنش مؤثر به آب حفره‌ای را افزایش می‌دهد. برای بررسی وابستگی نسبت فشار آب حفره‌ای و روانگرایی به شتاب ورودی زلزله، از روش مقیاس کردن بیشینه شتاب زلزله استفاده و تحلیل دینامیکی سد نوعی در شتاب‌های بیشینه متفاوت استفاده شده است. نتایج حاصل در جدول (۳) ارائه شده است. نمودار حداکثر کرنش برشی پلاستیک، فرونشست تاج و نسبت فشار آب حفره‌ای در برابر شتاب حداکثر زلزله به ترتیب در شکل‌های (۷) تا (۹) ارائه شده است. براساس نتایج به دست آمده، در شتاب‌های ورودی (زلزله) بالاتر از  $0.7g$ ، تغییر مکان‌ها و فشار آب حفره‌ای اضافی به شدت افزایش یافته و تنش مؤثر کاهش می‌یابد. امکان رخداد روانگرایی در شتاب  $0.9g$ ، با توجه به نسبت فشار آب حفره‌ای نزدیک به ۱ امکان پذیر است

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

$$C_d = \frac{C}{SRF} \quad (10)$$

$$\varphi_d = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \varphi}{SRF} \right) \quad (11)$$

در این روابط  $C_d$  و  $\varphi_d$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است.

با اعمال SRF به  $\varphi$  و با توجه به رابطه زیر [۷]، مقدار متناظر  $N_{60}$  به دست می‌آید:

$$\varphi = \sqrt{12N} + 15 \quad (12)$$

با به دست آوردن عدد نفوذ استاندارد، متناظر با پارامترهای مقاومتی کاهش یافته، پارامترهای بایرن، ارائه شده در بند ۲-۱ محاسبه می‌شود.

نتایج حاصل در جدول (۲) ارائه شده است. لازم است ذکر شود که نسبت فشار حفره‌ای با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$r_u = \frac{u_{excess}}{\sigma'_{3c}} \quad (13)$$

در این رابطه،  $u_{excess}$  فشار آب حفره‌ای اضافی و  $\sigma'_{3c}$ ، تنش همه‌جانبه مؤثر است.

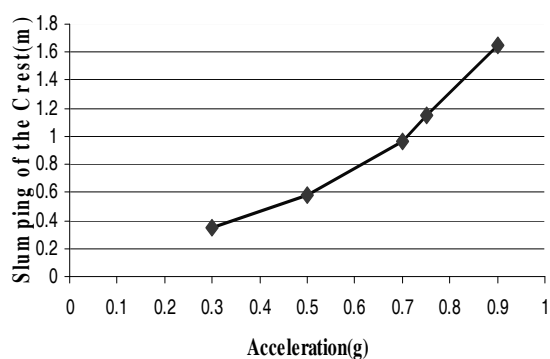
براساس نتایج به دست آمده، با کاهش پارامترهای مقاومتی در اجزای سد، میزان کرنش برشی، تغییر مکان‌های افقی و قائم و مقدار فشار آب حفره‌ای اضافی در نقاط مختلف سد افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در

جدول ۲ نتایج حاصل از کاربرد روش SRF

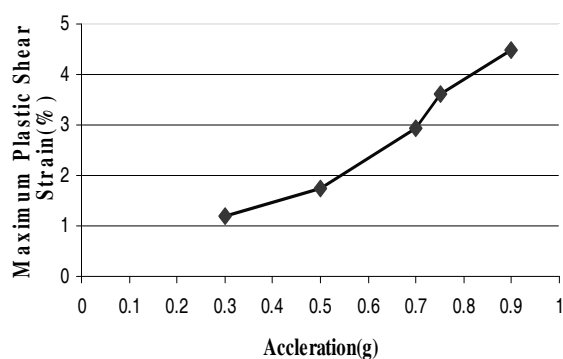
متغیر	SRF=1/3	SRF=1/2	SRF=1/1	SRF=1/0
کرنش پلاستیک بیشینه (%) (در پایین دست)	۲/۹۴	۱/۸۵	۱/۳۵	۱/۲۰
فرونشست بیشینه تاج (متر)	۰/۹۲	۰/۶۲	۰/۴۲	۰/۳۵
تغییر مکان افقی بیشینه روی شیب خاکریز در بالادست (متر)	۰/۷۹	۰/۵۱	۰/۲۹	۰/۲۲
تغییر مکان افقی بیشینه روی شیب خاکریز در پایین دست	۰/۸۵	۰/۶۱	۰/۳۸	۰/۳۱
نسبت فشار آب حفره‌ای بیشینه (%) در پایان تحلیل	۲۰/۳۱	۱۸/۱۲	۱۲/۲۸	۱۰/۳۳
بیشینه تاریخچه نسبت فشار آب حفره‌ای (%)	۴۵/۳	۳۵/۴۵	۲۸/۴۵	۲۵/۹۷

