

آنالیز دینامیکی حوزه زمان عملکرد مخازن مکعبی جداسازی شده نگهداری مایع با در نظر گرفتن اثرات انعطاف پذیری پوسته

حسین صفایی^۱، محمد رضا شکاری^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، واحد ابرکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ابرکوه، ایران.

۲- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی استهبان- دانشگاه شیراز، استهبان، ایران

(نویسنده مسئول) shekari.2291@gmail.com

چکیده

در مطالع حاضر، عملکرد لرزه‌ای مخازن مکعبی قرار داده شده بر روی سیستم میراگرهای جرمی تنظیم شده تحت اثر شتاب افقی زلزله مورد تحلیل قرار گرفته است. مدل اجزای محدود به کاررفته در این مطالعه که در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است، عبارت است از یک سازه مکعبی که قسمتی از حجم آن با مایع پر شده است. جهت شبیه سازی سازه میراگر، ستون هایی زیر منبع آب قرار داده شده است که به وسیله فنرهایی لاستیکی به جداره مخزن اتصال دارند. جهت مطالعه چگونگی تأثیرگذاری میراگرهای تنظیم شده بر پاسخ دینامیکی کل سیستم، مقادیر بیشینه پاسخ های برش پایه، لنگر واژگونی و ارتفاع موج سطح آزاد سیال مخزن با حالت میراگر، تحت تأثیر شتاب یک زلزله واقعی تحلیل شده و با مش بندی های مختلف با یکدیگر مورد تحلیل واقع شده اند. در ادامه تحلیل ها، نتایج آنالیز دینامیکی با مخزن هایی که بر روی میراگر واقع شده اند مقایسه شده است. پس از شناسایی فرکانس مطلوب جهت تنظیم میراگر الحاقی به مخزن مهار شده و تنظیم میراگر به این دوره تناوب، اثر تغییرات درصد جرمی میراگر و همچنین نوع اتصال به جداره مخزن بر عملکرد میراگر تحلیل شد و به این ترتیب، ساختار و درصد جرمی ایده آل برای کاهش پاسخ لرزه ای مخزن مهار شده معرفی گردید. بررسی تأثیر مفید میراگرهای جرمی تنظیم شده تحت شتاب های اعمالی مقیاس شده حاکی از بازدهی مؤثر این میراگرها در بهبود رفتار لرزه ای کل سیستم است. براساس نتایج این تحقیق، میراگر تنظیم شده در حالت ایده آل خود می تواند مقادیر پاسخ های برش پایه و لنگر واژگونی مخزن را به طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد، اما در کاهش بیشینه ارتفاع جریان سطح آزاد مایع، عملکرد وارونه دارد.

کلمات کلیدی: تحلیل لرزه ای، شتاب افقی، جداگر لرزه ای، پاسخ دینامیکی، تحلیل حوزه زمان.

۱. مقدمه

مخازن نگهداری مایع از سازه های خاص عمرانی با درجه اهمیت بالا است که جهت نگهداشت مایعات مختلفی مانند آب، فرآورده های نفتی و مواد شیمیایی به اشکال مختلف (از جمله کروی، استوانه ای و مکعب مستطیل) از آن ها استفاده می شود. در حالت کلی این سازه ها از نظر موقعیت قرارگیری نسبت به تراز زمین به دو دسته مخازن هوایی و

