

مدل سازی رفتار غیر خطی هندسی مخازن فولادی در نرم فزار SAP با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال به کمک روش جرم افزوده

دامون سلطانی ایلخچی^{۱*}، پیمان سلطانی^۲

۱- مدیرعامل شرکت ابادگران عصر اسیا damoon.soltani@gmail.com

۲- رئیس هیات مدیره شرکت ابادگران عصر اسیا peyman.soltani01@gmail.com

خلاصه

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای مخازن فولادی ذخیره مایعات با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه در نرم افزار SAP2000 بررسی شده است. به منظور کاهش هزینه محاسباتی و جلوگیری از مشکلات همگرایی در مدل سازی مستقیم سیال، از روش جرم افزوده برای شبیه سازی اثر هیدرودینامیکی مایع استفاده شد. صحت مدل با مقایسه دوره تناوب طبیعی و شکل مود اول با نتایج مرجع ارزیابی شد و تطابق مناسبی به دست آمد. سپس مخزن تحت رکورد زلزله تحلیل شد و نتایج نشان داد که تنش های ایجاد شده از تنش تسلیم فولاد فراتر رفته و سازه وارد محدوده غیرخطی شده است. همچنین الگوی خرابی مشاهده شده بیانگر وقوع کماتش از نوع پافیلی در ناحیه پایینی مخزن است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که روش جرم افزوده، روشی مناسب، ساده و کارآمد برای تحلیل لرزه‌ای مخازن فولادی با دقت قابل قبول است.

کلمات کلیدی: مخزن فولادی، اندرکنش سیال و سازه، روش جرم افزوده، تحلیل لرزه‌ای، کماتش پافیلی

۱. مقدمه

مخازن ذخیره مایعات از جمله سازه های حیاتی در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، آب و فاضلاب به شمار می روند و نقش بسیار مهمی در تأمین، نگهداری و توزیع سیالات مختلف ایفا می کنند. عملکرد ایمن این سازه ها در شرایط بهره برداری عادی و به ویژه در هنگام و پس از وقوع زلزله، از اهمیت ویژه ای برخوردار است؛ زیرا هرگونه آسیب در این مخازن می تواند علاوه بر خسارات اقتصادی مستقیم، پیامدهای گسترده زیست محیطی، ایمنی و اجتماعی نیز به دنبال داشته باشد. در مناطق لرزه خیز، این اهمیت دوچندان می شود، چرا که خرابی مخازن ذخیره می تواند به نشت مواد خطرناک، آتش سوزی، انفجار و حتی وقوع حوادث موسوم به NATECH، یعنی سوانح فناورانه ناشی از مخاطرات طبیعی، منجر شود. از این رو، ارزیابی رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره و دستیابی به راهکارهایی برای کاهش آسیب پذیری آن ها، یکی از موضوعات مهم و مورد توجه در مهندسی زلزله و مهندسی سازه به شمار می رود [۱-۳].

یکی از مهم ترین پدیده هایی که در مخازن حاوی مایع تحت اثر تحریکات خارجی، به ویژه زلزله، رخ می دهد، پدیده تلاطم یا Sloshing است. این پدیده در اثر حرکت نسبی مایع درون مخزن و نوسان سطح آزاد آن ایجاد می شود. هنگامی که مخزن تحت ارتعاشات ناشی از زلزله یا شتاب های ناگهانی قرار می گیرد، مایع درون آن شروع به حرکت رفت و برگشتی می کند و در نتیجه، فشارهای هیدرودینامیکی متغیری بر دیواره ها و کف مخزن اعمال می شود. این فشارهای دینامیکی می توانند نیروها و تنش های اضافی قابل توجهی در اجزای سازه ای مخزن ایجاد کنند و در صورت عدم پیش بینی صحیح در طراحی، منجر به

بروز آسیب‌های موضعی یا کلی شوند. شدت این اثرات در مخازنی با حجم زیاد مایع، ابعاد بزرگ، نسبت ارتفاع به شعاع متفاوت و نیز در شرایط تحریک شدید لرزه‌ای، بیشتر نمود پیدا می‌کند [۴].

