

تحلیل خطی مخازن فولادی روزمینی نفت به روش زمان دوام با توابع شتاب سازگار با زلزله‌های واقعی

دانیال واعظی (کارشناس ارشد)

همايون استکانچی (دانشیار)

ابوالحسن وفايي (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

حسین تاجمیر یاحی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان

در این نوشتار رفتار مخازن استوانه‌یی فولادی روزمینی به روش زمان دوام با توابع شتاب سازگار با زلزله‌های واقعی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از آن با نتایج تحلیل تاریخی‌چغی زمانی تحت رکوردهای زلزله و توابع شتاب سازگار با طیف آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ مقایسه می‌شود. برای این منظور، یک مخزن فرضی استوانه‌یی روزمینی کاملاً مهارشده بر بستر به روش اجزاء محدود مدل شده و المان‌های سیال نیز برای دقت نتایج در مدل آورده شده است. مدل به صورت کاملاً خطی تحت انواع آنالیزهای استاتیکی، مودال، طیفی و تاریخی‌چغی زمانی قرار گرفت و نتایج حاصل با نتایج سایر محققین مقایسه شد. پس از اطمینان از صحت مدل اجزاء محدود، تحلیل‌های اصلی تاریخی‌چغی زمانی به ترتیب برای رکوردهای هفت زلزله‌ی واقعی و شش تابع شتاب از دو سری سه‌تایی e زمان دوام (سازگار با طیف زلزله‌ها) و a زمان دوام (سازگار با طیف آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران) انجام گرفت. نتایج در دو مرحله مقایسه شد: ابتدا نتایج سه تابع شتاب سری e و هفت رکورد زلزله مقایسه شد و سپس تمامی نتایج مربوط به دو سری a، e و زلزله‌ها پس از مقیاس کردن برش پایه مقایسه شدند. نتایج حاصله بیانگر قابلیت هر دو سری a و e در تعیین تنش‌ها و تغییر شکل‌های مخزن و دقت بیشتر توابع سری e در تعیین تراز بیشینه‌ی آب هستند.

dvaezi@yahoo.com
stkanchi@sharif.edu
vafai@sharif.edu
h_tajmir@yahoo.com

واژگان کلیدی: روش زمان دوام، مخازن فولادی روزمینی، مدل اجزاء محدود،

تحلیل‌های تاریخی‌چغی زمانی، اندرکنش سیال و سازه.

مقدمه

در طول دهه‌های گذشته تحقیقات فراوانی در زمینه‌ی رفتار لرزه‌یی مخازن انجام داده‌اند. در خلال دهه‌های گذشته تقریباً وقوع هر زلزله‌ی بزرگ منجر به ایجاد آسیب‌های جدی به مخازن روزمینی فولادی شده است.^[۱] از جمله زلزله‌های اصلی که به بروز آسیب در مخازن منجر شده‌اند، می‌توان به زلزله‌ی سال ۱۹۶۴ آنکوراز (آلاسکا)، ۱۹۸۹ لوماپریتا (ایالات متحده)، ۱۹۹۹ ازمیت (ترکیه)، ۲۰۰۴ زرنند (ایران) اشاره کرد.^[۲] اعمال فشار هیدرودینامیکی ناشی از زلزله از اوایل دهه‌ی ۱۹۳۰ در رابطه با طرح سدهای بلند در مناطق زلزله‌خیز شکل گرفت. اولین پیشنهاد در سال ۱۹۳۳ ارائه شد^[۳] و سپس در سال ۱۹۳۴ میلادی ارتعاش مخازن مستطیلی با جداری صلب بر بستر غیرانعطاف‌پذیر، به روش تحلیلی و آزمایشگاهی انجام شد.^[۴]

مخازن نگه‌داری مایعات از جمله سازه‌های بسیار با اهمیت هستند. همراهی سیال و پوسته‌ی جامد و سیستم اندرکنشی این دو، این نوع از سازه را از سایر سازه‌ها متمایز می‌سازد. با توجه به جایگاه، مخازن به سه نوع: مدفون، زمینی و هوایی تقسیم می‌شوند. در این میان مخازن استوانه‌یی روزمینی فولادی از جمله مخازن بسیار پرکاربرد هستند. این نوع مخازن گنجایش زیادی دارند و مایعات مختلفی را می‌توان در آنها ذخیره کرد، از جمله آب برای مصارف شرب و خاموش‌کردن آتش، مایعات و مواد شیمیایی مربوط به صنایع نفت، و... آسیب‌دیدگی این مخازن علاوه بر زیان اقتصادی مستقیم ممکن است به بروز خسارات غیرمستقیم مهمی نظیر قطع آب، آتش‌سوزی‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی بینجامد. بنابراین اطمینان از عملکرد لرزه‌یی این نوع مخازن ضروری است. به همین دلیل محققین و مهندسیین

در این مطالعات، با توجه به صلب بودن دیواره و کف مخزن، صرفاً به پاسخ دینامیکی مایع داخل مخزن توجه شد. بعدها، در سال ۱۹۴۹ میلادی، مسئله‌ی

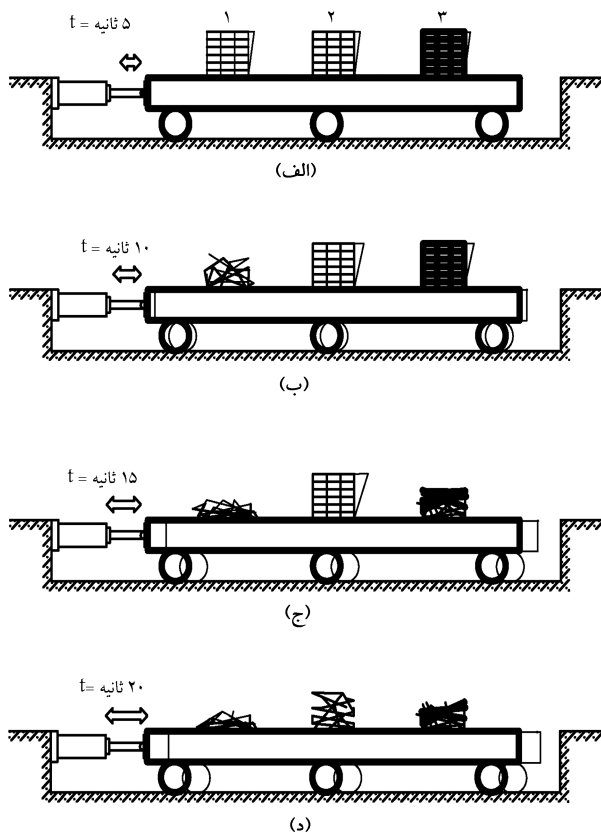
بلکه زمان دوام بالاتر به معنی عملکرد بهتر در نظر گرفته می‌شود.^[۱۴] زمان دوام کمینه همراه با شاخص خرابی مناسب می‌تواند به عنوان معیار طراحی در نظر گرفته شود. به این ترتیب در صورتی که شاخص خرابی مورد نظر تا زمان دوام تعیین شده پایین‌تر از حد مجاز باقی بماند، سازه قابل قبول فرض می‌شود. این روش اصولاً برای مطالعه‌ی سیستم‌های سازه‌ی پیچیده که استفاده از روش‌های ساده شده‌ی کلاسیک در مورد آن‌ها سؤال‌برانگیز است، بسیار مناسب است. علت این مسئله را باید در قابلیت‌های روش تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی که در عمل می‌تواند تغییرات تمام پارامترهای سیستم - نظیر سختی، تغییر شکل، میرایی، جرم و غیره - را به‌طور لحظه به لحظه دنبال کند جست‌وجو کرد. اگرچه مدل مورد مطالعه در این نوشتار برای ارزیابی اولیه‌ی روش فقط در محدوده‌ی رفتار خطی بررسی شده، مزیت این روش را باید بیشتر در تحلیل سیستم‌های با رفتار غیرخطی پیچیده جست‌وجو کرد.