مخازن زمینی طبقه‌بندی می‌شوند. مخازن زمینی خود به دو گروه مدفون و غیر مدفون تقسیم می‌شوند که عمدتاً برای مصارف مختلفی چون ذخیره‌سازی آب و فراورده‌های نفتی یا انبار نمودن ضایعات خطرناک واحدهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به کاربرد این سازه‌ها در شبکه‌های انتقال و توزیع آب، نیروگاه‌های هسته‌ای و مجتمع‌های صنعتی بخصوص پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های صنایع شیمیایی، بررسی عملکردشان در هنگام زمین‌لرزه مباحث اقتصادی آن‌ها را تحت الشعاع قرار می‌دهد. به طور کلی مصالح ساخت پی، دیوار و سقف مخزن با توجه به هزینه، زمان ساخت، عمر مفید، ظرفیت و استحکام در مقابل نیروهای داخلی فشار آب و خارجی مانند عکس‌العمل زمین و دیوارهای اطراف، سر بارها مثل پوشش خاکی روی مخزن و اطراف آن، آب‌های زیرزمینی اطراف مخزن، سربارهای احتمالی روی زمین و خاک‌ریزی اطراف مخزن و ... با یکدیگر متفاوت هستند و هریک در یک یا چند عامل اشاره شده نسبت به دیگری امکان برتری دارند [۱]. شکاری و همکارانش در بررسی‌های متعدد به تحلیل لرزه‌ای مخازن زمینی جداسازی شده با روش درگیر اجزا محدود و مرزی پرداختند [۲]. کیانوش و قائم‌مقامی نیز با استفاده از روش اجزا محدود به بررسی پاسخ دینامیکی مخازن بتنی زمینی مستطیلی تحت تأثیر مؤلفه‌های افقی و عمودی زلزله‌های مختلف، در قلمرو زمان پرداختند [۳]. آسیب دیدگی مخازن ذخیره مایعات تحت تأثیر زلزله‌های دهه اخیر مثل زلزله ۱۹۹۰ لوزان فیلیپین یا زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، باعث بروز بررسی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی گوناگونی در این زمینه شده است. کلی و همکارش در سال ۱۹۹۰ با آنالیز لرزه‌ای مخازن ایزوله شده به کاهش چشمگیر بیشینه پاسخ سیستم دست یافتند. همچنین از جمله نقاط ضعف اینگونه مخازن را افزایش قابل توجه ارتفاع موج سطحی بخصوص در مخازن بلند ارزیابی نمودند [۴]. ولتسوس در سال ۱۹۸۷ با استفاده از معادله لا پلاس و اعمال شرایط مرزی مناسب، به یک حل تحلیلی برای توزیع فشار در طول ارتفاع و شعاع مخازن در حالات مختلف دیواره صلب و انعطاف پذیر پرداخت [۵].

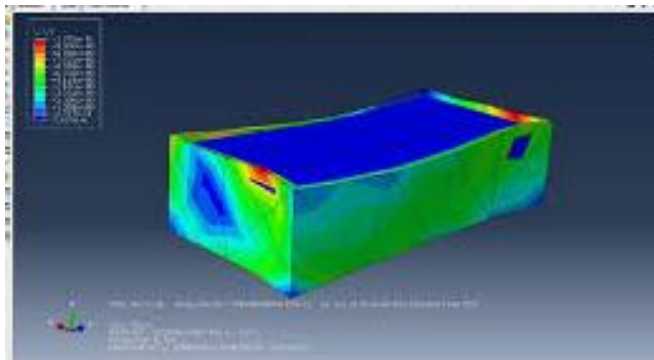
یکی از برجسته‌ترین پدیده‌های مرتبط با انعطاف پذیری پوسته مخزن در مخازن حاوی مایعات، تلاطم سطح آزاد سیال است که در اثر شتاب بیرونی منتقل شده از زمین به بدنه مخزن ایجاد می‌شود و باعث ایجاد فشارهای هیدرو دینامیکی قابل توجهی بر جداره مخزن می‌شود [۶]. براساس نتایج تحقیق آککیدز و اونال [۷] دامنه تلاطم مایع در مخازن مکعبی به محتوای فرکانسی شتاب زمین، ارتفاع مایع درون مخزن، خصوصیات مایع و ابعاد مخزن بستگی دارد. بذرافشان و خاجی در مطالعه‌ای، به بررسی تأثیر جداگرها بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلند تحت اثر زلزله‌های پریود بلند پرداختند و ثابت نمودند که تحت اثر چنین حرکاتی سازه‌ها دچار تشدید می‌شوند [۸].

