



## بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی بتنی

حمید سلطانی محمدی<sup>۱</sup>، فیاض رحیم زاده رفویی<sup>۲</sup>  
۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، گرایش زلزله، دانشگاه صنعتی شریف  
۲. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

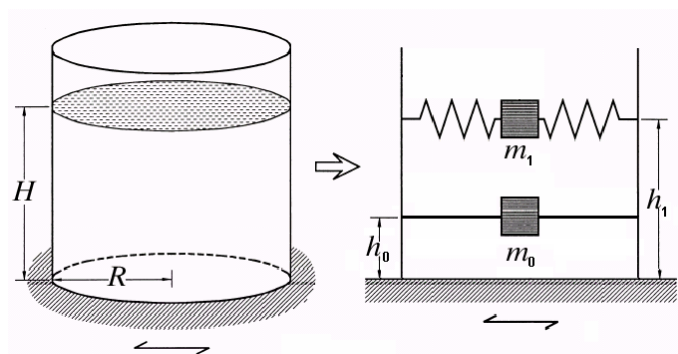
### چکیده

در این مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود، رفتار دینامیکی مخازن هوایی بتنی با تاکید بر پاسخ لرزه‌ای آنها مورد بررسی قرار گرفته است. سیال درون مخزن با المانهای سیال مبتنی بر پتانسیل نرم افزار ADINA مدل شده‌اند. نتایج تحلیلهای مودی برای مخزن با ارتفاعهای مختلفی از سیال ارائه شده است. در تحلیلهای تاریخچه زمانی، تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل محتوای فرکانسی رکورد و میزان پر و خالی بودن مخزن روی پارامترهایی مانند برش پایه، لنگر واژگونی، فشار هیدرودینامیک و ارتفاع امواج سطحی بررسی شده است. در ادامه اثر خاک در رفتار مخازن هوایی بررسی شده‌است. اثر سختی و نرمی خاک روی مخازن نیمه‌پر و پر و همچنین تاثیر رفتار غیرخطی خاک مطالعه شده‌است.

**کلید واژه‌ها:** مخازن هوایی، اندرکنش آب و سازه، اندرکنش خاک و سازه، امواج سطحی، فشار هیدرودینامیک.

## مقدمه

مخازن سازه‌هایی هستند که جهت ذخیره کردن مایعات مختلفی مانند آب، فرآورده‌های نفتی و مواد شیمیایی از آنها استفاده می‌شود. با تخریب مخازن آب، تامین آب شرب، امداد رسانی و اطفاء حریق با مشکل روبرو می‌شود. آسیب دیدن مخازن نفتی و مواد شیمیایی سبب ایجاد آتش‌سوزی‌های گسترده و نشت مواد سمی و آلودگی در محیط زیست خواهد شد. از نظر وضعیت استقرار، مخازن به سه گروه کلی هوایی، زمینی و مدفون تقسیم می‌شوند. در این مطالعه به بررسی رفتار مخازن هوایی بتنی در برابر زلزله پرداخته شده است. برای مقاصد عملی، استفاده از یک روش ساده که با تقریب مناسب رفتار سیال درون مخزن را مدل کند و نیازمند مدل‌های پیچیده کامپیوتری نباشد، اجتناب‌ناپذیر است. اولین مدل مکانیکی توسط هاوژنر [۱] برای مخازن زمینی با جداره صلب پیشنهاد شد که با وجود فرضیات ساده کننده، هنوز مورد تایید آیین‌نامه‌های طراحی مخازن می‌باشد. این مدل آب را به دو بخش ضربانی و نوسانی تقسیم می‌کند (شکل ۱). برای مخزن به شعاع  $R$  و ارتفاع  $H$  و جرم سیال  $M$ ، بخش ضربانی به صورت صلب و بخش نوسانی با سختی مشخص به مخزن وصل شده است. روابط تعیین جرم و ارتفاع این دو بخش در کتب و آیین‌نامه‌های مختلف آمده است.



شکل ۱- مدل هاوژنر

## تحلیل مدل اندرکنش سیال و سازه

با توجه به پیچیدگی رفتار سیالات، در مطالعه رفتار دینامیکی آنها ساده‌سازیهایی انجام می‌شود. فرض می‌شود که مایع ایده‌آل و همگن است، اثر ویسکوزیته آن قابل اغماض است، دامنه امواج کوچک است و از آشفتگی در جریان صرف‌نظر می‌شود. معادلات حاکم بر دینامیک سیالات شامل قوانین بقای جرم و بقای اندازه حرکت هستند که به رابطه زیر منجر می‌شوند که معادله اساسی ارتعاش سیالات تراکم‌پذیر معروف به معادله هلمهولتز می‌باشد.

