

# بررسی اثر ماکزیمم شتاب زلزله (PGA) بر تغییرشکل‌های حاصل از آنالیز دینامیکی، در نقاط مختلف سد خاکی

دکتر احمد رضا محبوبی اردکانی، استادیار دانشگاه صنعت آب و برق عباسپور، گروه مهندسی آب

دکتر عباس مهدویان، استادیار دانشگاه صنعت آب و برق عباسپور، گروه مهندسی آب

محمد حسن عبدی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه صنعت آب و برق عباسپور

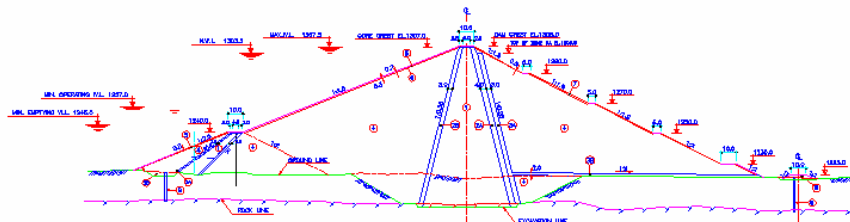
## چکیده:

تحلیل دینامیکی سدهای خاکی به کمک نرم‌افزارهای کامپیوتری از اواسط دهه ۶۰ میلادی آغاز شد. ابتدا پارامترهای مقاومتی خاک را مقادیر ثابتی در نظر می‌گرفتند که خطای زیادی وارد محاسبات می‌شد. به تدریج برنامه‌ها کامل‌تر شدند و این سیر تکامل هنوز هم ادامه دارد تا هرچه بهتر بتوانند رفتار واقعی سد (از جمله نیروی زلزله و رفتار مصالح در حین ارتعاش) را مدل کنند. امروزه، محققان این امکان را پیدا کرده‌اند تا با انجام مطالعاتی بر پارامترهای موثر در رفتار دینامیکی سازه‌ها، روابط ساده‌ای را جهت تخمین سریع و دقیق این پارامترها جهت مطالعات مقدماتی ارائه دهند. این پارامترها نه تنها به هندسه و خصوصیات مصالح سازه بلکه به خصوصیات حرکت و جنبش زمین (حرکت نیرومند زمین) نیز مرتبط هستند. به عبارت دیگر در پاسخ دینامیکی سازه‌ها در کنار پارامترهای مربوط به هندسه و خصوصیات مصالح، پارامترهای حرکت زمین نیز اثرات چشمگیر دارند که در این تحقیق سعی شده است اثر یکی از این پارامترها (PGA) بر پاسخ سدهای خاکی بررسی شود. همچنین لازم به ذکر است از نرم افزار FLAC برای انجام آنالیز دینامیکی و برآورد تغییر شکلها، استفاده شده است و برای مدل کردن رفتار مصالح از مدل الاستو پلاستیک موهر-کولمب استفاده شده است.

**کلید واژه:** سد خاکی، برآورد ایمنی، آنالیز دینامیکی، غیر خطی، لرزه‌ای، ماکزیمم شتاب زلزله.

**۱- مقدمه:** آنالیز دینامیکی غیر خطی سد خاکی مستلزم تعریف یک داده ورودی لرزه‌ای که شامل چندین پارامتر است، می‌باشد. ورودی‌های لرزه‌ای باید در قالب چندین شتابنگاشت یک زلزله واقعی (زلزله طرح) باشد. این امر به خاطر مدل کردن رفتار مصالح تشکیل دهنده و مسیر تنش و وابستگی آنها، پیچیده می‌باشد و معمولاً منجر به انتخاب چندین شتابنگاشت (برای این نوع آنالیز) می‌شود. رکوردهای طبیعی باید برای یک سری شرایط ویژه اصلاح شود و در بعضی از حالت‌ها از شتابنگاشت‌های مصنوعی برای مدل کردن حرکت زمین استفاده شود. همچنین پارامترهای ویژه هر شتابنگاشت ممکن است منجر به اختلاف فاحشی در پیشگویی پاسخ سازه شود. این تحقیق بر روی تاثیر یکی از پارامترهای منحنی شتابنگاشت (ماکزیمم شتاب زلزله ورودی PGA)، بر روی تغییر شکل‌ها و بزرگنمایی در تحلیل دینامیکی سد خاکی می‌باشد.