آسیب دیدگی ناشی از بلند شدگی کف : مخازن زمینی از نظر اتصال به تکیه گاه خود به دو گروه مخازن مهار شده و مخازن مهار نشده تقسیم می‌شوند. مخازن مهار شده می‌بایست به فونداسیون با ابعاد نسبتاً بزرگ متصل شوند و از طرفی وجود اتصالات نامناسب و عدم رعایت جزئیات مهاربندی باعث ایجاد آسیب به بدنه مخزن تحت بارهای لرزه‌ای می‌گردد. هم مخازن مهار شده و هم مخازن مهار نشده تحت اثر لنگرهای واژگونی بیش از حد بحرانی می‌توانند دچار بلند شدگی موضعی گردند که این امکان برای مخازن مهار نشده بیشتر است [۹]. با ظهور روشهای عددی قابلیت محاسبه هریک از پارامترهای تأثیر گذار بر پاسخ مخازن با ابعاد هندسی دلخواه آسان شده است. این روشها یا بر اساس بسط توابع در تعداد محدودی از نقاط یا تقسیم ناحیه به تعدادی زیر ناحیه برای پیدا کردن جوابها استوار است که از جمله این روشهای عددی می‌توان به روشهای تفاضل محدود، اجزاء محدود و اجزاء مرزی اشاره کرد. با توجه به محاسن روشاجرا محدود برای مدل سازی خواص پیچیده مواد و مصالح غیر خطی، از این روش برای مدل سازی قلمرو پوسته مخزن و جدا کننده های لرزه‌ای استفاده شده است. در خصوص پارامترهای مجهول گرهی دو دیدگاه وجود دارد؛ دیدگاه لاگرانژی و دیدگاه اویلری دیدگاه لاگرانژی تغییر مکان محیط را به عنوان متغیرهای محیط انتخاب می‌کند و دیدگاه اویلری از پتانسیل تغییر مکان، سرعت یا فشار به عنوان مجهولات استفاده می‌کند. در دیدگاه اویلری با درجات آزادی کمتری مواجه هستیم، از این جهت که پتانسیل به عنوان متغیر گرهی کمیتی اسکالر می‌باشد [۱۰]. در این تحقیق، از دیدگاه اویلری (فرمولاسیون پتانسیل) برای مدل سازی قلمرو سیال و برای مدل سازی قلمرو سازه از دیدگاه لاگرانژی (فرمولاسیون تغییر مکان) استفاده شده است. نتیجه درگیر نمودن این دو روش به دیدگاه " اویلر- لاگرانژ" موسوم است. در صورت کاربرد فرمولاسیون بالا، دستگاه معادلات دیفرانسیل گسسته سازی شده سیستم کامل سیال- سازه نا متقارن خواهد بود که نیازمند اعمال حجم بالایی از محاسبات است.

۳. شبیه سازی سازه با استفاده از روش المان محدود و تحلیل نرم افزاری

روش المان محدود روشی عددی برای حل معادلات دیفرانسیلی جزئی یا PDE تعریف شده بر اساس یک یا دو متغیر مکانی است. در این روش، برای حل مسئله یک سیستم بزرگ به قسمت‌های کوچکتر و ساده‌تر به نام المان‌های محدود تقسیم می‌شود. این روش در مقیاس جهانی بسیار حائز اهمیت است، زیرا هر نوع آزمایش فیزیکی احتمالاً می‌تواند به خطر یکپارچگی و استحکام سازه‌ها منتهی گردد. این روش در تحلیل دینامیکی و استراتیژی‌های مقاوم‌سازی برای حفاظت از میراث فرهنگی و جهانی کمک بسزایی انجام می‌دهد. این روش امکان تجزیه و تحلیل دقیق توزیع تنش، تغییر شکل و نقاط شکست بالقوه را فراهم می‌کند. استفاده از روش المان‌های محدود در مهندسی سازه ایزاری پیچیده و ارزشمند است. این روش به مهندسين فرصت مقتضی می‌دهد تا جزئیات پیچیده سازه‌ای و روش‌های ساخت و ساز را با دقت بالا مدل‌سازی و تجزیه و بررسی کنند.