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

که  $\phi$  تابع پتانسیل سرعت است ( $V = -\nabla \phi$ ) و  $C = \sqrt{K/\rho}$  صوت در سیال است. فشار سیال دارای دو مولفه استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. در محل تماس سیال و سازه، سرعت دو محیط در راستای عمود بر سطح مساوی می‌باشد:

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_{Fluid} = (\mathbf{v}_n)_{Structure} \quad (2)$$

در سطح آزاد سیال رابطه زیر با فرض تغییر مکانهای کوچک برقرار است:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

بر اساس روابط بالا المانهای مبتنی بر پتانسیل را فرمول بندی می‌شوند و شرایط مرزی آنها تعیین می‌شود. این المانها در نرم‌افزارهای اجزای محدود مانند ANSYS و ADINA قابل به کارگیری می‌باشد. ماتریسهای سختی و جرم در نرم‌افزار ANSYS برای این المان نامتقارن می‌باشد و بنابراین تعامد مدهای ارتعاشی وجود ندارد [۲]. از طرفی امکان بررسی تغییرمکان سطح آزاد سیال وجود ندارد. در حالیکه در ADINA ماتریسهای سختی و جرم المان متقارن هستند و با تعریف المانهای واسط روی سطح آزاد سیال، امکان بررسی تغییرمکان سطح آزاد سیال وجود دارد [۳]. جنس مصالح پایه و جداره از بتن با رفتار خطی انتخاب شده است. در جدول ۱ مشخصات مصالح و در جدول ۲ هندسه مدل آمده است.

جدول ۱- خواص مصالح مدل

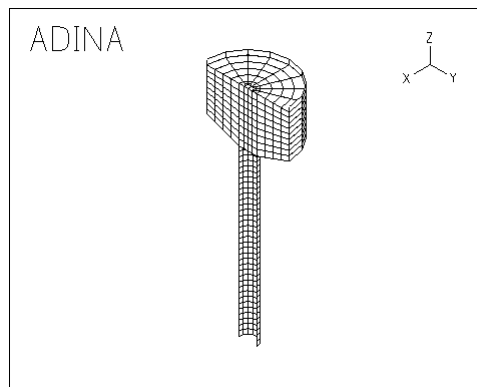
| بتن             | سیال (آب)              |
|-----------------|------------------------|
| مدول الاستیسیته | 20 GPa                 |
| جرم حجمی        | 2500 kg/m <sup>3</sup> |
| نسبت پواسون     | 0.3                    |
|                 | مدول بالک              |
|                 | جرم حجمی               |
|                 | 2.1 GPa                |
|                 | 1000 kg/m <sup>3</sup> |

جدول ۲- هندسه مدل

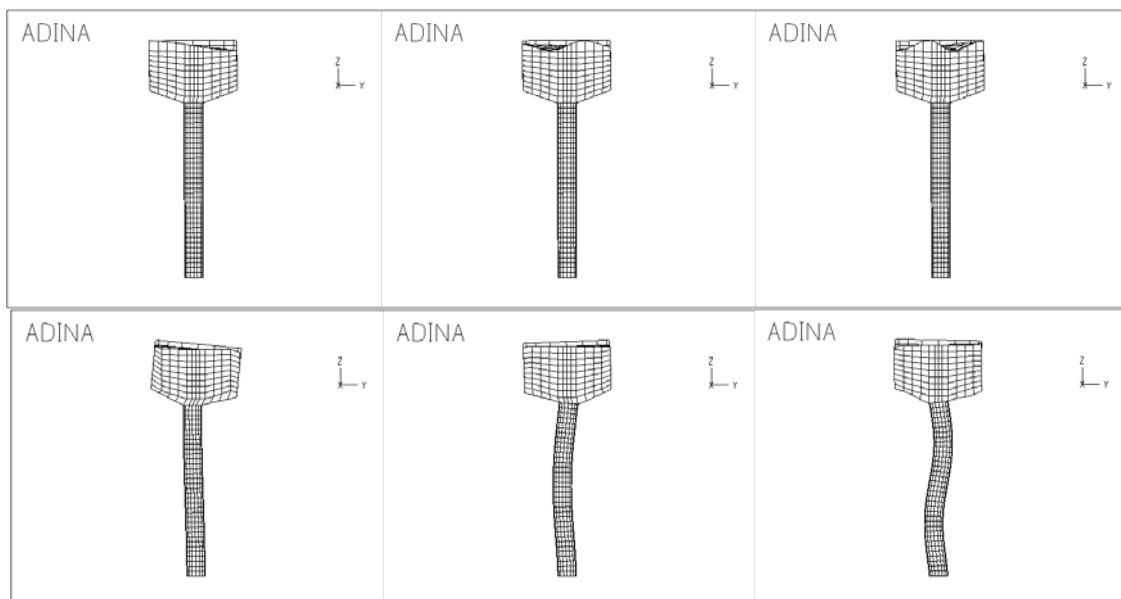
| پایه             | مخزن        |
|------------------|-------------|
| ارتفاع           | 28 m        |
| ارتفاع کف شیبدار | 2 m         |
| قطر جداره        | 3 m         |
| ارتفاع دیواره    | 8 m         |
| ضخامت جداره      | 50 cm       |
|                  | شعاع جداره  |
|                  | 7 m         |
|                  | ضخامت جداره |
|                  | 30 cm       |