**۲- مشخصات مدل:** برای بررسی تاثیر ماکزیمم شتاب زلزله ورودی روی تغییرشکل‌های ناشی از زلزله، سد ماملو به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. سد ماملو، سد خاکی با هسته رسی و با ارتفاع ۸۶ متر از بستر رودخانه و طول تاج نیز ۸۰۷ متر می‌باشد. ارتفاع نرمال آب در تراز حدود ۸۱/۵ متری سد می‌باشد و سد در بزرگترین مقطع دارای عرض ۲۰۰ متر می‌باشد. در شکل ۱ مقطع عرضی سد ماملو و در جدول ۱ نیز خصوصیات مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح آورده شده است.



(شکل ۱) - مقطع عرضی سد ماملو

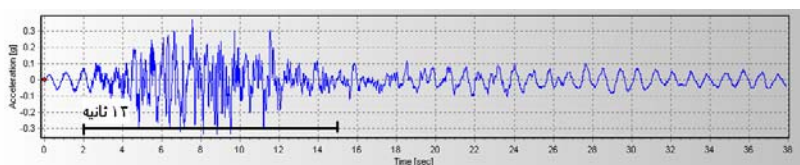
جدول ۱- خصوصیات گروه های مختلف مصالح

مصالح	ویژگی	پوسته	پی	هسته	زهکش
وزن مخصوص مرطوب ( $kN/m^3$ )	۲۱/۵	۲۱/۵	۲۱/۵	۲۰/۵	۲۰
مدول الاستیسیته (MPa)	۱۰۰	۸۰	۸۰	۷۵	۸۰
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۳
چسبندگی (kPa)	۰	۰	۰	۲۰	۰
زاویه اصطکاک داخلی	۴۲	۳۶	۳۶	۲۶	۳۶
زاویه اتساع	۰	۰	۰	۰	۰
تخلخل	۰/۳	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳	۰/۳۸

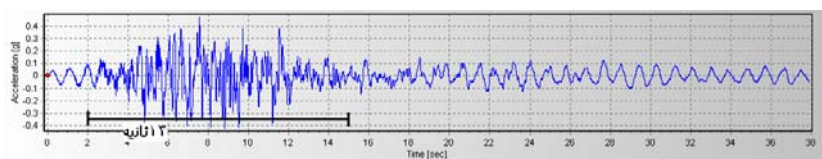
برای بررسی اثر ماکزیمم شتاب زلزله بر روی تغییر شکلهای، باید از شتابنگاشتهایی استفاده شود که دارای محتوی فرکانسی و مدت زمان موثر و انرژی تقریباً یکسان، و ماکزیمم شتابهای مختلف باشند.

## ۱-۲- معرفی شتابنگاشتها

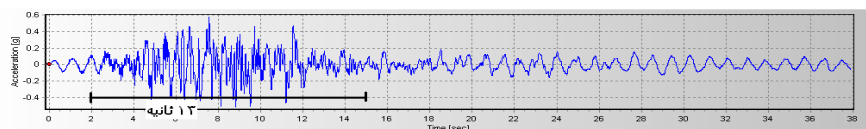
در این بخش از شتابنگاشتهایی با ماکزیمم شتابهای  $0.38g$  و  $0.48g$  و  $0.58g$ ، استفاده شد. در شکل‌های (۲) تا (۴) این شتابنگاشتها اعمال شده است. در ضمن مدت زمان موثر تمامی شتابنگاشتهای ارایه شده در این بخش ۱۳ ثانیه می‌باشد.