انتخاب تابع شتاب مناسب در این روش از اهمیت زیادی برخوردار است. توابع شتاب در روش زمان دوام بر مبنای طیف پاسخ ساخته می‌شود. در سری a توابع شتاب بر مبنای طیف پاسخ آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران است، اما توابع شتاب سری e بر مبنای طیف پاسخ میانگین هفت زلزله‌ی واقعی‌اند. در شکل ۲ نمونه‌ی تابع شتاب سری e نشان داده شده است. این توابع طوری ساخته شده‌اند که طیف حاصل از آنها در طول زمان متناسب با یک طیف شتاب پایه‌ی دلخواه تغییر می‌کند. این مسئله در شکل ۳ برای میانگین رکوردهای سری e نشان داده شده است. طیف مبنای تهیه‌ی این سری از رکوردها بر مبنای طیف متوسط حاصل از هفت رکورد زلزله که روی خاک مشابه با نوع ۲ آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران ثبت شده‌اند در نظر گرفته شد. در شکل ۴ این طیف نشان داده شده است.

هیدرودینامیک در مخازن توسعه داده شد.^[۵] در سال ۱۹۵۴ میلادی، هاوزنر نشان داد که مایع داخل مخزن از دو بخش تشکیل شده است: «بخش مواج^۱» که بر اثر تحریکات دینامیکی دارای جنبشی با پرپود بلند است، و «بخش سخت^۲» که دارای نوسانی صلب‌گونه با دیواره‌ی مخزن است.^[۶] بخش مواج مایع مشخص‌کننده‌ی ارتفاع آزاد مخزن در بالای سطح مایع است و بخش سخت مایع که با شتابی همسان با شتاب تحریکات ورودی نوسان می‌کند، بیشتر بر برش پایه و لنگر واژگونی تأثیر دارد. در این زمان به نظر می‌رسید که موضوع خاتمه یافته باشد، که زلزله‌ی سال ۱۹۶۴ میلادی آلاسکا موجب تخریب تعداد زیادی از مخازن مایع شد و همین مسئله منشاء مطالعات گسترده‌ی در زمینه‌ی رفتار و خصوصیات دینامیکی مخازن با جداری انعطاف‌پذیر شد. در این مطالعات نشان داده شد که انعطاف‌پذیری جداره سبب می‌شود شتاب وارده بر بخش سخت مایع چندین بار بیشتر از شتاب تحریک ورودی به سیستم باشد.^[۷] بر این اساس برش پایه و لنگر واژگونی محاسبه شده در مخازن با فرض صلبیت جداره‌ی مخزن در جهت اطمینان نیست. نخستین تحلیل رایانه‌ی مخازن مایع در سال ۱۹۶۹ و با استفاده از روش اجزاء محدود صورت گرفت.^[۹] این تحلیل بر روی یک مخزن استوانه‌ی مهارشده محتوی مایع با نسبت ارتفاع به قطر کم‌تر از ۱ انجام گرفت. در این تحلیل مسئله‌ی اندرکنش مایع و دیواره‌ی کشسان پوسته‌ی مخزن لحاظ شد. در تحقیقات یادشده مخازن به صورت کشسان خطی و کاملاً مهارشده در نظر گرفته شدند. به این ترتیب با توسعه‌ی روش اجزاء محدود و محاسبات رایانه‌ی، تحلیل مخازن که در گذشته عمدتاً به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی انجام می‌شد سرعت و وسعت بیشتری گرفت. تحقیقات توسعه یافت^[۱۰] و آیین‌نامه‌های گوناگون نظیر API^۳ و بخش چهارم یوروکد هشت^۴ براساس این تحقیقات شکل گرفت.^[۱۰]

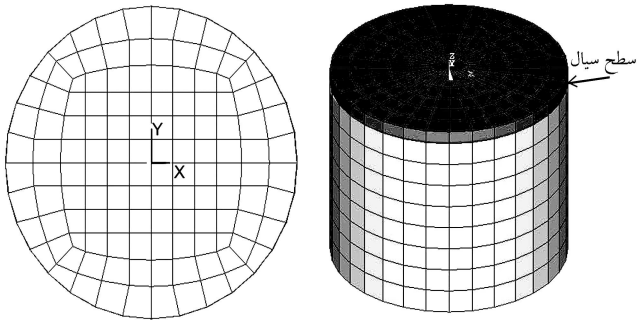
روش زمان دوام^۵

هدف «روش زمان دوام» ارائه‌ی یک روش نسبتاً جامع تحلیلی مبتنی بر تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی به منظور ارزیابی سیستم‌های سازه‌ی تحت تحریک‌های دینامیکی ناشی از زلزله است. به لحاظ مفهومی این روش تا حدودی مشابه روش «تست ورزش» است که در پزشکی برای ارزیابی وضعیت قلبی-عروقی ورزشکاران و بیماران به کار می‌رود. روش زمان دوام را می‌توان با یک آزمایش فرضی توضیح داد. فرض کنید می‌خواهیم عملکرد لرنه‌ی سه سازه‌ی مختلف با مقاومت جانبی و مشخصات دینامیکی ناشناخته را بررسی کنیم. هر سه سازه را روی میز لرزان قرار می‌دهیم. آزمایش را با وارد کردن یک تابع شتاب تصادفی که شدت آن به تدریج افزایش می‌یابد شروع می‌کنیم. در ابتدا، فرضاً تا ثانیه‌ی پنجم آزمایش، شدت نوسان میز کم است و هر سه سازه پایدارند (شکل ۱). به تدریج، و با افزایش نوسان به مرحله‌ی می‌رسیم که اولین سازه دچار خرابی می‌شود. در این مثال فرض کنید سازه ۱ در ثانیه‌ی دهم دچار خرابی شده است، و با ادامه‌ی افزایش شدت نوسانات سازه‌ی بعدی (سازه ۳) در ثانیه‌ی پانزدهم دچار خرابی می‌شود و نهایتاً سازه ۲ نیز در شدت نوسان بالاتر و در ثانیه‌ی بیست و یکم خراب می‌شود. حال براساس این آزمایش فرضی می‌توان قضاوت کرد که سازه شماره ۲ که دوام بیشتری را نشان داده عملکرد لرنه‌ی بهتری دارد، و سازه شماره ۱ که زودتر از سایر سازه‌ها دچار خرابی شده عملکرد ضعیف‌تری دارد.^[۱۳-۱۷] در این ارزیابی معیار سنجش بر مبنای زمان دوام سازه در مقابل تابع شتاب اعمالی بوده و پارامترهایی نظیر سختی، مقاومت جانبی، پرپود نوسان و مشخصات دینامیکی به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار نمی‌گیرند،

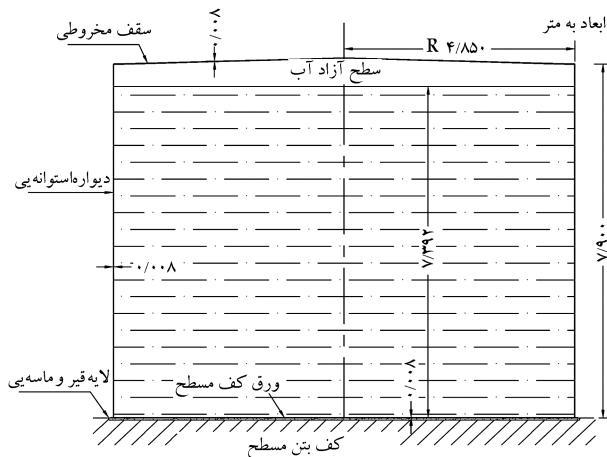


شکل ۱. آزمایش فرضی.