### تحلیل مودال

با توجه به تقارن سیستم تنها نیمی از آن مدل شده است و شرایط مرزی متناسب با تقارن در مرزهای مدل مورد استفاده قرار گرفته است. بخش زیرین مخازن هوایی بتنی دارای شیب کمی می‌باشد که به منظور کم کردن تنشها و تغییر مکانهای جداره تحت اثر بارثقلی مخزن و انتقال مناسب‌تر آن به پایه در نظر گرفته می‌شود. سقف مخازن بتنی معمولاً از مصالح سبک مانند پوششهای ورق موجدار و عایق حرارتی قرار گرفته بر روی لایه‌های فلزی تشکیل شده که با توجه به ناچیز بودن سختی و جرم آن در مقایسه با جداره بتنی و سیال، از مدل کردن آن صرف نظر شده است. مدل سازه‌ای (شکل ۲) در دو حالت پرشدگی ۲۰٪ و ۹۰٪ مخزن مورد تحلیل مودال قرار گرفته است. مودهای اصلی مخزن با ۹۰٪ پرشدگی در شکل ۳ نشان داده شده اند. فرکانسها و نسبت جرم موثر مودی به جرم کل (جدول ۳) نشان می‌دهند که برخلاف مدل‌های مکانیکی معادل تعداد مودهای نوسانی سهیم در پاسخ دینامیکی سیستم بیش از یکی می‌باشد. علت این مساله تداخل مودهای سازه‌ای مخزن هوایی با مودهای نوسانی آب است. به علت رفتار طره‌ای، خازن هوایی پیروی مودهای سازه‌ای بالا و نزدیک به مودهای نوسانی سیال دارند.



شکل ۲- مدل اجزای محدود اندرکنش سیال و سازه



شکل ۳- مودهای اصلی مخزن ۹۰٪ پر

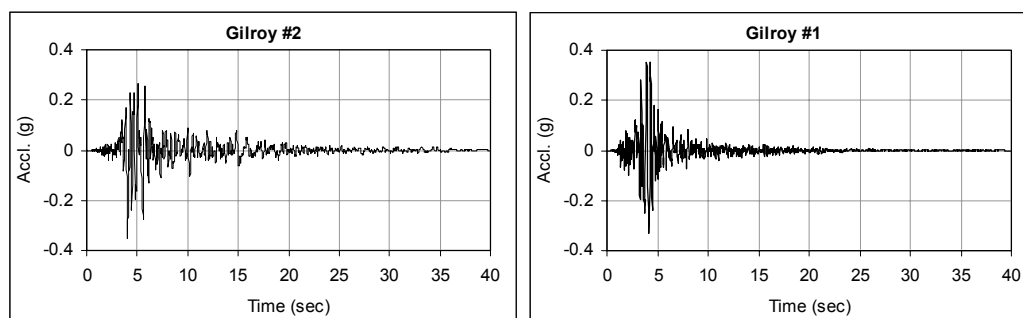
جدول ۳- فرکانس و نسبت جرم موثر مودهای اصلی مدل‌های سازه‌ای

| فرکانس / درصد سیال |       |       |       |         |                           |
|--------------------|-------|-------|-------|---------|---------------------------|
| 90%                |       | 20%   |       |         |                           |
| 0.23               | 50.6% | 0.19  | 33.8% | مود اول | فرکانس مودهای ضربانی (Hz) |
| 0.42               | 20.9% | 0.44  | 2.3%  | مود دوم |                           |
| 0.48               | 16.2% | 0.66  | 36.1% | مود سوم |                           |
| 2.99               | 4.9%  | 3.06  | 8.5%  | مود اول | فرکانس مودهای ضربانی (Hz) |
| 10.10              | 3.4%  | 10.17 | 6.0%  | مود دوم |                           |
| 25.50              | 1.2%  | 26.06 | 2.0%  | مود سوم |                           |