(شکل ۲) - شتابنگاشت اعمالی با ماکزیمم شتاب  $0.38g$



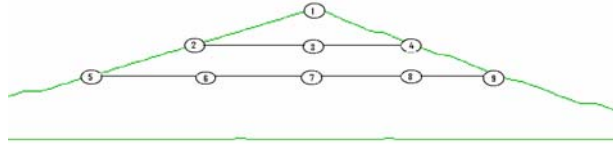
(شکل ۳) - شتابنگاشت اعمالی با ماکزیمم شتاب  $0.48g$



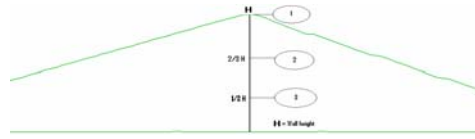
(شکل ۴) - شتابنگاشت اعمالی با ماکزیمم شتاب  $0.58g$

## ۲-۲- معرفی نقاط مشخص شده روی سد برای بررسی تغییر شکلهای

در این قسمت یکسری نقاط روی سد مشخص می‌کنیم (این نقاط در قسمتهایی از سد که تغییر شکل آنها مهم و کنترل کننده رفتار سد در هنگام زلزله می‌باشد مانند تاج سد، وسط ارتفاع سد و در نقاطی روی شیبهای پائین دست و بالا دست سد انتخاب شده‌اند). در شکل (۵) نقاط مشخص شده برای مقایسه تغییر شکلهای افقی و در شکل (۶) نقاط مشخص شده برای مقایسه تغییر شکلهای عمودی نشان داده شده‌اند.



شکل ۵- نقاط مشخص شده روی سد برای کنترل تغییر شکلهای افقی



شکل ۶- نقاط مشخص شده روی سد برای کنترل تغییر شکلهای عمودی

### ۳- روش تحلیل:

بطور کلی انجام آنالیز را در ۳ گام می توان خلاصه نمود:

۱- برقراری حالت اولیه تنش در سد خاکی و پی آن پس از ساخت اولیه

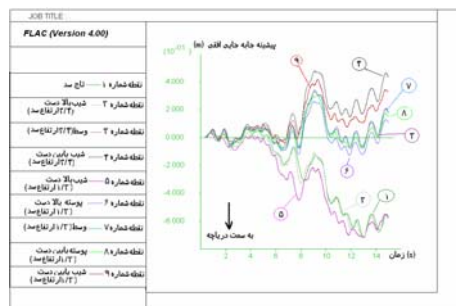
۲- برقراری حالت اولیه تنش وقتی که ارتفاع آب مخزن در بالاترین مقدار حالت بهره برداری است.

۳- انجام آنالیز لرزه ای با ماکزیمم شتابهای مختلف انتخاب شده

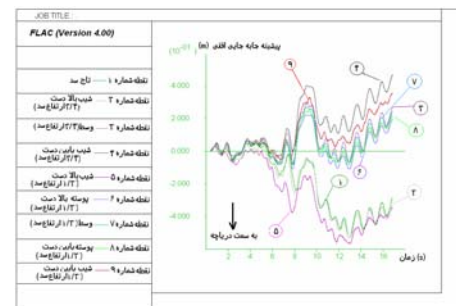
مدل رفتاری ساده الاستو پلاستیک مبتنی بر معیار موهر- کولمب برای بیان رابطه تنش - کرنش خاک و نیز میرایی رایلی برای افزایش سطح میرایی هیسترتیک و جبران کمبود میرایی هیسترتیک در تحلیل ها به کار گرفته شده اند. برای تخصیص پارامترهای میرایی از نتایج آنالیز مودال که با استفاده از نرم افزار SAP 2000 انجام شده، استفاده شده است و  $f_{min}$  سد مذکور برابر با ۰/۹۸HZ بدست آمد.

### ۴- بررسی تغییر شکلهای

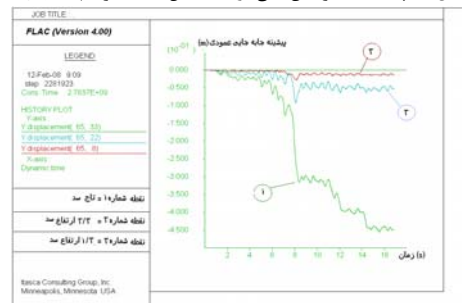
در جداول (۲) تا (۷) به ترتیب برای تک تک نقاط مشخص شده در شکل (۵) و (۶) برای تغییر شکلهای افقی و عمودی ناشی از ماکزیمم شتابهای ۰/۳۸g و ۰/۴۸g و ۰/۵۸g و شکلهای ۷ تا ۱۲ نیز نمودار تغییر شکلهای نقاط مذکور را نشان می دهد.