سازه، جزء مدل‌های پیچیده به شمار می‌رود و در صورت عدم توجه ظریف به مدل‌سازی، عملاً به نتایج ناسازگار و غیر واقعی منجر خواهد شد. (شکل ۵) به منظور اطمینان از درستی عملکرد مدل عددی، از مشخصات مشابه با مدل مورد استفاده‌ی بارتون و پارکر^[۱۸] استفاده شد (جدول ۱). در نوشتار حاضر این مدل به نام «مخزن A» نام‌گذاری شده است (شکل ۶). ارتباط سیال و پوسته با استفاده از المان‌های تماسی که فشار را صرفاً در جهت عمود بر سطح مشتقل می‌کنند، مدل‌سازی شده است.



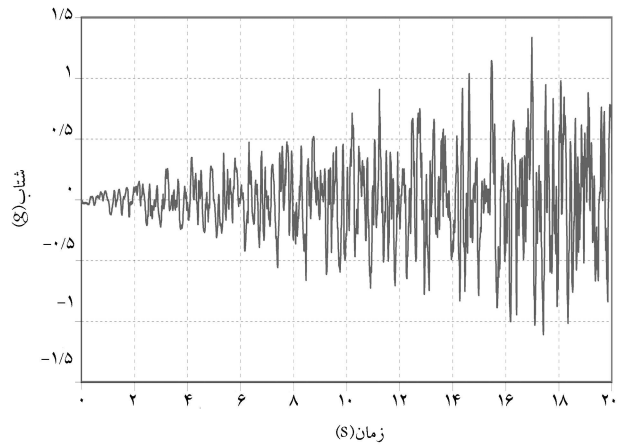
شکل ۵. الف) نمای سه بعدی از مخزن؛ ب) سطح مقطع مخزن (سیال).



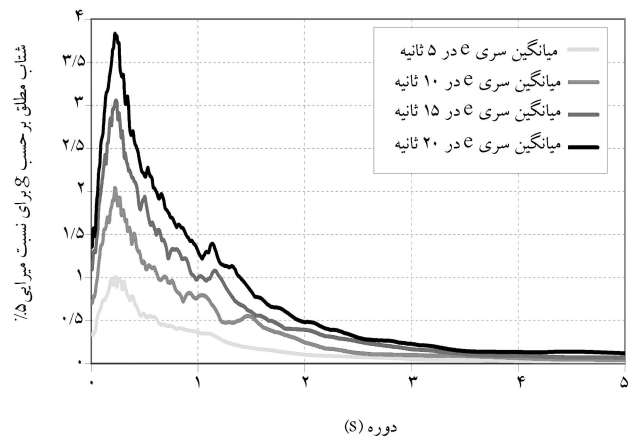
شکل ۶. برش طولی از مخزن A.

جدول ۱. مشخصات هندسی و خواص سیال و فولاد در «مخزن A».

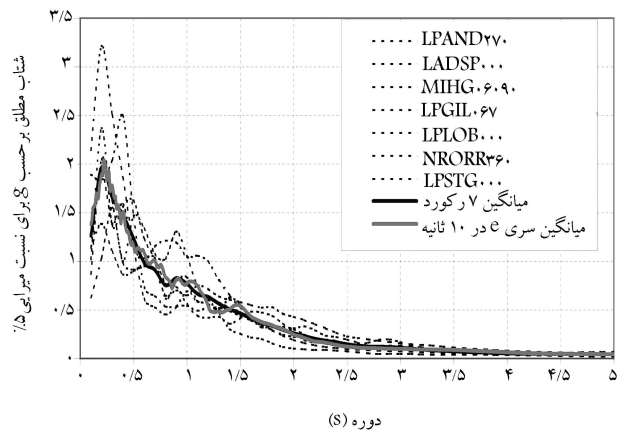
مقدار عددی	پارامتر طراحی
۷٫۹	ارتفاع دیواره (m) Ht
۷٫۳۹۲	ارتفاع سیال (m) h
۸٫۰۲۳	ارتفاع سقف (m) Hr
۴٫۸۵	شعاع مخزن (m) R
۸	ضخامت دیواره (mm)
۲٫۰۷	مدول بالک سیال (GPa)
۱۰۰۰	جرم حجمی سیال (Kg/m ^۳)
۰٫۰۰۱۱۳	گران‌روی سیال (Ns/m ^۲)
۲۰۴	مدول کشسانی فولاد (GPa)
۷۸۰۰	جرم حجمی فولاد (Kg/m ^۳)
۰٫۲۷	نسبت پواسون فولاد



شکل ۲. تاریخچه‌ی زمانی یکی از مشتاب‌نگاشت‌های سری e.



شکل ۳. طیف پاسخ میانگین سری e در زمان‌های مختلف.



شکل ۴. طیف پاسخ زلزله‌ها و میانگین زلزله‌ها و سری e در زمان‌های مختلف.

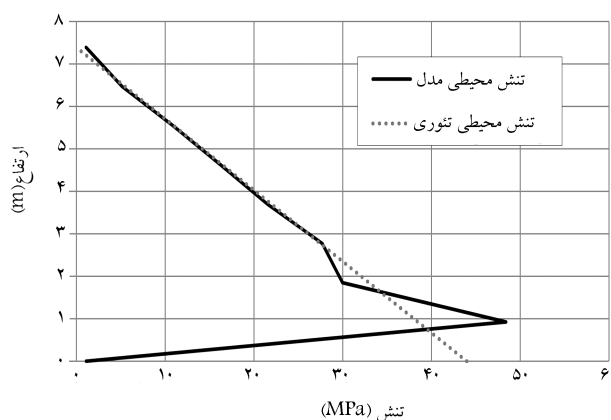
طراحی مدل و مشخصات مخزن

مدل عددی مخزن به روش اجزاء محدود با در نظر گرفتن عنصر سیال انجام گرفته است. اگرچه مدل مورد نظر به‌ظاهر از یک لوله‌ی فولادی به اضافه یک استوانه متشکل از سیال تشکیل شده و ساده به نظر می‌رسد، باید توجه داشت که این مدل به‌لحاظ ماهیت رفتار پیچیده‌ی سازه‌های پوسته‌یی و مستله‌ی اندرکنش سیال با

کنترل صحت عملکرد مدل عددی

تحلیل ایستا

افزون بر مقایسه‌ی نتایج با نتایج دیگر مقالات، [۱۸-۲۰] تحلیل ایستا روی مدل انجام، و صحت نیروها در راستای Z - مجموع نیروی وزن پوسته و سیال - کنترل شد. همچنین با مشاهده‌ی فشار هیدرواستاتیک سیال و مقایسه‌ی آن با $P = \gamma h$ ، از صحت مدل اطمینان حاصل شد. در شکل ۷ تنش محیطی محاسبه‌شده در مدل با مقدار به دست آمده از نظریه مقایسه شده است. پارامترهای دینامیکی مدل نظیر فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی با مقادیر تحلیل‌های عددی و تحلیلی سایر مراجع روی همین مخزن [۱۸-۲۰] مقایسه شدند. در جدول ۲ نتایج تحلیل مودی ارائه شده است که در آن f_1 فرکانس مود اصلی بخش موج، f_{e1} فرکانس مود اصلی بخش سخت m_1 ، جرم بخش موج، و m_{e1} جرم مؤثر بخش سخت است. در شکل ۸ اشکال موده‌های اصلی مخزن نمایش داده شده است.