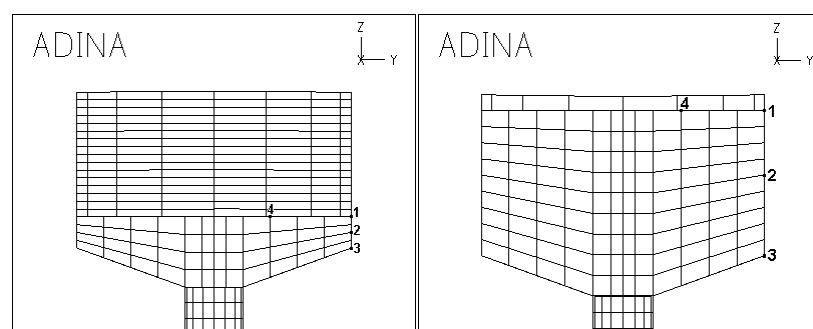
### تحلیل تاریخچه زمانی

در تحلیل‌های تاریخچه زمانی از دو رکورد Gilroy1 (ثبت شده روی خاک سخت) و Gilroy2 (ثبت شده روی خاک نرم) مربوط به زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) استفاده شده‌است. به منظور مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی، هر دو رکورد

به 0.35g مقیاس شده‌اند. این رکوردها در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. شرایط اولیه مدل در این حالت، پاسخ استاتیکی مدل تحت اثر نیروی گرانشی می‌باشد. میرایی ۵٪ برای المانهای جداره و پایه و میرایی ۰/۵٪ برای المانهای سیال طبق توصیه‌های آیین‌نامه‌های مختلف مربوط به مخازن در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴- رکوردهای مقیاس شده



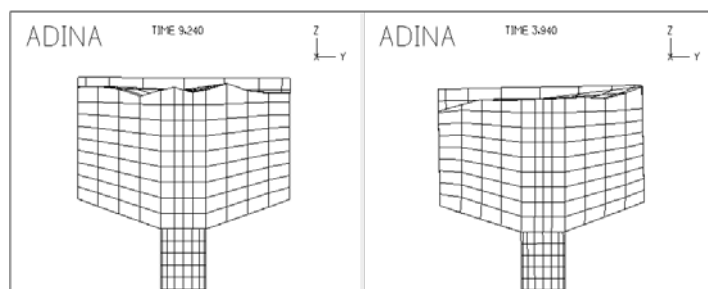
شکل ۵- گره‌های مورد استفاده سیال در نمودارها (مخازن با ۹۰٪ و ۲۰٪ پرشدگی)

جدول ۴- مقادیر حدی نتایج تحلیل تاریخچه زمانی

| Gilroy2 -20% | Gilroy1-20% | Gilroy2-90% | Gilroy1-90% | پارامترهای پاسخ / حالت   |
|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|
| 0.21         | 0.20        | 0.10        | 0.10        | نسبت برش پایه به وزن     |
| 5.12         | 3.27        | 1.45        | 1.19        | نسبت لنگر واژگونی به وزن |
| 94.4         | 36.1        | 32.2        | 14.0        | دامنه موج نقطه ۱         |
| 82.8         | 36.3        | 25.9        | 13.8        | دامنه موج نقطه ۴         |
| 9201         | 3480        | 3280        | 1397        | فشار هیدرودینامیک نقطه ۱ |
| 5552         | 4568        | 9863        | 8287        | فشار هیدرودینامیک نقطه ۲ |
| 9890         | 8460        | 12553       | 10683       | فشار هیدرودینامیک نقطه ۳ |