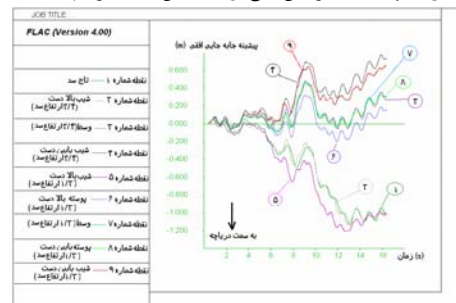
شکل ۸- پیشینه تغییر مکان افقی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب ۰/۴۸g)



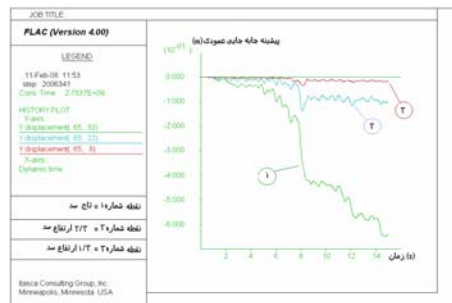
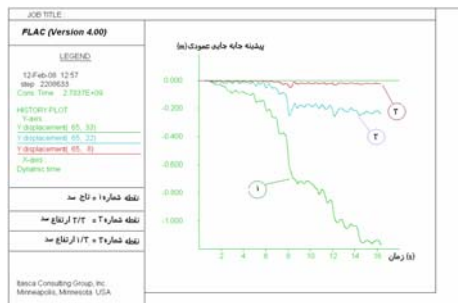
شکل ۷- پیشینه تغییر مکان افقی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب ۰/۳۸g)



شکل ۱۰- پیشینه تغییر مکان عمودی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب ۰/۳۸g)



شکل ۹- پیشینه تغییر مکان افقی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب ۰/۵۸g)



شکل (۱۱) پیشینه تغییر مکان عمودی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب  $g/0.48$ ) شکل (۱۲) پیشینه تغییر مکان عمودی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب  $g/0.58$ )

(جدول ۲) - مقادیر ماکزیمم تغییر شکل عمودی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب  $g/0.38$ )

شماره نقطه	محل مورد نظر	ماکزیمم نشست	ماکزیمم نشست در کل نقاط
۱	تاج سد	۰/۴۷	۰/۴۷
۲	ارتفاع ۲/۳ سد	۰/۰۹	
۳	ارتفاع ۱/۳ سد	۰/۰۳	

(جدول ۳) - مقادیر ماکزیمم تغییر شکل عمودی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب  $g/0.48$ )

شماره نقطه	محل مورد نظر	ماکزیمم نشست	ماکزیمم نشست در کل نقاط
۱	تاج سد	۰/۶۵	۰/۶۵
۲	ارتفاع ۲/۳ سد	۰/۱۳	
۳	ارتفاع ۱/۳ سد	۰/۰۴	

(جدول ۳) - مقادیر ماکزیمم تغییر شکل عمودی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب  $g/0.58$ )

شماره نقطه	محل مورد نظر	ماکزیمم نشست	ماکزیمم نشست در کل نقاط
۱	تاج سد	۱/۱۶	۱/۱۶
۲	ارتفاع ۲/۳ سد	۰/۲۶	
۳	ارتفاع ۱/۳ سد	۰/۰۸	

(جدول ۴) - مقادیر ماکزیمم و ماندگار تغییر شکل افقی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب  $g/0.38$ )