بر خلاف سازه‌های متعارف نظیر ساختمان‌ها و پل‌ها، رفتار دینامیکی مخازن ذخیره مایعات به دلیل اندرکنش پیچیده بین مایع و سازه، ماهیتی متفاوت و پیچیده‌تر دارد. در این سازه‌ها، پاسخ سیستم صرفاً تابع مشخصات سازه‌ای نیست، بلکه ویژگی‌های مایع، هندسه مخزن، شرایط تکیه‌گاهی و نوع تحریک نیز به‌طور هم‌زمان بر پاسخ لرزه‌ای اثرگذار هستند. در واقع، اندرکنش سیال و سازه باعث می‌شود که نیروهای اینرسی زلزله به‌صورت فشارهای هیدرودینامیکی بر بدنه مخزن ظاهر شوند. یکی از مدل‌های کلاسیک و پرکاربرد در این زمینه، مدل مکانیکی ارائه‌شده توسط هاوسنر [۵] است. بر اساس این مدل، پاسخ هیدرودینامیکی سیستم مخزن-مایع را می‌توان به دو مؤلفه اصلی تقسیم کرد: مؤلفه ضربه‌ای یا تکانه‌ای و مؤلفه جابجایی یا همرفتی. در مؤلفه تکانه‌ای، بخش پایینی مایع تقریباً همگام با دیواره مخزن حرکت کرده و به‌صورت جرمی متصل به سازه رفتار می‌کند؛ در حالی که در مؤلفه همرفتی، بخش بالایی مایع با نوسان سطح آزاد همراه شده و حرکت تلاطمی از خود نشان می‌دهد.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که در بسیاری از مخازن ذخیره، به‌ویژه مخازن متعارف فولادی با پایه ثابت، مؤلفه ضربه‌ای نقش غالب‌تری در پاسخ کلی سازه و ایجاد خرابی‌های سازه‌ای ایفا می‌کند، در حالی که مؤلفه همرفتی عمدتاً با پدیده تلاطم سطح آزاد و مسائل بهره‌برداری مرتبط است [۶،۷]. با این حال، در شرایطی خاص، از جمله در مخازن با ابعاد بزرگ، مخازن با نسبت‌های هندسی خاص یا مخازنی که دارای بام ضعیف یا محدودیت ارتفاع آزاد مایع هستند، مؤلفه همرفتی نیز می‌تواند آثار مهمی داشته باشد و سبب سرریز مایع، ضربه به سقف و افزایش تقاضای لرزه‌ای شود. بنابراین، تحلیل صحیح رفتار مخازن نیازمند در نظر گرفتن هر دو مؤلفه پاسخ هیدرودینامیکی و ارزیابی جامع اثرات اندرکنش مایع و سازه است [۸].

تاریخچه زلزله‌های گذشته به‌خوبی نشان می‌دهد که مخازن ذخیره مایعات از جمله سازه‌هایی هستند که بارها در اثر ارتعاشات لرزه‌ای دچار آسیب‌های جدی شده‌اند. به عنوان نمونه، در زلزله لانگ‌بیچ در سال ۱۹۳۳، تعدادی از مخازن آب به دلیل تلاطم شدید مایع، دچار آسیب‌های غیرقابل جبران شدند. همچنین در زلزله‌های کالیفرنیا در سال ۱۹۵۲ و شیلی در سال ۱۹۶۰، آسیب‌های گسترده‌ای به مخازن ذخیره نفت وارد شد. در زلزله آلاسکا در سال ۱۹۶۴ نیز چندین مخزن نفت دچار آتش‌سوزی شدند [۹]. در ایران نیز زلزله سیلاخور در سال ۱۳۸۵ موجب وارد آمدن خسارات شدید به تعدادی از مخازن استوانه‌ای شد. بررسی رفتار این مخازن نشان داد که تحریک شدید زمین و ضعف در ظرفیت لرزه‌ای، از عوامل اصلی بروز خرابی بوده است [۱۰]. افزون بر این، زمین‌لرزه‌های مهمی نظیر زلزله سدن و لیک گرسمر در سال ۲۰۱۳، زلزله کایکورا در سال ۲۰۱۶ در نیوزیلند، زلزله توهوکو در سال ۲۰۱۱ در ژاپن و زلزله ناپا در سال ۲۰۱۴ در ایالات متحده نیز خسارات متعددی به مخازن وارد کرده‌اند؛ به‌طوری که در برخی موارد، کمانش موضعی دیواره، تغییرشکل شدید، نشت مایع و از کارافتادگی مخزن گزارش شده است [۱۱-۱۴].