روش مورد استفاده در مدل‌سازی عددی سازه روش اجزا محدود است که همان روش تحلیل نرم‌افزاری نرم‌افزار آباکوس هست. نرم‌افزار آباکوس از توانمندترین نرم‌افزارهایی است که حل مسائل در آن به روش اجزای محدود انجام می‌شود. آباکوس با دسترسی آسان به ماژول‌ها، کتابخانه‌ای غنی از انواع المان‌ها و از جذابترین نرم‌افزارهای مهندسی حال حاضر است. در شکل (۱) نمونه‌ای از شبیه سازی المان محدود نشان داده شده است.



شکل ۱- شرایط تکیه‌گاهی روی مدل در آباکوس

۴- معادله دینامیکی حاکم بر قلمرو سیال و سازه

معادله تعادل دینامیکی مایع تراکم‌ناپذیر و غیرلزج به‌عنوان یک محیط پیوسته صرفنظر از قسمت نوسانی سیال با استفاده از قوانین پیوستگی و اندازه حرکت و یک‌سری از فرضیات بر روی معادلات ناویر استوکس* و کاربرد تابع پتانسیل سرعت، معادله لاپلاس به شکل زیر خواهد بود [۱۱].

$$\nabla^2 \phi(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

که در آن ϕ تابع پتانسیل سرعت است. توزیع تابع پتانسیل سرعت و به تبع آن فشار هیدرودینامیک در قلمرو سیال با استفاده از شرایط مرزی مربوطه به دست خواهد آمد:

الف) شرط مرزی سطح آزاد: با توجه به اینکه در مخازن نگهداری سیال امواج ثقلی تأثیر قابل‌توجهی بر توزیع فشار هیدرودینامیکی وارد بر بدنه مخزن دارند، با در نظر گرفتن تراکم‌ناپذیری سیال و کم بودن اثرات کشش سطحی نسبت به تأثیر ثقل، شرط مرزی سطح آزاد به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

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

* Navier–Stokes

ب) شرط مرزی سطح تماس مایع- سازه: شرط مرزی محل تماس مایع با مرزهای شتابدار بدنه مخزن (مرز اندرکنش) باید به گونه‌ای باشد که تغییر مکان‌های عمود بر سطح برای محیط سیال و سازه یکسان باشند.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} = v_n(t) \quad (3)$$

در این روابط g شتاب گرانش زمین، $\mathbf{n}$ بردار عمود بر مرز جامد و به سمت خارج از قلمرو مایع و v نیز سرعت سیال در محل جداره است. در کف مخزن نیز با توجه به اینکه تحلیل لرزه‌ای با فرض بارگذاری در راستای افقی انجام می‌شود، سرعت قائم صفر است.

پس از تحلیل تابع پتانسیل سرعت، می‌توان فشار دینامیکی p وارد بر جداره مخزن را در زمان‌های مختلف از رابطه زیر به دست آورد:

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (4)$$

که در آن، ρ دانسیته مایع می‌باشد. پس از تخمین مقادیر پتانسیل سرعت و به تبع آن فشار دینامیکی در سطح آزاد مایع، تغییر مکان نقاط مختلف آن را می‌توان از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$p = \rho g \eta(x, y, t) \quad (5)$$

در این رابطه، η نشان‌دهنده تغییر مکان نقاط مختلف نوسانات سطح آزاد مایع تحریک شده است. در اعمال شرایط مرزی، در مرز مشترک سیال و سازه (مرز s_2) بایستی شرایط همسازگی ارضاء شود.

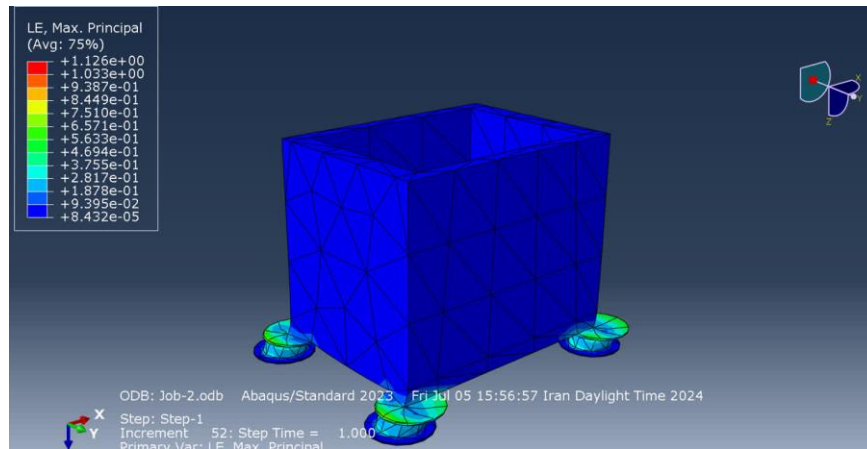
معادله حاکم بر تعادل دینامیکی محیط پوسته مخزن توسط معادله زیر بیان می‌شود:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_s + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_s + \mathbf{K}\mathbf{u}_s = \quad (7)$$