شماره نقطه	محل مورد نظر	ماکزیمم (m)	ماندگار (m)	ماکزیمم کل نقاط (m)
۱	تاج سد	-۰/۵۴	-۰/۲۸	-۰/۵۸
۲	شیب بالا دست (ارتفاع ۳/۴ سد)	-۰/۵۴	-۰/۳۱	
۳	وسط سد (ارتفاع ۳/۴ سد)	+۰/۳۱	+۰/۲۸	
۴	شیب پایین دست (ارتفاع ۳/۴ سد)	+۰/۴۸	+۰/۴۸	
۵	شیب بالا دست (ارتفاع ۱/۲ سد)	-۰/۵۸	-۰/۳۵	
۶	پوسته بالادست (ارتفاع ۱/۲ سد)	+۰/۲	+۰/۲	
۷	وسط سد (ارتفاع ۱/۲ سد)	+۰/۳۷	+۰/۲۴	
۸	پوسته پایین دست (ارتفاع ۱/۲ سد)	+۰/۲۵	+۰/۲۲	
۹	شیب پایین دست (ارتفاع ۱/۲ سد)	+۰/۳۶	+۰/۳۶	

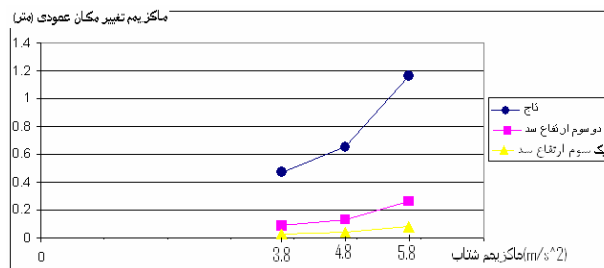
(جدول ۵) - مقادیر ماکزیمم و ماندگار تغییر شکل افقی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب  $g = 0.48$ )

شماره نقطه	محل مورد نظر	ماکزیمم (m)	ماندگار (m)	ماکزیمم کل نقاط (m)
۱	تاج سد	-۰/۷۲	-۰/۵۶	-۰/۷۲
۲	شیب بالا دست (۳/۴ ارتفاع سد)	-۰/۷۲	-۰/۵۸	
۳	وسط سد (۳/۴ ارتفاع سد)	+۰/۳۵	+۰/۱۹	
۴	شیب پایین دست (۳/۴ ارتفاع سد)	+۰/۴۶	+۰/۴۴	
۵	شیب بالا دست (۱/۲ ارتفاع سد)	-۰/۷۲	-۰/۵۵	
۶	پوسته بالادست (۱/۲ ارتفاع سد)	+۰/۲۶	+۰/۱۲	
۷	وسط سد (۱/۲ ارتفاع سد)	+۰/۳۳	+۰/۱۹	
۸	پوسته پایین دست (۱/۲ ارتفاع سد)	+۰/۳۰	+۰/۱۶	
۹	شیب پایین دست (۱/۲ ارتفاع سد)	+۰/۴۱	+۰/۳۳	

(جدول ۶) - مقادیر ماکزیمم و ماندگار تغییر شکل افقی در نقاط معین شده (ماکزیمم شتاب  $g = 0.58$ )

شماره نقطه	محل مورد نظر	ماکزیمم (m)	ماندگار (m)	ماکزیمم کل نقاط (m)
۱	تاج سد	-۱/۱۳	-۱/۰۲	-۱/۲
۲	شیب بالا دست (۳/۴ ارتفاع سد)	-۱/۱۱	-۱/۰۴	
۳	وسط سد (۳/۴ ارتفاع سد)	+۰/۴۸	+۰/۲۸	
۴	شیب پایین دست (۳/۴ ارتفاع سد)	+۰/۷۴	+۰/۶۶	
۵	شیب بالا دست (۱/۲ ارتفاع سد)	-۱/۲	-۱	
۶	پوسته بالادست (۱/۲ ارتفاع سد)	+۰/۳۳	+۰/۱۸	
۷	وسط سد (۱/۲ ارتفاع سد)	+۰/۴۸	+۰/۳	
۸	پوسته پایین دست (۱/۲ ارتفاع سد)	+۰/۴۵	+۰/۳	
۹	شیب پایین دست (۱/۲ ارتفاع سد)	+۰/۶۵	+۰/۶۵	

در شکل (۱۲) تغییر مکان عمودی ماکزیمم در نقاط ۱ و ۲ و ۳ برای ماکزیمم شتابهای مختلف آمده است.