از رایج‌ترین الگوهای خرابی در مخازن فولادی می‌توان به کمانش موضعی پایینی دیواره موسوم به کمانش پافیلی یا elephant foot buckling، کمانش لوزی‌شکل یا diamond buckling، گسیختگی اتصالات، چرخش صفحه کف و آسیب در ناحیه اتصال دیواره به کف اشاره کرد. این خرابی‌ها عمدتاً تحت تأثیر فشارهای هیدرودینامیکی، نیروهای اینرسی ناشی از جرم ضربه‌ای مایع و نیز تمرکز تنش‌های ایجادشده در نواحی بحرانی رخ می‌دهند. از این رو، در تحلیل و طراحی لرزه‌ای مخازن، دو پارامتر اساسی همواره مورد توجه قرار می‌گیرند: نخست فشار هیدرودینامیکی وارد بر بدنه و کف مخزن و دوم دامنه تلاطم سطح آزاد مایع [۱۵-۱۷]. پیش‌بینی دقیق این دو پارامتر، نقش تعیین‌کننده‌ای در برآورد عملکرد لرزه‌ای مخزن و جلوگیری از خرابی‌های احتمالی دارد.

رفتار تلاطمی مایع را می‌توان از دیدگاه ریاضی با استفاده از مدل‌ها و معادلات مختلفی توصیف کرد که انتخاب آن‌ها به عواملی نظیر شکل هندسی مخزن، مشخصات فیزیکی سیال، نوع تحریک دینامیکی و سطح دقت مورد نیاز وابسته است. در بسیاری از رویکردها، مسئله تلاطم به صورت یک مسئله اندرکنش چندفازی سیال-جامد در نظر گرفته می‌شود که در آن، مایع به عنوان محیطی پیوسته و تابع قوانین دینامیک سیالات مدل‌سازی شده و مخزن نیز به عنوان جسمی جامد با رفتار سازه‌ای مشخص مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادلات حاکم بر این سیستم معمولاً شامل معادلات حرکت مایع و سازه به همراه شرایط مرزی متناظر در سطح تماس سیال و سازه و سطح آزاد مایع هستند. به دلیل ماهیت غیرخطی این روابط، به‌ویژه در حالت ارتعاشات شدید، حل آن‌ها غالباً نیازمند استفاده از روش‌های عددی پیشرفته مانند روش اجزای محدود، دینامیک سیالات محاسباتی، روش اجزای مرزی و روش‌های بدون شبکه است [۱۸].

در دهه‌های اخیر، پژوهشگران متعددی تلاش کرده‌اند پاسخ لرزه‌ای مخازن حاوی مایع را با استفاده از روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دهند. هاوسنر [۴] یکی از نخستین مدل‌های تحلیلی پرکاربرد را برای برآورد فشار هیدرودینامیکی ناشی از تحریک افقی زمین ارائه کرد. پس از آن، هارون و طیل [۱۸] مدل اجزای محدودی برای تحلیل پاسخ دینامیکی مخازن پیشنهاد کردند. پارک و همکاران [۱۹] با استفاده از روش اجزای مرزی، رفتار مخازن مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین، کیم و همکاران، چن و همکاران، هاسکینز و جاکوبسن، یانگ و کیانوش و چن هر یک از زوایای مختلف به بررسی فشار هیدرودینامیکی، جابجایی دیواره‌ها و پاسخ لرزه‌ای مخازن پرداخته‌اند [۲۱-۲۵]. افزون بر این، پژوهشگرانی مانند ولتسوس [۲۵]، وو و همکاران [۲۶]، استکانچی و عالم‌گیری [۲۷]، جمشیدی و همکاران [۲۸] و هوانگ و همکاران [۲۹]، پدیده تلاطم را با در نظر گرفتن اثرات ویسکوزیته، غیرخطی بودن، حوزه زمان و مدل‌سازی سه‌بعدی مخازن بررسی کرده‌اند.