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ی تنش محیطی به دست آمده از مدل و نظریه برای مخزن.

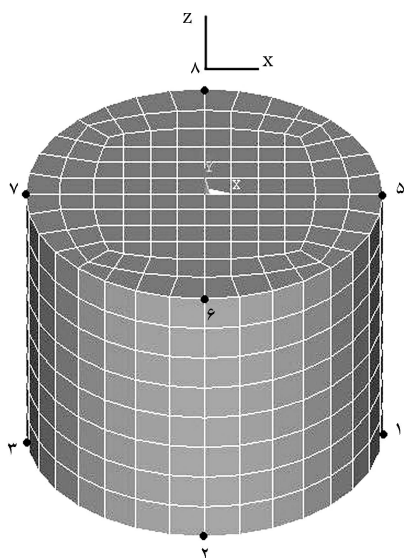
تحلیل تاریخچه‌ی زمانی

روش تاریخچه‌ی زمانی واقع بینانه‌ترین نوع تحلیل برای ارزیابی اثرات زلزله است. بیشینه‌ی مقادیر در نقاط گرهی شکل ۹ محاسبه شده است. جهت زلزله در جهت X است.

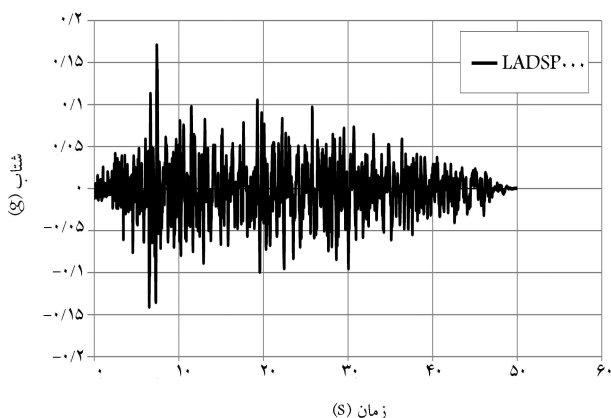
به‌منظور مقایسه، میانگین نتایج حاصل از زلزله‌ها را محاسبه و با میانگین نتایج حاصل از توابع شتاب مقایسه می‌کنیم. مشخصات زلزله‌های مورد نظر در جدول ۳ آورده شده است. در جداول ۴ الی ۶ نتایج برای زلزله‌ها، سری e و سری α نشان داده شده است.

پاسخ مخزن تحت تعدادی از زلزله‌ها در شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ آورده شده است. اگر منحنی زمان دوام (منحنی که در محور عمودی آن بیشینه‌ی قدرمطلق‌های نتایج و در محور افقی آن زمان قرار دارد) این نتایج رسم شود و مقادیر آن در ثانیه‌ی دهم قرائت شود، این مقادیر قابل مقایسه با نتایج تاریخچه‌ی زمانی زلزله‌هایی است که طیف آنها مبنای ساخت این توابع بوده است. [۲۱]

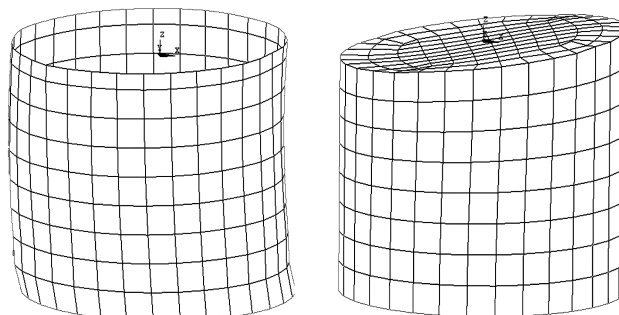
منحنی‌های زمان دوام حاصل از تحلیل در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ ارائه شده است. این نمودارها نشان‌گر روند پاسخ مخزن بر اثر افزایش شدت تحریک هستند.



شکل ۹. نمایش نقاط گرهی در مقطع سیال.



شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی شتاب رکورد ۱.



شکل ۸. اشکال موده‌های اصلی مخزن. (الف) شکل مود اصلی بخش موج؛ (ب) شکل مود اصلی بخش سخت.

جدول ۲. پارامترهای دینامیکی مخزن A.

نوع مدل	f_1 (Hz)	m_1 (%)	f_{e1} (Hz)	m_{e1} (%)	R_H (MN)
[۲۰، ۱۹]	۰٫۳۰۶۰۰	-	۱۲٫۵۰۰	-	۳٫۳۴
مدل دوبعدی [۱۸]	۰٫۲۹۵۰۰	-	۱۲٫۳۰۰	-	۳٫۳۸
مدل سه‌بعدی [۱۸]	۰٫۲۹۷۰۰	-	۱۲٫۳۰۰	-	۳٫۸۸
روش SRSS	۰٫۲۹۹۳۵	۲۴٫۴۸	۱۲٫۵۹۸	۵۹٫۴۷	۳٫۶۹
روش CQC	۰٫۲۹۹۳۵	۲۴٫۴۸	۱۲٫۵۹۸	۵۹٫۴۷	۳٫۶۹

جدول ۳. مشخصات زلزله‌ها.

شماره رکورد	نام رکورد	نام زلزله	سال وقوع	بزرگای زلزله	طول رکورد (Sec)	گام زمانی (Sec)
۱	LADSP۰۰۰	Landers	۱۹۹۲	۷٫۵	۵۰٫۰	۰٫۰۲۰
۲	LPSTG۰۰۰	Loma Prieta	۱۹۸۹	۷٫۱	۳۹٫۹	۰٫۰۰۵
۳	LPJIL۰۶۷	Loma Prieta	۱۹۸۹	۷٫۱	۳۹٫۹	۰٫۰۰۵
۴	LPLOB۰۰۰	Loma Prieta	۱۹۸۹	۷٫۱	۳۹٫۹	۰٫۰۰۵
۵	LPAND۲۷۰	Loma Prieta	۱۹۸۹	۷٫۱	۳۹٫۶	۰٫۰۰۵
۶	MHG۰۶۰۹۰	Morgan Hill	۱۹۸۴	۶٫۱	۲۹٫۹	۰٫۰۰۵
۷	NRORR۳۶۰	Northridge	۱۹۹۴	۶٫۸	۴۰٫۰	۰٫۰۲۰

جدول ۴. خلاصه نتایج حاصل از هفت رکورد زلزله.