در رابطه (7) $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{K}$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی پوسته و $\mathbf{u}$ نیز بردار جابجایی نقاط مختلف جداره مخزن در محل تماس با سیال است. $\mathbf{F}$ نیز بردار نیروهای خارجی وارده بر سازه مخزن است که شامل دو مؤلفه فشار دینامیکی آب و نیروی حاصل از اثر زلزله بر سازه است. دستگاه معادلات فوق، دستگاه معادلات درگیر سیستم سیال- سازه مخزن می‌باشد که از حل آن دامنه مجهولات مساله (تغییر مکان و فشار دینامیکی) بدست می‌آید [۱۱].

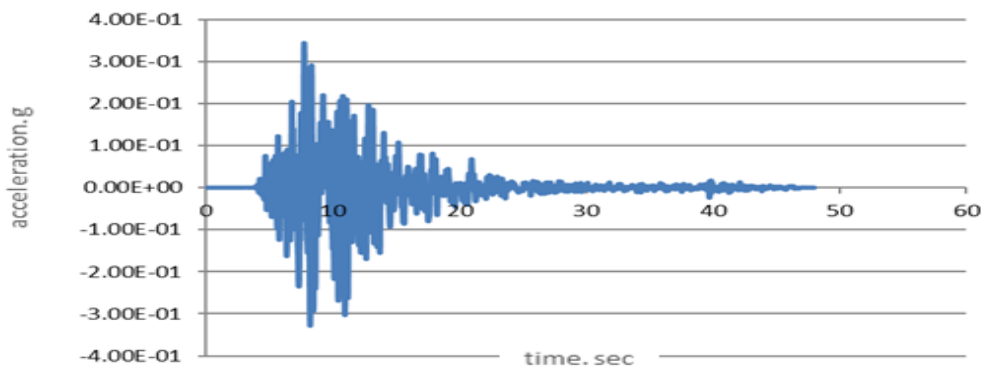
۵- تحلیل استاتیکی و دینامیکی مخزن تحت تأثیر بار خارجی

در این قسمت از پژوهش، رفتار مخزن با شرایط تکیه گاهی مختلف و با المان‌ها با ابعاد مختلف مورد تحلیل واقع شده و، ضمن ارائه نتایج آن‌ها را باهم مقایسه می‌کنیم. در این راستا، میزان کارایی میراگر لاستیکی در بهبود عملکرد لرزه‌ای مخزن مهارشده تحلیل شده است. مخزن به‌کاررفته این پژوهش، یک مخزن به عرض ۴ متر و ارتفاع ۴ متر که ۵۰ درصد آن از آب پر شده است. در شکل (۲) شمایی از مدل سازی مخزن بر روی میراگر های لرزه ای نشان داده شده است. تحلیل مخازن برای دو حالت جداسازی شده و بدون سیستم جداساز انجام شده است.