مقادیر حدی به دست آمده از تحلیلهای تاریخچه زمانی انجام شده (جدول ۴)، نشان می‌دهد که نسبت برش پایه به وزن برای مخزن با ۲۰٪ پرشدگی برای هر دو رکورد بیشتر از حالت مخزن با ۹۰٪ پرشدگی می‌باشد. علت این مساله را می‌توان در میزان انطباق فرکانس موده‌های ارتعاشی سیستم با محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله بررسی نمود. برش پایه مدلهای مورد استفاده با توجه حداکثر شتاب رکوردها (0.35g) پایین می‌باشد. علت این امر بالا بودن پریود موده‌های اصلی سیستم در مقایسه با محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله با توجه به طیف پاسخ رکوردها می‌باشد. دامنه امواج برای رکورد Gilroy2 که دارای فرکانس غالب پایینتری می‌باشد، بیشتر است. فشار هیدرودینامیکی نقطه ۱ که با توجه به قرار گرفتن روی سطح آزاد سیال به

مودهای نوسانی سیستم وابسته است، برای رکورد Gilroy2 (مربوط به خاک نرم) بیشتر است. عکس این مساله در مورد نقاط ۲ و ۳ که مودهای ضربانی بر آنها حاکم است برقرار می‌باشد.



شکل ۶- تغییر شکل سیال در زمانهای 3.94 و 9.24 (رکورد Gilroy1)

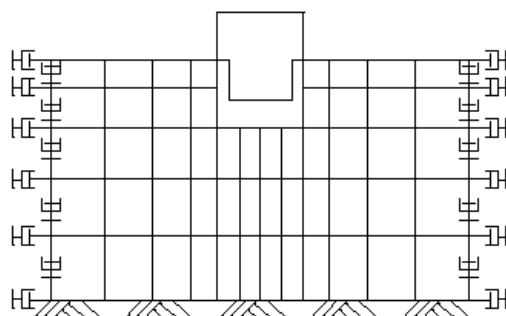
### تحلیل مدل اندرکنش خاک و سازه

اثر خاک در رفتار دینامیکی سازه‌ها می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد برای سازه‌های نرم و سبک که روی خاک سخت قرار گرفته‌اند، این اختلاف ناچیز است. در صورت افزایش جرم سازه یا سختی آن، اثر خاک قابل توجه می‌شود. این امر نشان می‌دهد که اندرکنش خاک و سازه در مخازن که عمدتاً جرم زیادی دارند می‌تواند تاثیر عمده‌ای در پاسخ دینامیکی سیستم داشته باشد. در این مطالعه از روش حل مستقیم استفاده شده است. در این روش خاک و سازه همزمان و در یک مدل مورد تحلیل قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه مدل کردن یک فضای نیمه‌بی‌نهایت به روش اجزای محدود امکانپذیر نیست، عملاً محیط خاک با تعداد محدودی المان در نظر گرفته می‌شود. در این حالت در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی در مرزهای خاک، از اهمیت بالایی در دقت تعیین پاسخ مساله برخوردار است. در مسائل استاتیکی از مقید کردن درجات آزادی (مرزهای صلب) برای این منظور استفاده می‌شود. در مسائل دینامیکی نیز می‌توان از این روش استفاده کرد، اما این مرزها سبب انعکاس موج می‌شوند و با تشدید غیرواقعی در پاسخ سیستم، خطاهای زیادی را به وجود می‌آورند به این ترتیب، نیاز به مدل کردن محیط بزرگتری از خاک و استفاده از تعداد المانهای بیشتری وجود دارد که از نظر محاسباتی نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی را خواهد بود. استفاده از مرزهای سازگار سعی در نزدیک کردن خصوصیات محیط خاک به خصوصیات یک محیط نیمه‌بی‌نهایت دارد به عنوان نمونه مرز لزج با روابط زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = a \cdot \rho \cdot v_p \cdot \dot{u} \quad (4)$$

$$\tau = b \cdot \rho \cdot v_s \cdot \dot{u} \quad (5)$$

که در آن  $\sigma$  و  $\tau$  تنش نرمال و برشی،  $\dot{u}$  و  $\ddot{u}$  سرعتهای نرمال و مماسی و  $a$  و  $b$  پارامترهای بی‌بعد هستند. می‌توان نشان داد که با در نظر گرفتن  $a=b=1$  مرز لزج قادر به جذب بیش از ۹۵٪ از انرژی ورودی است. دو رابطه بالا با قرار دادن میراگرهای متعامد روی گره‌های مرزی سیال (شکل ۷) قابل اعمال می‌باشند [۴].