یکی از چالش‌های مهم در تحلیل مخازن تحت تحریک شدید، مدل‌سازی آشفتگی سطح آزاد مایع و رفتارهای کاملاً غیرخطی نظیر شکستن موج، جهش هیدرولیکی، اغتشاش شدید و اندرکنش پیچیده سیال و سازه است. در چنین شرایطی، روش‌های مرسوم شبکه‌مبنا ممکن است با محدودیت‌هایی مواجه شوند. از این رو، روش هیدرودینامیک ذرات هموار یا SPH، به عنوان یک روش لاگرانژی و بدون شبکه، مورد توجه قرار گرفته است. این روش به دلیل قابلیت مناسب در مدل‌سازی جابه‌جایی‌های بزرگ، تغییر شکل‌های شدید و سطوح آزاد، کاربرد گسترده‌ای در شبیه‌سازی مسائل دینامیک سیالات یافته است. برای مثال، موناگان [۳۰] در سال ۱۹۹۴ توانست با استفاده از این روش، جریان‌های سطح آزاد نظیر شکست سد را با موفقیت مدل‌سازی کند. همچنین، شائو و همکاران [۳۱] با ارائه نسخه‌ای اصلاح‌شده از این روش، دقت محاسبه میدان فشار آب را از طریق اصلاح چگالی و الگوریتم درونیایی هسته‌ای بهبود بخشیدند.

برای کاهش خطر خرابی مخازن در برابر زلزله، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که از میان آن‌ها، دو راهبرد اصلی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نخست، افزایش ضخامت اجزای مخزن شامل ورق دیواره و کف، که موجب کاهش تنش‌های محوری، کاهش احتمال کمانش دیواره و محدود شدن چرخش صفحه کف می‌شود. با این حال، این راهکار در کنار مزایای خود، می‌تواند باعث افزایش جرم سازه، افزایش انرژی ورودی لرزه‌ای و در نهایت افزایش هزینه اجرایی پروژه شود. راهبرد دوم، استفاده از سامانه‌های کنترل غیرفعال نظیر میراگرها و جداسازهای لرزه‌ای است که با جذب و استهلاک انرژی زلزله، تقاضای لرزه‌ای وارد بر مخزن را کاهش می‌دهند. اگرچه این سامانه‌ها در بسیاری از موارد کارآمد هستند، اما طراحی، تحلیل و اجرای آن‌ها با پیچیدگی‌های قابل توجهی همراه بوده و هزینه‌های اولیه نسبتاً بالایی دارند [۳۲-۳۶].

با وجود مطالعات فراوان در زمینه استفاده از سامانه‌های کنترل سازه‌ای برای کاهش پاسخ لرزه‌ای و تلاطم مایع در مخازن، همچنان بررسی راهکارهای ساده‌تر، اقتصادی‌تر و عملی‌تر مورد توجه پژوهشگران قرار دارد. در این میان، استفاده از روش کلاسیک افزایش ضخامت، به دلیل سهولت اجرا، قابلیت انطباق با استانداردهای موجود و امکان کاربرد در پروژه‌های متعارف

صنعتی، همچنان یکی از گزینه‌های مهم در طراحی لرزه‌ای مخازن به شمار می‌رود. با این حال، این پرسش اساسی مطرح است که آیا ضخامت‌های پیشنهادی بر اساس روابط استاندارد و طیف‌های میانگین، برای تمامی رکوردهای زلزله و شرایط واقعی لرزه‌ای مناسب و کافی هستند یا خیر.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مخازن ذخیره، به‌عنوان سازه‌هایی که انتظار می‌رود پس از زلزله نیز قابلیت بهره‌برداری خود را حفظ کنند، در برابر تحریکات لرزه‌ای آسیب‌پذیری قابل‌توجهی دارند. از این‌رو، تحلیل دقیق رفتار آن‌ها و ارزیابی کفایت ضوابط طراحی موجود، ضرورتی انکارناپذیر است. بر همین اساس، در پژوهش حاضر، رفتار غیرخطی هندسی و مصالح مخازن ذخیره مایع تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از نرم افزار SAP2000 و روش جرم افزوده استفاده شده است.

۲. روش جرم افزوده

روش جرم افزوده یکی از روش‌های پرکاربرد و کلاسیک در تحلیل اندرکنش سیال و سازه است که به‌ویژه برای بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن حاوی مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحلیل دقیق اندرکنش سیال-سازه، مدل‌سازی هم‌زمان سیال به‌صورت سه‌بعدی و غیرخطی و سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی و مصالح، منجر به افزایش قابل توجه هزینه محاسباتی و زمان تحلیل می‌شود. علاوه بر این، پیچیدگی عددی این مدل‌ها می‌تواند باعث بروز ناپایداری عددی و عدم همگرایی نتایج شود. به همین دلیل، برای ساده‌سازی مسئله و کاهش هزینه محاسباتی، روش‌های معادل‌سازی مختلفی توسعه یافته‌اند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، روش جرم افزوده است.