جدول ۳ نتایج حاصل از مقیاس کردن بیشینه شتاب

متغیر	۰/۹ g	۰/۷۵ g	۰/۷ g	۰/۵ g	۰/۳ g
کرنش پلاستیک بیشینه (%) (در پایین دست)	۴/۵	۳/۶	۲/۹۵	۱/۷۵	۱/۲۰
فرونشست بیشینه تاج (متر)	۱/۶۵	۱/۱۵	۰/۹۶	۰/۵۸	۰/۳۵
تغییر مکان افقی بیشینه روی شیب خاکریز در بالادست (متر)	۱/۲۵	۰/۹۸	۰/۸۲	۰/۴۱	۰/۲۲
تغییر مکان افقی بیشینه روی شیب خاکریز در پایین دست (متر)	۱/۵۵	۱/۱۰	۰/۹۱	۰/۵۱	۰/۳۱
نسبت فشار آب حفره‌ای بیشینه (%) در پایان تحلیل	۳۵/۴۵	۲۸/۴۲	۲۲/۳۳	۱۹/۸۱	۱۰/۳۳
بیشینه تاریخچه نسبت فشار آب حفره‌ای (%)	۹۲/۲۵	۶۹/۷۵	۳۹/۳۳	۳۳/۸۲	۲۵/۹۷



شکل ۸ حداکثر فرونشست تاج در برابر شتاب بیشینه زلزله

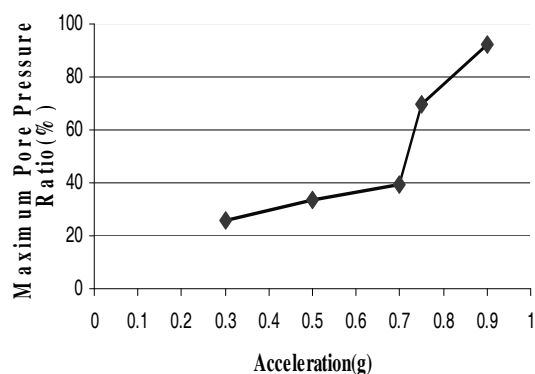


شکل ۷ حداکثر کرنش برشی در برابر شتاب بیشینه زلزله

اتساع با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها استفاده شده است.

خلاصه نتایج در جدول (۴) و تغییرات کرنش برشی، نشست تاج و بیشینه نسبت فشار آب حفره‌ای در زوایای اتساع مختلف در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در زوایای اتساع  $1^\circ$  و  $2^\circ$ ، نسبت فشار آب حفره‌ای و تغییر شکل‌های افقی و قائم سد در مقایسه با زاویه اتساع صفر، افزایش می‌یابد.

همچنین مشاهده می‌شود که برای زاویه اتساع مثبت، مرتبه تغییر مکان‌ها نسبت به زاویه اتساع صفر به شدت کاهش می‌یابد. نتایج حاصل، مؤید تأثیر قابل توجه رفتار انبساطی یا انقباضی خاک بر پتانسیل افزایش فشار آب حفره‌ای اضافی است. این نشان‌دهنده اهمیت ارزیابی مناسب این کمیت است؛ به‌ویژه اینکه در خاک‌های متراکم، رفتار اتساعی و بنابراین وجود زاویه اتساع، مورد انتظار است.