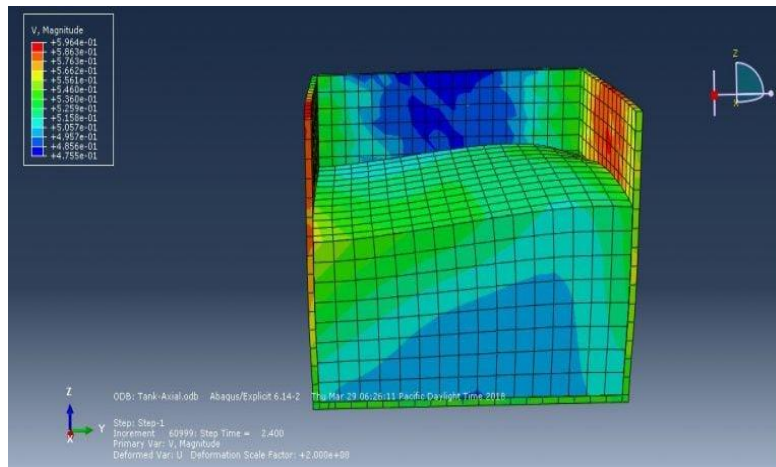
شکل ۲- مدل سازه جداسازی شده

نرم افزار آباکوس که از قدرتمندترین نرم افزارهای شبیه سازی به روش اجزاء محدود هست و از تحلیل های ساده تا پیشرفته را به نحو شایانی انجام می دهد در این مدل سازی عددی استفاده شده است؛ و با توجه به محیطی ساده نسبت به سایر نرم افزارهای مشابه، در سال های اخیر کاربران زیادی را به خود جذب کرده است. بخشی از تحلیل های دینامیکی به آنالیز حوزه زمان پاسخ سازه تحت تأثیر زلزله نشان داده شده بوده است. در شکل (۳) شتابنگاشت زلزله اعمالی به سازه نشان داده شده است. رکورد مورد استفاده شتابنگاشت زلزله بم دارای $PGA = 0.35g$ می باشد.



شکل ۳- شتاب نگاشت زلزله اعمال شده

بخشی از تحلیل ها به بررسی مقادیر کرنش در بدنه مخزن اختصاص یافته است، که نتایج بخشی از تحلیل ها در جدول (۱) به صورت خلاصه ارائه شده است. بررسی ها نشان داد، حداکثر مقدار کرنش برای المان یک متری $7.29E-04$ و حداقل آن پارامتر برای المان یک متری $1.21E-07$ هست. تحلیل ها با استفاده از روش اجزا محدود برای المان های ۷۵ سانتی متری، نیم متری، چهل و پنج سانتی متر، بیست و پنج سانتی متر، بیست و پنج سانتی متر، بیست سانتی متر و پانزده سانتی متر صورت گرفته است که در جدول (۱) حداکثر و حداقل مقادیر کرنش ارائه شده است. در شکل (۴) شمایی از مدل سازی تلاطم سطحی آب در مخزن پر هنگام تحریک پایه آن نشان داده شده است.

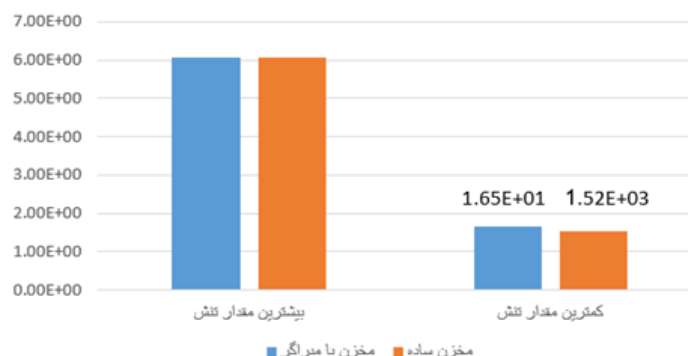


شکل ۴- شمایی از مدل تلاطم سطحی

جدول ۱- حداکثر و حداقل مقدار کرنش های به دست آمده در نرم افزار آباکوس

اندازه المان	بیشترین مقدار کرنش	کمترین مقدار کرنش
1	7.29E-04	1.21E-07
0.75	6.92E-04	6.93E-08
0.55	6.85E-04	2.98E-08
0.4	6.98E-04	3.77E-08
0.35	5.87E-04	3.74E-08
0.25	4.94E-04	-1.64E-06