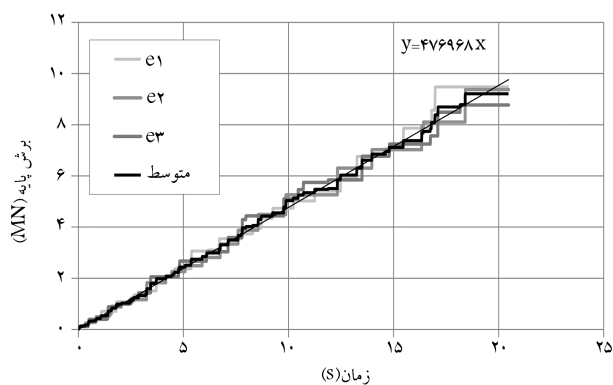
شماره رکورد	برش پایه (مگانیوتن)	تنش برشی گرهی بیشینه (مگاپاسکال)	تنش گرهی بیشینه در راستای زلزله (مگاپاسکال)	جاب‌جایی بیشینه سیال در گره ۵ و ۷ در راستای زلزله (متر)	ارتفاع بیشینه موج آب (متر)
۱	۴٫۳۶۴۶	۳۴٫۱۱۳۳	۵٫۳۵۵۲	۰٫۰۰۲۹	۰٫۳۹۵۸
۲	۳٫۵۷۴۶	۲۷٫۶۸۲۴	۴٫۶۳۵۲	۰٫۰۰۲۳	۰٫۶۰۶۹
۳	۵٫۴۰۱۷	۴۱٫۶۷۲۷	۷٫۳۸۰۴	۰٫۰۰۵۴	۰٫۳۶۰۰
۴	۵٫۱۱۶۳	۳۹٫۹۵۰۰	۶٫۰۹۰۵	۰٫۰۰۴۹	۰٫۱۶۸۲
۵	۳٫۱۹۷۹	۲۴٫۱۸۳۲	۴٫۴۵۵۴	۰٫۰۰۲۹	۰٫۵۰۲۶
۶	۳٫۱۱۲۵	۲۴٫۲۲۸۷	۴٫۱۶۰۱	۰٫۰۰۱۸	۰٫۳۵۲۸
۷	۲٫۴۹۸۷	۱۹٫۲۴۱۴	۳٫۵۲۲۴	۰٫۰۰۲۶	۰٫۳۷۵۶
متوسط	۳٫۸۹۵۲	۳۰٫۱۵۳۱	۵٫۰۸۵۶	۰٫۰۰۳۲	۰٫۳۹۴۶

جدول ۵. نتایج حاصل از سه تابع شتاب (سری e) در ثانیه دهم.

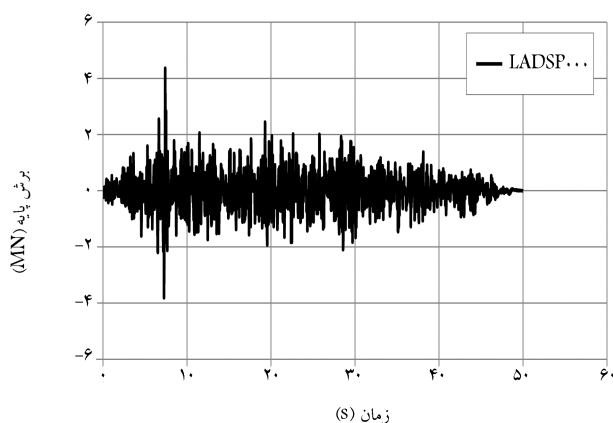
شماره رکورد	برش پایه (مگانیوتن)	تنش برشی گرهی بیشینه (مگاپاسکال)	تنش گرهی بیشینه در راستای زلزله (مگاپاسکال)	جاب‌جایی بیشینه سیال در گره ۵ و ۷ در راستای زلزله (متر)	ارتفاع بیشینه موج آب (متر)
e۱	۴٫۸۹۲۵	۳۹٫۱۳۲۵	۶٫۱۲۴۷	۰٫۰۰۳۳	۰٫۳۸۰۰
e۲	۴٫۷۲۱۰	۳۸٫۷۶۱۶	۵٫۹۵۸۴	۰٫۰۰۴۰	۰٫۴۱۰۰
e۳	۴٫۶۸۵۰	۳۵٫۷۰۷۳	۵٫۸۸۰۴	۰٫۰۰۳۳	۰٫۳۹۸۰
متوسط	۴٫۷۶۶۲	۳۷٫۸۶۷۱	۵٫۹۸۷۸	۰٫۰۰۳۶	۰٫۳۹۶۰

جدول ۶. نتایج حاصل از سه تابع شتاب (سری a) در ثانیه دهم.

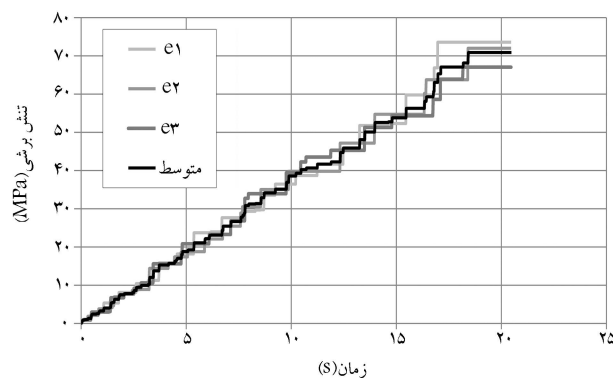
شماره رکورد	برش پایه (مگانیوتن)	تنش برشی گرهی بیشینه (مگاپاسکال)	تنش گرهی بیشینه در راستای زلزله (مگاپاسکال)	جاب‌جایی بیشینه سیال در گره ۵ و ۷ در راستای زلزله (متر)	ارتفاع بیشینه موج آب (متر)
a۱	۳٫۱۱۶۷	۲۴٫۹۲۹۰	۴٫۲۵۲۴	۰٫۰۰۲۲	۰٫۹۵۰۰
a۲	۳٫۰۲۲۷	۲۴٫۰۷۳۰	۴٫۱۲۶۳	۰٫۰۰۲۲	۰٫۹۵۰۰
a۳	۳٫۰۲۵۶	۲۲٫۵۵۶۱	۴٫۲۱۸۱	۰٫۰۰۲۴	۱٫۰۰۰۰
متوسط	۳٫۰۵۵۰	۲۳٫۸۵۲۷	۴٫۱۹۸۹	۰٫۰۰۲۳	۰٫۹۷۰۰



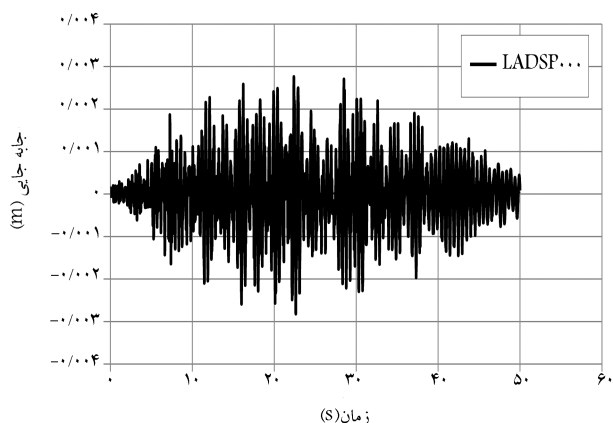
شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی بارش پایه در سری e.



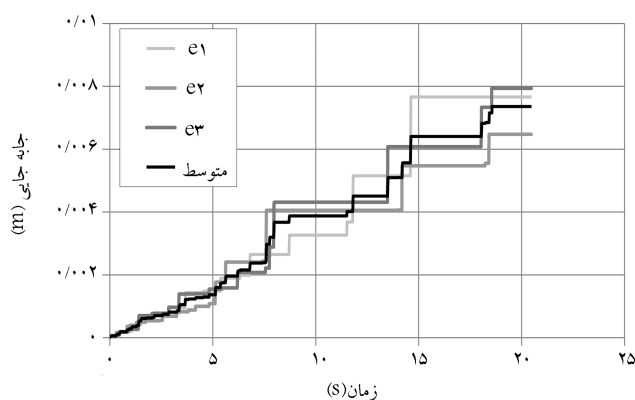
شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی بارش پایه‌ی رکورد ۱.