شکل ۹ بیشینه تاریخچه نسبت فشار آب حفره‌ای در برابر شتاب بیشینه زلزله

### ۳-۵- بررسی اثر زاویه اتساع

پیشنهاد ما: پارامتری مقاومتی ای که رفتار انبساطی یا انقباضی خاک را تحت برش توصیف می‌دهد، زاویه اتساع است. اتساع منفی با رفتار انقباضی خاک‌های شل متناظر است. در این بخش، از مقادیرهای متفاوت زاویه

جدول ۴ نتایج حاصل از مطالعه پارامتر زاویه اتساع

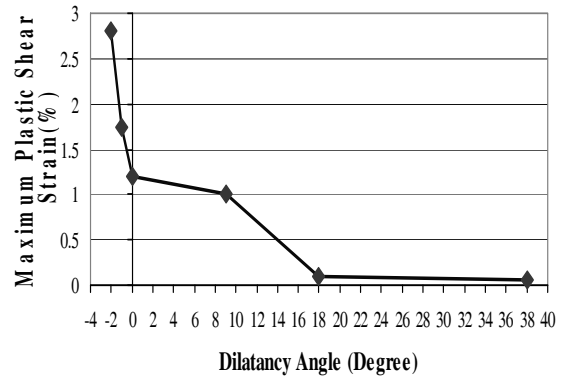
زاویه اتساع	$2^\circ$	$1^\circ$	$0^\circ$	$9^\circ$	$18^\circ$	$38^\circ$
کرنش پلاستیک بیشینه (%) (در پایین دست)	۲/۸	۱/۷۵	۱/۲	۱	۰/۱	۰/۰۵
فرونشست بیشینه تاج (متر)	۰/۸۱	۰/۵۵	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۱۱	۰/۰۵
تغییر مکان افقی بیشینه روی شیب خاکریز در بالادست (متر)	۰/۵۲	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۴۴	۰/۳۲	۰/۰۲۱
تغییر مکان افقی بیشینه روی شیب خاکریز در پایین دست (متر)	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۱۴	۰/۰۸
نسبت فشار آب حفره‌ای بیشینه (%) در پایان تحلیل	۴۲/۱۵	۳۷/۵۳	۱۰/۳۳	۴/۵۷	۴/۱۱	۳/۸۵
بیشینه تاریخچه نسبت فشار آب حفره‌ای (%)	۵۱/۳۷	۴۰/۲۱	۲۵/۹۷	۹/۹۱	۹/۲۵	۸/۵۷

## ۶- نتیجه گیری

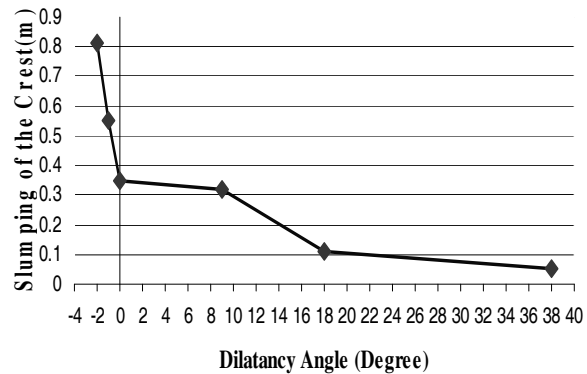
اثر افزایشی نسبت فشار آب حفره‌ای برای تغییرات شتاب حداکثر زلزله، مؤید وابستگی پاسخ فشار آب حفره‌ای به حداکثر شتاب زلزله ورودی است. با افزایش شتاب از  $0.3g$  به  $0.9g$ ، میزان نشست در تاج سد، تغییرمکان‌های افقی در شیب بالادست و پایین دست و نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی به شدت افزایش می‌یابد. در شتاب  $0.9g$ ، نسبت فشار آب حفره‌ای تا  $3/5$  برابر افزایش یافته و به عدد ۱ نزدیک می‌شود. در این شرایط، وقوع تغییرات بحرانی در مقادیر اختصاص یافته به مولفه‌ها و پارامترهای طرح، پدیده روانگرایی را محتمل می‌سازد.