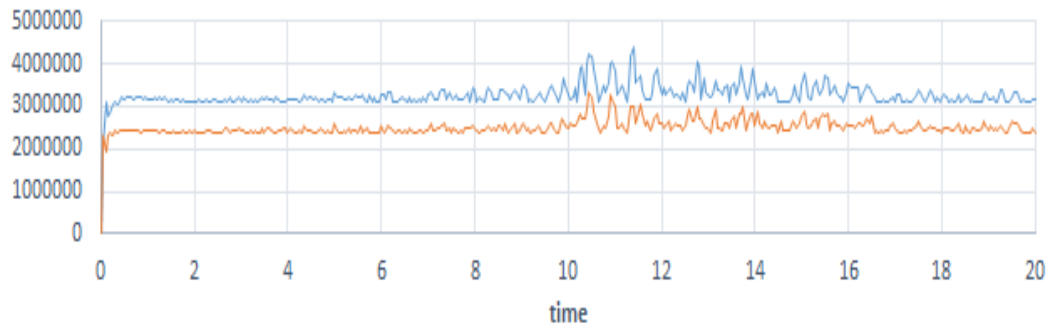
پس از اینکه مخزن روی سیستم جداگر قرار داده شد تحت تأثیر نیروی زلزله واقعی قرار گرفت. بعد از اینکه آنالیز دینامیکی مخزن انجام شد، حالا مخزن ساده با مخزن روی میراگر مقایسه می شود. در شکل (۵) نتایج تحلیل دینامیکی تنش در بدنه مخزن برای هر دو حالت نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار تنش (پاسکال) مخزن برای حالات مختلف تکیه گاه ساده و جداسازی شده.

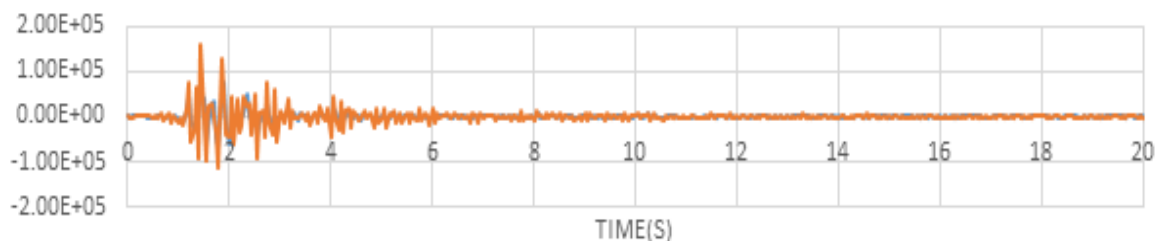
همانطور که از نتایج شکل پیداست، تنش حداقل در حالت جداسازی شده بیشتر از حالت گیرداری کف مخزن است. دلیل آن نیز می توان به رشد تغییر مکان سیستم جداساز و به تبع آن تلاطم سطح مایع در اثر تحریک خارجی و شتاب وارده زمین دانست. در راستای شکل (۴)، نتایج تحلیل حوزه زمان تنش در بدنه مخزن برای حالات مختلف

پایه مخزن در شکل (۶) نشان داده شده است. براساس نتایج کمی نقش جداساز لرزه ای در تغییرات تنش در بدنه مخزن قابل توجه است.



شکل ۶- نمودار تغییرات تنش در بدنه مخزن برای حالات مختلف تکیه گاه ساده و جداسازی شده.

همانطور که از نتایج شکل مشخص است، بیشینه تنش در زمان تقریبی 11.5 ثانیه رخ داده است، و مقدار آن 4.6 مگاپاسکال است. نکته قابل توجه این است که زمان مذکور با بیشینه شتاب زمین تطابق ندارد. بنابراین رخداد پدیده آسیب به بدنه سد بسیار به محتوای فرکانسی شتاب زلزله ارتباط دارد. در ادامه به منظور ارائه تحلیل تاریخچه زمانی مخازن مختلف، شکل (۷) ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار تغییرات برش پایه مخزن برای حالات مختلف تکیه گاه ساده و جداسازی شده.

نتایج برای ۲۰ ثانیه از زکورد شتاب ورودی به سیستم نشان داده شده است. براساس نتایج کمی نقش جداساز لرزه ای در کاهش برش پایه کاملاً ملموس است که دلیل آنرا می توان در کاهش میزان انرژی ورودی به سازه و به تبع آن کاهش میزان انرژی هیستریزیست در مخزن جدا شده از زمین دانست.