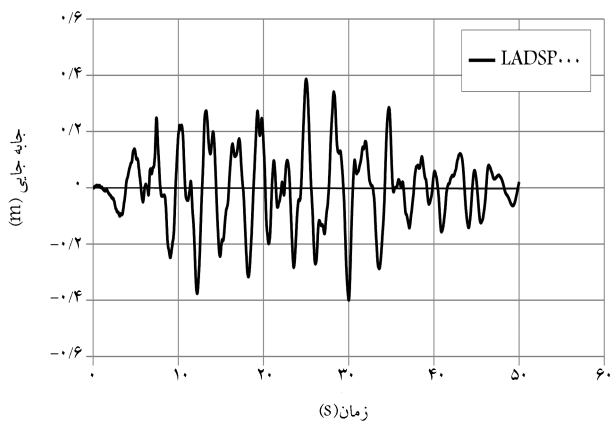
شکل ۱۵. تاریخچه‌ی زمانی اضافه تنش برشی بیشینه در سری e.



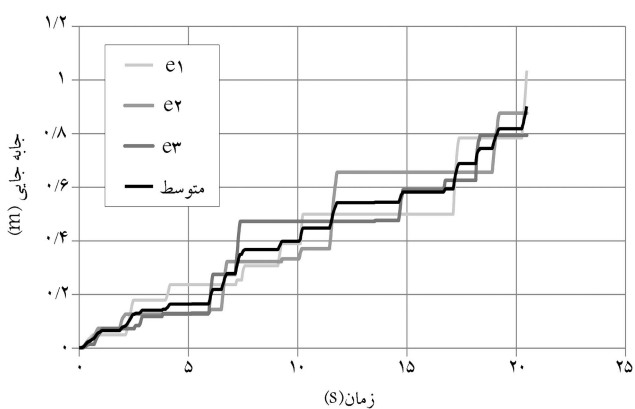
شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی بیشینه‌ی پوسته (گروه ۵) در راستای زلزله در رکورد ۱.



شکل ۱۶. تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی بیشینه‌ی پوسته در راستای زلزله در سری e.



شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی ارتفاع جابه‌جایی بیشینه‌ی سیال (گروه ۵) در رکورد ۱.



شکل ۱۷. تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی بیشینه‌ی سیال در راستای عمودی در سری e.

خلاصه‌ی نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به فرض رفتار خطی مدل و همچنین روند خطی افزایش شدت در توابع زمان دوام مورد استفاده، مشاهده می‌شود که روند تغییرات پاسخ نیز خطی است. در مورد بارش پایه و تنش در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ پراکندگی نتایج کم‌تر از مقادیر مربوط به تغییر مکان و ارتفاع بیشینه‌ی سیال است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) و به نظر می‌رسد که در این موارد استفاده از یک تابع شتاب به‌جای سه تابع تخمین دقت مناسبی ارائه دهد.

جدول ۷. خلاصه‌ی نتایج هفت رکورد زلزله و سری e.

شماره رکورد	برش پایه (مگانیوتن)	تنش برشی گرهی بیشینه (مگاپاسکال)	تنش گرهی بیشینه در راستای زلزله (مگاپاسکال)	جابه‌جایی بیشینه سیال در گره ۵ و ۷ در راستای زلزله (متر)	ارتفاع بیشینه موج آب (متر)
e۱	۴,۸۹۲۵	۳۹,۱۳۲۵	۶,۱۲۴۷	۰,۰۰۳۳	۰,۳۸۰۰
e۲	۴,۷۲۱۰	۳۸,۷۶۱۶	۵,۹۵۸۴	۰,۰۰۴۰	۰,۴۱۰۰
e۳	۴,۶۸۵۰	۳۵,۷۰۷۳	۵,۸۸۰۴	۰,۰۰۳۳	۰,۳۹۸۰
متوسط	۴,۷۶۶۲	۳۷,۸۶۷۱	۵,۹۸۷۸	۰,۰۰۳۶	۰,۳۹۶۰
۱	۴,۳۶۴۶	۳۴,۱۱۳۳	۵,۳۵۵۲	۰,۰۰۲۹	۰,۳۹۵۸
۲	۳,۵۷۴۶	۲۷,۶۸۲۴	۴,۶۳۵۲	۰,۰۰۲۳	۰,۶۰۶۹
۳	۵,۴۰۱۷	۴۱,۶۷۲۷	۷,۳۸۰۴	۰,۰۰۵۴	۰,۳۶۰۰
۴	۵,۱۱۶۳	۳۹,۹۵۰۰	۶,۰۹۰۵	۰,۰۰۴۹	۰,۱۶۸۲
۵	۳,۱۹۷۹	۲۴,۱۸۳۲	۴,۴۵۵۴	۰,۰۰۲۹	۰,۵۰۲۶
۶	۳,۱۱۲۵	۲۴,۲۲۸۷	۴,۱۶۰۱	۰,۰۰۱۸	۰,۳۵۲۸
۷	۲,۴۹۸۷	۱۹,۲۴۱۴	۳,۵۲۲۴	۰,۰۰۲۶	۰,۳۷۵۶
متوسط	۳,۸۹۵۲	۳۰,۱۵۳۱	۵,۰۸۵۶	۰,۰۰۳۲	۰,۳۹۴۶

محاسبه شد، که پرورد نظیر آن برابر است با: $T_{0.1} = 1/f_{0.1} = 0.0794 (Sec)$. اگر در این پرورد به نمودار طیف میانگین ۷ زلزله و میانگین ۳ تابع شتاب سری e در شکل ۱۸ توجه شود، بالاتر بودن طیف سری e نسبت به طیف میانگین زلزله‌ها مشاهده می‌شود. جالب است بدانیم وقتی این اختلاف به صورت عددی محاسبه شد به همان اختلاف عددی که در برش و تنش‌ها بود رسیدیم. حال این سؤال مطرح می‌شود که چرا مقادیر تغییر مکان‌های سطح سیال انطباق خوبی دارد.