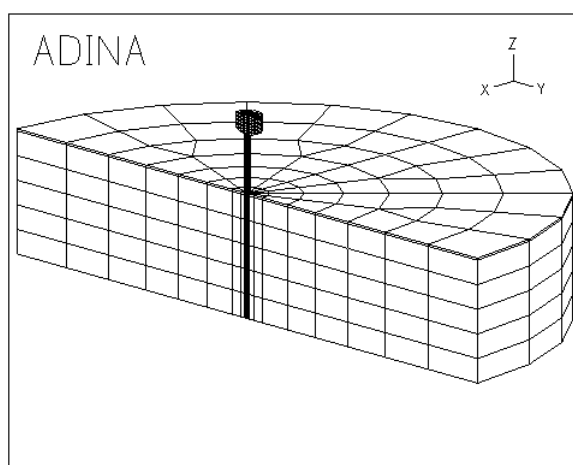
شکل ۷- نحوه به کارگیری

## مرز لزوج برای بررسی تحریک افقی زلزله

پریود حاکم بر لایه خاکی با سرعت موج برشی  $v_s$  و عمق  $d$  که روی بستر سنگی قرار گرفته است، از رابطه زیر محاسبه می‌شود که نقش موثری در محتوای فرکانسی رکورد اعمالی به سازه دارد:

$$T = \frac{4d}{v_s} \quad (6)$$

در این مطالعه از دو نوع محیط خاک با سرعتهای موج برشی ۱۰۰ و ۴۰۰ متر بر ثانیه استفاده شده است. این دو سرعت طبق آیین نامه ۲۸۰۰ به ترتیب در گروه خاک IV و II قرار می‌گیرند، یعنی اولی خاک نرم و دومی خاکی نسبتاً سخت محسوب می‌شود. فونداسیون به صورت دیسکی به شعاع ۱۰ متر با عمق ۱٫۵ متر و لایه خاک با شعاع ۱۵۰ متر مدل شده است. اجزای محدود مورد استفاده در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- مدل اجزای محدود اندرکنش خاک و سازه

برای محیط خاک ۵٪ میرایی در نظر گرفته شده است. برای المانهای خاک از دو رفتار الاستیک خطی و پلاستیک مور-کولمب استفاده شده است. در معیار تسلیم مور-کولمب مقدار تنش برش نهایی در صفحه تابعی از تنش نرمال موجود در آن صفحه می‌باشد:

$$\tau = \sigma \tan \phi + C \quad (9)$$

که در آن  $\phi$  و  $C$  زاویه اصطکاک ماده و چسبندگی آن می‌باشد که به ترتیب  $30^\circ$  و  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  فرض شده‌اند. در تحلیل‌های تاریخچه زمانی، رکورد به صورت تغییر مکان به پایین‌ترین لایه از گره‌های المانهای خاک اعمال می‌شود. مقادیر حدی نتایج تاریخچه زمانی برای مخازن تا ۹۰٪ و ۲۰٪ ارتفاع جداره پر تحت رکورد Gilroy1 در جداول ۵ و ۶ آمده‌اند.

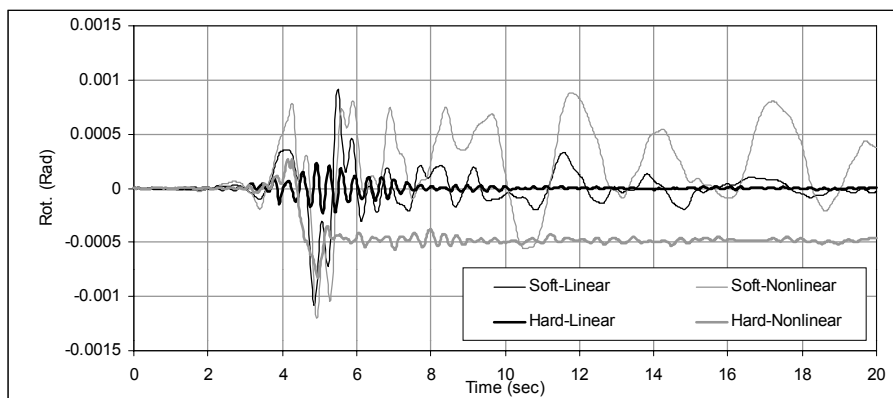
جدول ۵- مقادیر حدی نتایج تاریخچه زمانی (مخزن ۹۰٪ پر)

| پارامتر    | نرم خطی        | نرم غیرخطی | سخت خطی | سخت غیرخطی |
|------------|----------------|------------|---------|------------|
| شتاب       | 4.35           | 3.72       | 11.20   | 3.24       |
| تغییر مکان | 11.95          | 11.54      | 7.85    | 4.54       |
|            | $\text{m/s}^2$ |            |         |            |
|            | cm             |            |         |            |