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق، میزان کارایی جداساز لرزه ای در بهبود عملکرد لرزه ای مخزن مهارشده بررسی شد. مخزن به کاررفته این پژوهش، یک مخزن به عرض ۴ در ۳ متر و ارتفاع ۴ متر که ۵۰ درصد آن از آب پر شده است. جهت مدل سازی این مسئله از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده در این مطالعه، وضعیت تکیه گاهی مخازن روزمینی، تأثیر قابل توجهی بر ارتفاع موج سطح آزاد سیال ندارد و مقادیر بیشینه این پاسخ فارغ از مهارشده یا مهارنشده بودن مخزن تقریباً بدون تغییر می ماند. نتایج تحلیل حوزه زمان نشان داد، زمان رخداد بیشینه تنش بدنه مخزن الزاماً با زمان رخداد بیشینه شتاب زمین تطابق ندارد، بنابراین رخداد پدیده آسیب به بدنه سازه بسیار به محتوای فرکانسی شتاب زمین ارتباط دارد. بررسی پاسخ ها نشان داد، نقش جداساز لرزه ای در کاهش برش پایه قابل ملاحظه است که دلیل آنرا می توان در کاهش میزان انرژی ورودی به سازه و به تبع آن کاهش میزان انرژی هیستریزیست در مخزن جدا شده از پایه دانست.

۶. مراجع

- ۱- شفیعی رودباری، ح.، (۱۳۹۷). " مطالعه پارامترهای مؤثر بر رفتار لرزه ای مخازن آب بتن آرمه زمینی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- مهندسی آب و سازههای هیدرولیکی، دانشگاه علم و فرهنگ رشت.
2. Shekari, MR., Khaji, N., Ahmadi, M.T. (2009), "A coupled BE-FE study for evaluation of seismically isolated cylindrical liquid storage tanks considering fluid-structure interaction," *Journal of Fluids and Structures* 25(3), pp 567-585.
3. Kianoush, M.R., Ghaemmaghani, A.R., (2011), "The effect of earthquake frequency content on the seismic behavior of concrete rectangular liquid tanks using the finite element method incorporating soil-structure interaction," *Engineering Structures*, 33, pp 2186-2200.
4. Chalhoub, M.S., Kelly, J.M., (1990), "Shake table test of cylindrical water tanks in base-isolated structures," *ASCE Journal of Engineering Mechanics* 116, pp 1451-1472.
5. Veletsos, A.S., Tang, Y., (1987), "Rocking response of liquid storage tanks," *ASCE Journal of Engineering Mechanics* 113, pp 1774-1792.
6. Souto-Iglesias, A., Delorme, L., Perez-Rojas, L. and Abril-Perez, S. (2006) , " Liquid moment amplitude assessment in sloshing type problems with smooth particle hydrodynamics," *Ocean Engineering* 33, pp 1462-84.
7. Akyildiz, H., Unal, NE. (2006) , " Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and experimental validation," *Ocean Engineering* 33, pp 2135-2149.
- ۸- بذرافشان، ا.، خاجی، ن. (۱۳۹۵). " پاسخ لرزه ای ساختمان های بلند جداسازی شده تحت اثر حرکات پریود بلند زمین"، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره شانزدهم، شماره دوم.
9. Malhotra, P.k., Veletsos, (1994) , " Uplifting Analysis of Base Plates In Cylindrical Tanks," *ASCE* 120, pp 3489-3505.
- ۱۰- شکاری، م.ر.، (۱۳۸۶). " آنالیز لرزه ای مخازن زمینی جداسازی شده با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- سازههای هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۱۱- شکاری، م.ر.، حسنی، م.، زارعی فرد، م.ر. (۱۴۰۰). " بهسازی لرزه ای مخازن هوایی استوانه ای ذخیره ای آب به کمک جداسازهای غیرخطی با در نظر گرفتن اندرکنش سیال -سازه"، نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران، شماره ۳۱.