همچنین نتایج حاصل از مطالعه پارامتری اثر زاویه اتساع، وابستگی شدید پاسخ فشار آب حفره‌ای به نوع رفتار انبساطی یا انقباضی خاک تحت برش را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۴) دیده می‌شود که تغییر زاویه اتساع از صفر به  $2-$  درجه، تا حدود ۴ برابر مقدار حداکثر نسبت فشار آب حفره‌ای را افزایش داده است، هرچند برای مقادیر مثبت زاویه اتساع، حداکثر نسبت فشار آب حفره‌ای به شدت کاهش می‌یابد. از این رو چنین نتیجه گرفته می‌شود که اگر مصالح بدنه سد از تراکم مناسبی برخوردار باشند، پتانسیل وقوع روانگرایی در بدنه سد، به شدت کاهش می‌یابد. اگرچه برای ارزیابی دقیق این مسأله، عوامل دیگری مانند زلزله‌های بحرانی با محتوای فرکانسی نزدیک به بدنه سد، در نظر گرفتن میرایی هیسترتیک خاک و سنگ و مانند آن ضروری است. در سدهای ساخته شده با مصالحی که تراکم پایینی دارند (مانند سدهای خاکریز هیدرولیکی)، تحلیل روانگرایی برای مصالح بدنه سد اهمیت زیادی دارد [۹۸].

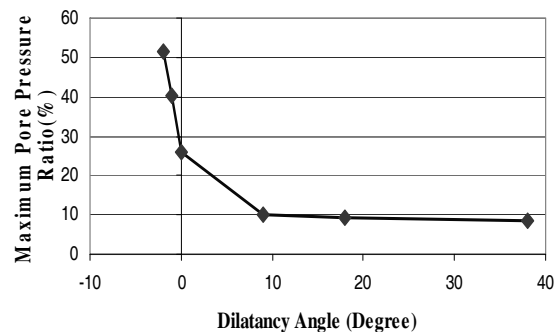
با روش به کار رفته در این تحقیق، می‌توان امکان ساخت سدهای خاکی، به ویژه سدهای کوتاه واقع بر مصالح



شکل ۱۰ بیشینه کرنش برشی پلاستیک (%) در برابر تغییرات زاویه اتساع (درجه)



شکل ۱۱ فرونشست تاج سد (متر) در برابر تغییرات زاویه اتساع (درجه)



شکل ۱۲ بیشینه تاریخچه نسبت فشار آب حفره‌ای (%) سد (متر) در برابر تغییرات زاویه اتساع (درجه)

- [5] Byrne P., 1991, "A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand", In proceeding: 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp 1-24, 47-55.
- [6] Clough Ray W., and Penzien Joseph, 1995, "Dynamics of Structures", Computers & Structures, Inc.
- [7] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities, Tokyo, Japan, 2002, pp 420.
- [8] Ozkan M. Yener, 1998, "A Riview of Consideration on Seismic Safety of Embankments and Earth and Rock-fill Dams", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 17, 439-458
- [9] Seed H. B., Makdisi Faiz, and DeAlba P., (1978), "Performance of Earth Dams during Earthquakes", J. Geotech., Div. ASCE, 104-967-995

طبیعی آبرفت رودخانه را با انجام تحلیل‌های دقیق روانگرایی و پایداری پی مورد مطالعه قرار داد. لازم است توضیح داده شود که این مسأله برای شرایط کشور ایران اهمیت به‌سزایی دارد، زیرا در بیشتر موارد، طراحان به دلیل عدم شناخت کافی از پاسخ دینامیکی سد و پی در برابر زلزله‌های محتمل، نسبت به برداشت مصالح آبرفتی تا اعماق زیاد، برای رسیدن به سنگ بستر بسیار مقاوم اقدام می‌کنند.

#### ۷- منابع

- [1] Marcuson W. F., Hadala P. F., and Led-better R. H, "Seismic Rehabilitation of Earth Dams", J.Geotech., Div. ASCE, (1996), pp7-20.
- [2] Kramer Steven L, 1996 Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall,.
- [3] Manual of FLAC Ver.4.0, Dynamic Analysis, Itasca Consulting Group Inc, 2001.
- [4] Finn W.D.L., Lee W., and Martin G. R., 1977, An Effective Stress Model for Liquefaction, J. Geotech., Div. ASCE, GT6-517-533,.