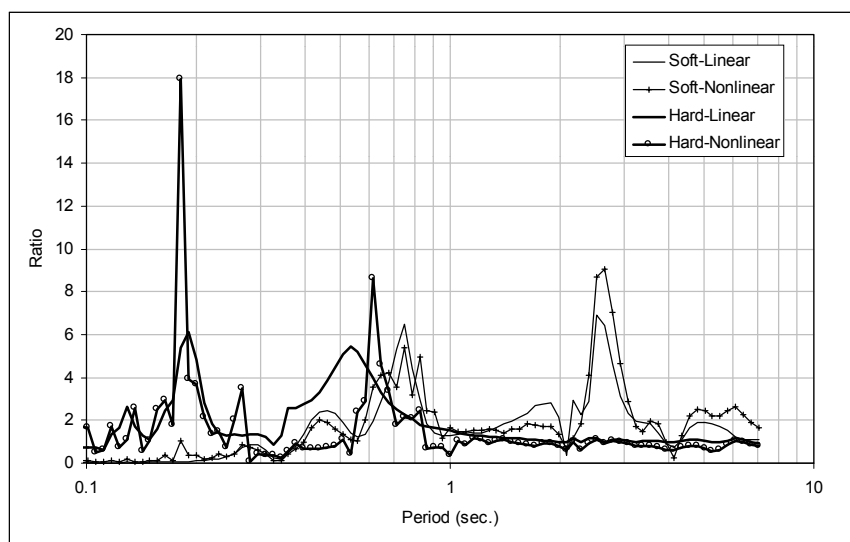
|        |        |        |        |      |                 |
|--------|--------|--------|--------|------|-----------------|
| 0.0477 | 0.0134 | 0.0686 | 0.0622 | Deg. | دوران فونداسیون |
| 0.13   | 0.41   | 0.19   | 0.27   |      | برش پایه به وزن |

جدول ۶- مقادیر حدی نتایج تاریخچه زمانی (مخزن ۲۰٪ پر)

| پارامتر              | نرم خطی | نرم غیر خطی | سخت خطی | سخت غیر خطی |
|----------------------|---------|-------------|---------|-------------|
| شتاب $m/s^2$         | 4.64    | 3.13        | 11.11   | 3.68        |
| تغییر مکان cm        | 9.64    | 13.29       | 1.23    | 1.55        |
| دوران فونداسیون Deg. | 0.2797  | 0.1972      | 0.2888  | 0.1277      |
| برش پایه به وزن      | 0.22    | 0.15        | 0.43    | 0.13        |

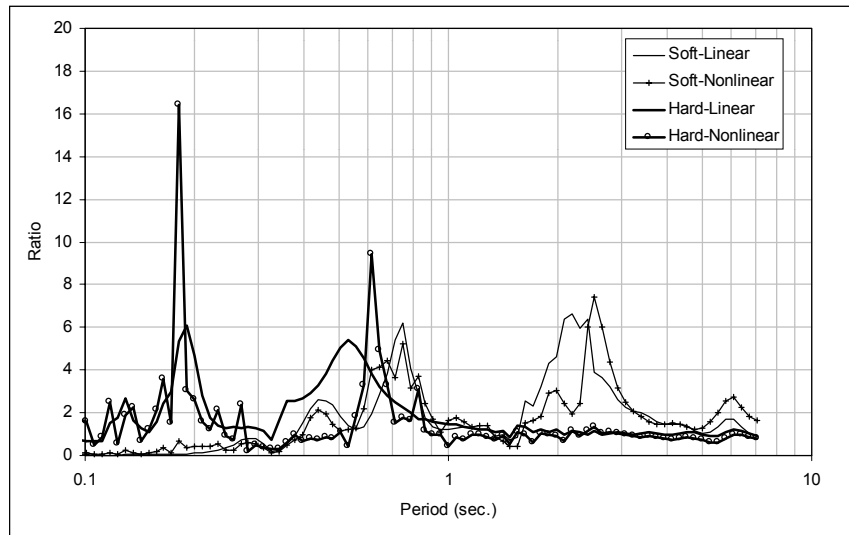


شکل ۹- دوران فونداسیون تحت Gilroy1 (مخزن با ۹۰٪ پرشدگی)