ایده اصلی روش جرم افزوده بر این فرض استوار است که اثر دینامیکی سیال بر سازه را می‌توان به‌صورت یک جرم معادل که به سازه متصل است، در نظر گرفت. هنگامی که یک مخزن حاوی مایع تحت تحریک لرزه‌ای قرار می‌گیرد، دیواره مخزن شروع به حرکت می‌کند. در این حالت، سازه نه‌تنها جرم خود، بلکه بخشی از جرم مایع مجاور را نیز به حرکت در می‌آورد. این بخش از مایع که همراه با سازه شتاب می‌گیرد، به‌عنوان جرم افزوده شناخته می‌شود.

از دیدگاه فیزیکی، جرم افزوده نشان‌دهنده این واقعیت است که برای شتاب دادن به سازه در حضور سیال، نیروی بیشتری نسبت به حالتی که سازه در خلأ یا بدون سیال قرار دارد، مورد نیاز است. این نیروی اضافی ناشی از اینرسی سیال است و اثر آن را می‌توان به‌صورت افزایش جرم مؤثر سازه مدل‌سازی کرد. به بیان دیگر، حضور سیال باعث افزایش اینرسی سیستم می‌شود و این افزایش اینرسی به‌صورت جرم افزوده در معادلات حرکت سازه وارد می‌شود.

از نظر ریاضی، جرم افزوده به‌صورت یک جرم معادل تعریف می‌شود که اثر توزیع فشار هیدرودینامیکی سیال را بر پاسخ دینامیکی سازه در نظر می‌گیرد. این جرم معادل معمولاً تابعی از چگالی سیال، هندسه مخزن و الگوی حرکت سیال است. رابطه کلی جرم افزوده به صورت زیر بیان می‌شود:

(۱)

$$m_a = \rho V_{added}$$

که در آن، ρ چگالی سیال و V_{added} حجم مؤثر سیالی است که در حرکت سازه مشارکت می‌کند. این حجم، کل حجم مایع داخل مخزن نیست، بلکه تنها بخشی از مایع است که به‌طور مستقیم تحت تأثیر حرکت دیواره مخزن قرار گرفته و تقریباً هم‌فاز با آن حرکت می‌کند.

در مخازن استوانه‌ای، به‌ویژه تحت بارگذاری لرزه‌ای افقی، پاسخ دینامیکی سیال معمولاً به دو مؤلفه ضربه‌ای و همرفتی تقسیم می‌شود. روش جرم افزوده عمدتاً برای مدل‌سازی مؤلفه ضربه‌ای به کار می‌رود. در این مؤلفه، بخش پایینی مایع تقریباً به‌صورت جسم صلب همراه با مخزن حرکت می‌کند و تغییر شکل نسبی کمی دارد. از این‌رو، می‌توان اثر این بخش از سیال را به‌صورت یک جرم معادل به سازه افزود.

برای مخازن استوانه‌ای، حجم مؤثر سیال مشارکت‌کننده در حرکت ضربه‌ای را می‌توان با استفاده از روابط تحلیلی یا تجربی تقریب زد. در ساده‌ترین حالت و با در نظر گرفتن اولین مد تلاطم، جرم افزوده به‌صورت زیر برآورد می‌شود:

$$m_a = C \rho \pi R^2 h \quad (2)$$

در این رابطه، R شعاع مخزن، H ارتفاع مایع و C یک ضریب بدون بعد است که به نسبت هندسی مخزن، یعنی نسبت H/R ، و نوع مد حرکت سیال وابسته است. این ضریب معمولاً از نتایج تحلیلی یا جداول ارائه‌شده در مراجع معتبر به دست می‌آید.

در تحلیل دقیق‌تر، به جای در نظر گرفتن جرم افزوده متمرکز، می‌توان توزیع جرم افزوده را در ارتفاع مخزن لحاظ کرد. این کار با استفاده از توزیع فشار ضربه‌ای سیال روی دیواره مخزن انجام می‌شود. فشار ضربه‌ای ناشی از حرکت صلب سیال را می‌توان به صورت تابعی از مختصات قائم و محیطی بیان کرد. توزیع فشار ضربه‌ای به‌طور کلاسیک توسط ولتسوس و شیواکومار ارائه شده و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_i(\eta, \theta, t) = c_i(\eta) \rho R \ddot{x}_g(t) \cos \theta \quad (3)$$