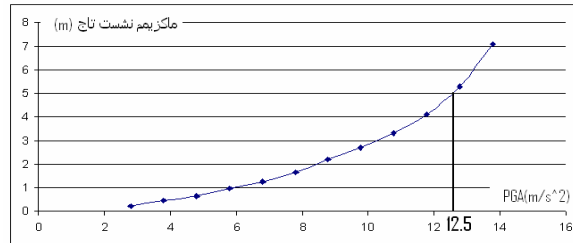


(شکل ۱۲) - مقایسه تغییر مکان عمودی ماکزیمم در نقاط ۱ و ۲ و ۳ برای ماکزیمم شتابهای مختلف

## ۵- تخمین یک شاخص اولیه پایداری

در این قسمت با انجام تعداد کافی آنالیز با ماکزیمم شتابهای مختلف، و رسم نمودار ماکزیمم تغییر مکان ماندگار سد در مقابل PGA، یک شاخصی برای تخمین حد اولیه پایداری (به صورت تقریبی)، پیدا می کنیم. (ذکر این نکته ضروری

است که همانطور که قبلا نیز گفته شد، چندین عامل در پایداری سد خاکی موثر هستند، ما در این بخش برای مطالعه پارامتریک، فقط عامل خرابی سد در اثر آنگذری از روی تاج را در نظر قرار داده و از سایر عوامل چشم پوشی کردیم. بنابراین مقادیر به دست آمده بصورت حدودی می باشند. شکل (۱۳) نمودار ماکزیمم تغییر مکان ماندگار سد در مقابل PGA را نشان می دهد. با توجه به شکل ملاحظه می شود بازا شتاب  $2 \frac{m}{s^2}$   $12/5$  نشست تاج برابر با ارتفاع آزاد سد می شود. بنابراین می توان یک مقدار تقریبی برای ماکزیمم شتاب مورد تحمل سد تعیین کرد.



(شکل ۱۳) - نمودار ماکزیمم تغییر مکان ماندگار سد در مقابل PGA

## ۶- نتیجه گیری:

- از مطالعه و بررسی روی اثر ماکزیمم شتابهای زلزله ورودی روی تغییر شکلهای، ملاحظه گردید با اینکه تغییر شکلهای به طور عمومی افزایش می یابد، رژیم تغییر شکلهای در نقاط مختلف سد تغییر چندانی نکرد و همچنین محل تغییر شکل ماکزیمم در بین نقاط مورد بررسی نیز تغییر نکرد.
- یکی دیگر از نتیجه های بدست آمده، معرفی شاخص گسیختگی (بر مبنای ماکزیمم شتاب بوجود آورنده نشست معادل با ارتفاع آزاد سد)، می باشد. بدینصورت که با رسم نمودار ماکزیمم شتابهای زلزله ورودی در مقابل ماکزیمم نشست تاج سد (که یکی از عوامل گسیختگی سدها در زلزله است)، ماکزیمم شتابی را که نشست معادل با ارتفاع آزاد بوجود می آورد، بدست می آوریم.
- 

## ۷- منابع و مأخذ

- Ambraseys, N. N., "On the shear response of a two-dimensional truncated wedge subjected to an arbitrary disturbance," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 50. No. 1, pp. 45-56, 1960.
- Das, B. M., "Principles of soil dynamics," Pws-Kent Publishing Co., Boston, 1993.
- Finn, W. D. L., "Dynamic analysis in geotechnical engineering," Earthquake Engineering and Soil Dynamics II: Recent Advances in Ground-motion Evaluation, Geotechnical Special Publication 20, ASCE, New York, pp. 523-591, 1988.
- Gazetas, G., "Seismic response of earth dams: some recent developments," Journal of Soil Dynamic and Earthquake. Eng., Vol. 6, No. 1, pp. 2-47, 1987.
- Idriss, I. M. & Seed, H. B., "An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco earthquake," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 6, pp. 2013-2032, 1968.
- Itasca Consulting Group, Inc, "Fast Lagrangian Analysis of Continua Ver. 4.0, User'S Guide," Minnesota, USA, 2001.