می‌دانیم که تغییر مکان سطح سیال بیشتر به فرکانس بخش موج (نوسانی) بستگی دارد. این مقدار برابر $f = 0.29935 (Hz)$ محاسبه شد، و بنابراین پرورد نظیر آن برابر $T_0 = 3.34 (Sec)$ است. در این پرورد سطح سیال در نقطه‌یی قرار می‌گیرد که نمودار طیف میانگین زلزله‌ها با طیف میانگین توابع شتاب زمان دوام سری e انطباق کامل دارد. پس از مقایسه نتایج زلزله‌ها با توابع شتاب زمان دوام سری e، نتایج بالا را با توابع اولیه‌ی زمان دوام سری a نیز مقایسه خواهیم کرد. به منظور مقایسه‌ی نتایج سری e، a و هفت رکورد زلزله لازم است نتایج را یک پایه کنیم. بنابراین برش پایه را هم‌پایه کردیم و با این ضریب نتایج را اصلاح و مقایسه کردیم. بدین منظور برش پایه به کمک آئین‌نامه‌ی «بخش چهارم یوروکد ۸ (۱۹۹۸)» محاسبه شد:

$$T_{imp} = C_i \frac{\sqrt{\rho H}}{\sqrt{\frac{S}{R} \sqrt{E}}} \quad (1)$$

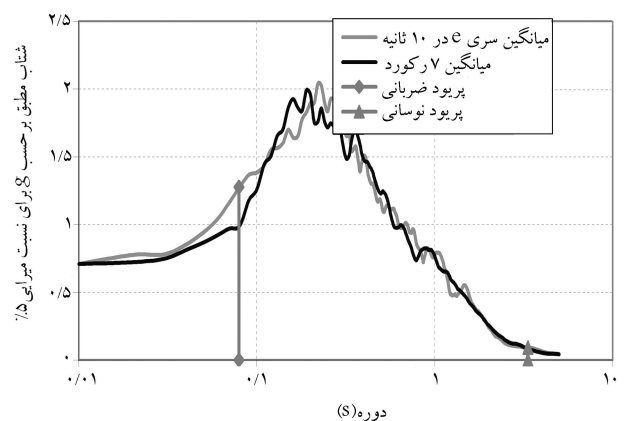
$$T_{con} = C_c \sqrt{R} \quad (2)$$

$$T_{imp} = 6.06 \frac{\sqrt{1000} \times 7.392}{\sqrt{\frac{0.2 \times 0.8}{4.85}}} = 0.007721 (Sec) \quad (3)$$

$$T_{con} = 1.48 \times \sqrt{4.85} = 3.25936 (Sec) \quad (4)$$

مقایسه‌ی نتایج سری e و هفت رکورد زلزله کالیبره‌شده با ضرایب سری e

مقایسه‌ی نتایج حاصل از میانگین زلزله‌ها با نتایج سری e در حالتی که برش پایه کالیبره نشده‌است، نشان می‌دهد که در مقادیر تغییر مکان سطح سیال انطباق خوبی داریم ولی در مقادیر برش پایه و تنش‌ها اختلافی حدود ۲۰٪ مشاهده می‌شود. در تفسیر اختلاف بین تنش و برش، نمودار طیف میانگین زلزله‌ها و طیف سری e در شکل ۱۸ نشان می‌دهد که در برخی نقاط از جمله در پروردهای پائین نمودار، طیف سری e نسبت به طیف میانگین زلزله‌ها در شروع نمودار دو طیف بالاتر است. چنان که می‌دانیم تنش‌ها و برش پایه بیشتر به بخش سخت ارتباط دارد. در تحلیل کیفی فرکانس مود بخش سخت (ضربانی) مدل مخزن A برابر $f_{0.1} = 12.598 (Hz)$



شکل ۱۸. طیف پاسخ میانگین زلزله‌ها و میانگین سری e و اختلاف آن در پروردهای اصلی.

جدول ۸. نتایج کل پس از کالیبراسیون.

شماره رکورد	برش پایه (مگا پاسکال)	ضریب اصلاح	برش پایه اصلاح شده (مگا پاسکال)	تنش برشی گرهی بیشینه (مگا پاسکال)	تنش برشی در راستای زلزله (مگا پاسکال)	جابه جایی بیشینه سیال در گره ۵ و ۷ در راستای زلزله (متر)	ارتفاع بیشینه موج آب (متر)
e1	۴,۸۹۲۵	۰,۶۷۶۵	۳,۳۱۰۰	۲۶,۴۷۴۷	۴,۱۴۳۶	۰,۰۰۲۲	۰,۲۵۷۱
e2	۴,۷۲۱۰	۰,۷۰۱۱	۳,۳۱۰۰	۲۷,۱۷۶۵	۴,۱۷۷۵	۰,۰۰۲۸	۰,۲۸۷۵
e3	۴,۶۸۵۰	۰,۷۰۶۵	۳,۳۱۰۰	۲۵,۲۲۷۲	۴,۱۵۴۵	۰,۰۰۲۳	۰,۲۸۱۲
متوسط	۴,۷۶۶۲	۰,۶۹۴۵	۳,۳۱۰۰	۲۶,۲۹۷۸	۴,۱۵۸۴	۰,۰۰۲۵	۰,۲۷۵۰
a1	۳,۱۱۶۷	۱,۰۶۲۰	۳,۳۱۰۰	۲۶,۴۷۵۱	۴,۵۱۶۲	۰,۰۰۲۳	۱,۰۰۸۹
a2	۳,۰۲۲۷	۱,۰۹۵۰	۳,۳۱۰۰	۲۶,۳۶۰۸	۴,۵۱۸۵	۰,۰۰۲۴	۱,۰۴۰۳
a3	۳,۰۲۵۶	۱,۰۹۴۰	۳,۳۱۰۰	۲۴,۶۷۶۱	۴,۶۱۴۶	۰,۰۰۲۶	۱,۰۹۴۰
متوسط	۳,۰۵۵۰	۱,۰۸۳۵	۳,۳۱۰۰	۲۵,۸۴۳۸	۴,۵۴۹۵	۰,۰۰۲۵	۱,۰۴۷
۱	۴,۳۶۴۶	۰,۷۵۸۴	۳,۳۱۰۰	۲۵,۸۷۰۷	۴,۰۶۱۳	۰,۰۰۲۲	۰,۳۰۰۲
۲	۳,۵۷۴۶	۰,۹۲۶۰	۳,۳۱۰۰	۲۵,۶۳۳۹	۴,۲۹۲۱	۰,۰۰۲۱	۰,۵۶۲۰
۳	۵,۴۰۱۷	۰,۶۱۲۸	۳,۳۱۰۰	۲۵,۵۳۵۵	۴,۵۲۲۴	۰,۰۰۳۳	۰,۲۲۰۶
۴	۵,۱۱۶۳	۰,۶۴۶۹	۳,۳۱۰۰	۲۵,۸۴۵۶	۳,۹۴۰۲	۰,۰۰۳۲	۰,۱۰۸۸
۵	۳,۱۹۷۹	۱,۰۳۵۰	۳,۳۱۰۰	۲۵,۰۳۰۷	۴,۶۱۱۶	۰,۰۰۳۰	۰,۵۲۰۲
۶	۳,۱۱۲۵	۱,۰۶۳۴	۳,۳۱۰۰	۲۵,۷۶۶۰	۴,۴۲۴۱	۰,۰۰۱۹	۰,۳۷۵۲
۷	۲,۴۹۸۷	۱,۳۲۴۷	۳,۳۱۰۰	۲۵,۴۸۸۵	۴,۶۶۶۰	۰,۰۰۳۴	۰,۴۹۷۶
متوسط	۳,۸۹۵۲	۰,۹۰۹۶	۳,۳۱۰۰	۲۵,۵۹۵۸	۴,۳۵۹۷	۰,۰۰۲۷	۰,۳۶۹۲

پریود کوتاه رخ می دهد تطابق خوبی دارد. اما در مورد نوسان سطح آزاد سیال و مواردی که در پریود بلند رخ می دهد اختلاف وجود دارد، به این دلیل که تحریک سری a در پریود بلند بسیار شدید است. در این موارد استفاده از سری توابع منطبق با زلزله های واقعی (مشابه سری e) ضرورت می یابد و توابع سری a برای این منظور مناسب نیستند.

۳. در صورت مدل کردن سیال و استفاده از المان های خاص برای بالابردن دقت مدل، حجم محاسبات لازم بسیار زیاد و تقریباً برای مقاصد طراحی غیر عملی است. روش زمان دوام با کاهش تعداد تحلیل های لازم می تواند در این زمینه راهگشا باشد.