شکل ۱۰- منحنی نسبت طیف فوریه فونداسیون به رکورد ورودی (مخزن ۹۰٪ پر)





شکل ۱۱- منحنی نسبت طیف فوریه فونداسیون به رکورد ورودی (مخزن ۲۰٪ پر)

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با توجه به ماهیت رکورد ورودی که روی خاک سخت ثبت شده، لایه خاک سخت سبب افزایش شتاب و برش پایه سیستم شده‌است. در این حالت رفتار غیرخطی خاک سبب پایین آمدن این پارامترها به میزان قابل توجهی شده‌است، اما همانطور که تاریخچه پاسخها نشان می‌دهد با پایان یافتن زمان اعمال زلزله تغییرشکلهای پسماند پلاستیک در سیستم وجود خواهند داشت (شکل ۹). تغییر مکان پی روی لایه خاک نرم، همانگونه که انتظار می‌رود بیش از مقادیر مربوطه روی لایه خاک سخت است. طیف فوریه پاسخ تغییر مکان نقطه میانی و رویی فونداسیون که به سازه اعمال می‌شود، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده‌است. این نمودارها نشان می‌دهند که تشدید در نزدیکی پریودهای طبیعی خاک اتفاق می‌افتد. همچنین اثر خصوصیات دینامیکی مخزن در محتوای فرکانسی رکورد ورودی موثر است. برای مخزن با ۹۰٪ پرشدگی که موده‌ای با پریود بالا جرم موثر مودی بالایی دارند طیف فوریه برای پریودهای بالای ۲ ثانیه مقادیر بیشتری نسبت به مخزن با ۲۰٪ پرشدگی نشان می‌دهد. عکس این مساله برای پریودهای کمتر از ۰/۲ ثانیه مشاهده می‌شود.

## نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که تعداد مودهای ارتعاشی نوسانی موثر در رفتار دینامیکی مخازن با پایه و جداره شکل‌پذیر بر خلاف مدل‌های مکانیکی معادل بیش از ۱ می‌باشد. نزدیکی مودهای سازه و مودهای نوسانی سیال سبب به وجود آمدن مودهای ترکیبی می‌شود. در تحلیل‌های تاریخچه زمانی، رکوردهایی که فرکانس غالب پایین‌تری دارند مودهای نوسانی سیستم را که پریودهای نسبتاً بالایی دارند را تحریک و سبب به وجود آمدن امواج بلند و فشار هیدرودینامیکی زیاد در تراز سطح آزاد سیال می‌گردد. رکوردهایی که فرکانس غالب بالاتری دارند، با تحریک مودهای ضربانی باعث افزایش فشار هیدرودینامیکی در ترازهای پایین و همچنین کف مخزن می‌شوند. مخازن هوایی به علت مودهای ارتعاشی با پریودهای بالا برش پایه کمی نسبت به دیگر سازه‌ها در تحلیل‌های تاریخچه زمانی از خود نشان می‌دهند. در این مطالعه، حداکثر نسبت برش پایه به وزن سیستم بین 0.3 تا 0.6 حداکثر شتاب رکورد بود که در مقایسه با طیف‌های پاسخ که مقداری تا 2.5 برابر را ارائه می‌دهند، بسیار کمتر است. تحلیل مدل اندرکنش خاک و سازه نشان می‌دهد که خاک نرم سبب افزایش پاسخ مخازن پر نسبت به مخازن نیمه‌خالی می‌شود که عکس این مساله برای خاک سخت برقرار است. رفتار غیرخطی خاک عمدتاً باعث کاهش پاسخ مدل می‌شود.

## مراجع

1. Housner, G.W., "The Dynamic Behavior of Water Tanks", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 53, 1963, pp. 381-387
2. "ANSYS 6.1 Documentation", SAS IP, Inc., 2002.
3. "ADINA Theory and Modeling Guide", ADINA R & D, Inc., Report 00-7, Aug. 2000
4. Lysmer, J.; Kuhlemeyer R., "Finite Dynamic Model for Infinite Media". Eng. Mech. Div. ASCE, EM4, pages 859-577, 1969
۵. تحلیل لرزه‌ای مخازن مدفون، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، نادر عطاری، استاد راهنما: دکتر فیاض رحیم‌زاده، ۱۳۸۰
۶. بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی بتنی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، حمید سلطانی محمدی، استاد راهنما: دکتر فیاض رحیم‌زاده، ۱۳۸۳