۴. استفاده ی مستقیم از رکوردهای زلزله به دلیل ماهیت تصادفی زلزله و تنوع ساختگاه و سازه ها نیاز به انجام حجم زیادی از محاسبات عددی دارد که بعضاً کاربرد این روش ها را غیر عملی می سازد. استفاده از توابع شتاب متناظر با طیف های پاسخ به دلیل وجود آیین نامه های محلی و اختصاصی کردن آن برای ساختگاه و این که طیف پاسخ در واقع میانگین پاسخ واقعی نسبت به تعداد قابل توجهی از زلزله هاست به عمل نزدیک تر است.

۵. با استفاده از توابع شتاب زمان دوام سازگار با زلزله های واقعی می توان میانگین پاسخ مخزن مورد مطالعه را از لحاظ تنش ها، تغییر شکل ها و ارتفاع موج در شدت های تحریک مختلف با دقت مناسبی در محدوده ی رفتار خطی پیش بینی کرد. بررسی عملکرد این توابع در ناحیه ی رفتار غیرخطی نیاز به مطالعات گسترده تری دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف و شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت ایران به دلیل حمایت از پروژه حاضر (NIOEC2/ER-CV/CON-EX05-00) ابراز می نمایند.

$$Q = (m_i + m_W + m_r)S_a(T_{imp}) + m_c S_a(T_{con})$$

$$\xrightarrow{table} \frac{m_i}{m} = 0,686 \Rightarrow m_i = 374730,82$$

$$\xrightarrow{table} \frac{m_c}{m} = 0,314 \Rightarrow m_c = 171524,02$$

$$f_i = 12,598 \xrightarrow{28^\circ} B_i = 2,15815$$

$$f_c = 0,29935 \xrightarrow{28^\circ} B_c = 0,71641$$

$$Q = 3309986,651 (N) \quad (5)$$

پس از مقیاس کردن برش پایه برای زلزله ها و توابع شتاب زمان دوام سری های e و a مشاهده شد که اولاً برش پایه برای سری a، که منطبق بر طیف آیین نامه ی ۲۸۰۰ ایران است، با مقدار برش پایه ی ایستا نزدیکی دارد. دلیل این امر آن است که برای محاسبه ی برش پایه ی ایستا از طیف آیین نامه ی ۲۸۰۰ استفاده شده است. ثانیاً مقدار نوسان سطح آزاد آب در سری a نسبت به زلزله ها و سری e خیلی بیشتر است زیرا شدت سری a در پریود بلند غیرمتعارف است که با آیین نامه ی ۲۸۰۰ ایران سازگار است و به طور کلی با زلزله های واقعی سازگار نیستند. در سایر موارد بعد از هم پایه کردن برش پایه تطابق خوبی مشاهده می شود. در جدول ۸ نتایج حاصل سری e، سری a و زلزله ها را پس از کالیبراسیون نشان داده شده است.

نتیجه گیری

۱. در تحلیل های خطی نتایج به دست آمده از هر یک از توابع شتاب در یک سری با هم تطابق خوبی دارند. به نظر می رسد در عمل می توان در محدوده ی خطی به جای استفاده از سه تابع شتاب در یک سری از نتایج تحلیل یک تابع شتاب به نتایج تقریبی مناسب برای طراحی اولیه رسید.

۲. توابع شتاب سری e و a در مقادیر برش پایه و تنش پوسته و اصولاً هر آنچه در

پانوشت

1. convective(sloshing)
2. impulsive
3. American petroleum institute
4. Euro code 8 part 4
5. endurance time method

منابع

1. Manos, G. and Clough, R.W. "Tank damage during the May 1983 Coalinga earthquake", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **13**, pp. 449-466 (1985).
2. Seyed Razzaghi, M. "Seismic fragility curves for on ground steel oil storage tanks", PHD Thesis international Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran (2007).
3. Westergard, H.M. "Water pressure on dams during earthquakes", *Transactions ASCE*, **98**, pp. 418-472 (1933).
4. Hoskins, L.M. and Jacobsen, L.S. "Water pressure in a tank caused by simulated earthquake," *Bulletin of the Seismological Society of America*, **24**, pp. 1-32 (1934).
5. Jacobsen, L.S. "Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier," *Bulletin of the Seismological Society of America*, **39**(3), pp. 189-203 (1949).
6. Housner, G.W., *Earthquake Pressure on Fluid Containers*, California Institute of Technology, project No. 081-095, Pasadena, California, (1954).
7. Veletsos, A.S. and Yang, J.Y. "Earthquake response of liquid storage tanks advances in civil engineering through mechanics", *Proceeding of the Second Engineering Mechanics Specialty Conference*, ASCE, Raleigh, pp. 1-24 (1977).
8. Haroun, M.A.; Housner, G.W. "Seismic design of liquid-storage tanks", *Journal of Technical Council, ASCE, New York*, **107**(1), pp 191-20 (1981).
9. Edwards, N.W. "A procedure for dynamic analysis of thin walled cylindrical liquid storage tanks subjected to lateral ground motion", PHD Thesis University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (1969).
10. Malhotra, P.K.; Wenk, T. and Wieland, M. "Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks", *Structural Engineering and International*, **10**(3), pp. 197-201 (2000).
11. Hamdan, F.H. "Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks", *Constructional Steel Research* **53**, pp. 307-333 (2000).
12. Wozniac, R.C. and Mitchell, W.W., *Basis of Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks*, Sessions on Advances in Storage Tank Design, American Petroleum Institute, Washington (1978).
13. Estekanchi, H.E.; Valamanesh, V. and Vafai, A. "Application of endurance Time method in linear seismic analysis", *Engineering Structures*, **29**(10), pp. 2551-2562 (October 2007).
14. Estekanchi, H.E.; Vafai, A. and Sadeghazar, M. "Endurance time method for seismic analysis and design of structures", *Scientia Iranica*, **11**(4), pp. 361-370 (2004).
15. Estekanchi, H.E.; Arjomandi, K. and Vafai, A. "Estimating structural damage of steel moment frames by Endurance Time method", *Constructional Steel Research*, **64**(10), pp. 145-155 (2008).
16. Valamanesh, V.; Estekanchi, H.E. and Vafai, A., "Investigation of endurance time method in seismic analysis of two dimensional steel frames as compared to static method", *Sharif Journal of Science and Technology*, (35), pp. 47-55 (2006).
17. Samanipour, K.; Vafai, A.; Estekanchi, H.E. and Keivani, J. "Application possibility of endurance time method in seismic design of ground-supported steel storage tanks", *Sharif Journal of Science and Technology*, (46), pp. 59-72 (2009).
18. Barton, D.C. and Parker, J.V. "Finite element analysis of the seismic response of anchored and unanchored liquid storage tanks", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **15**(3), pp. 299-322 (1987).
19. U.S. Atomic Energy Commission, "Nuclear reactors and earthquakes", TID-7024, Washington D.C., pp. 367-390 (1963).
20. Balendra, T.; Ang, K.K.; Paramasivam, P. and Lee, S.L. "Seismic design of flexible cylindrical liquid storage tanks", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **10**, pp. 477-496 (1982).
21. Vaezi, D. "Nonlinear seismic analysis of ground-supported steel storage tanks using endurance time method", MSc Thesis Sharif University of Technology, Tehran (2008).