در این رابطه، $\eta = z/H$ مختصات قائم بدون بعد، z ارتفاع اندازه‌گیری‌شده از کف مخزن، θ مختصات محیطی، R شعاع مخزن، $\ddot{x}_g(t)$ شتاب زمین و t زمان است. تابع $c_i(\eta)$ توزیع فشار ضربه‌ای را در راستای ارتفاع مخزن توصیف می‌کند. تابع $c_i(\eta)$ از کسر فشار کل سیال به مؤلفه‌های ضربه‌ای و همرفتی به دست می‌آید و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$c_i(\eta) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} c_{cn}(\eta) \quad (4)$$

که در آن $c_{cn}(\eta)$ تابع توزیع فشار همرفتی متناظر با مد n ام تلاطم است. این توابع معمولاً بر اساس توابع بسل مرتبه اول تعریف می‌شوند و شامل پارامترهایی هستند که ریشه‌های معادلات بسل را در بر می‌گیرند. در عمل، این سری به‌سرعت همگرا می‌شود و استفاده از سه جمله اول برای دستیابی به دقت مناسب کفایت می‌کند.

پس از تعیین توزیع فشار ضربه‌ای در ارتفاع مخزن، می‌توان جرم افزوده را به‌صورت توزیع‌شده در ارتفاع دیواره اعمال کرد. جرم افزوده المانی در ارتفاع مشخص به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m_i = c_i(\eta) \cdot \rho \cdot R \cdot A_{element} \quad (5)$$

که در آن $A_{element}$ مساحت المان دیواره مخزن است. این جرم افزوده به گره‌های سازه‌ای متناظر تخصیص داده می‌شود و در تحلیل دینامیکی سازه لحاظ می‌گردد.

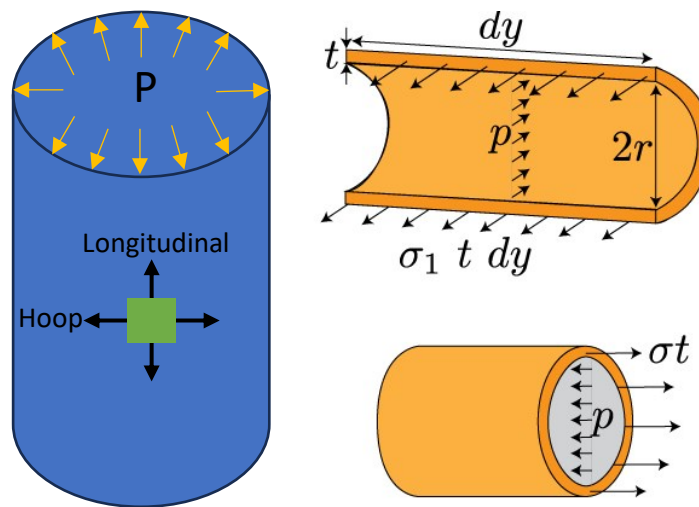
مزیت اصلی روش جرم افزوده، سادگی و کارایی بالای آن در تحلیل‌های لرزه‌ای است. این روش امکان در نظر گرفتن اثر سیال بر پاسخ سازه را بدون نیاز به مدل‌سازی صریح سیال فراهم می‌کند و به‌طور قابل توجهی زمان تحلیل و هزینه محاسباتی را کاهش می‌دهد. به همین دلیل، این روش به‌طور گسترده در تحلیل مخازن ذخیره مایعات، به‌ویژه در مطالعات پارامتریک و طراحی لرزه‌ای، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با این حال، روش جرم افزوده دارای محدودیت‌هایی نیز هست. این روش عمدتاً برای مدل‌سازی مؤلفه ضربه‌ای مناسب است و قادر به شبیه‌سازی دقیق رفتار غیرخطی تلاطم، شکست موج، اثرات ویسکوزیته و اندرکنش پیچیده سطح آزاد مایع نیست. همچنین، در شرایطی که دامنه تلاطم بزرگ باشد یا پاسخ همرفتی نقش غالبی ایفا کند، دقت این روش کاهش می‌یابد. از این‌رو، در تحلیل‌های پیشرفته و شرایط بارگذاری شدید، استفاده از روش‌های عددی کامل مانند SPH یا CFD می‌تواند ضروری باشد.

در مجموع، روش جرم افزوده یک ابزار مؤثر، ساده و کاربردی برای بررسی اولیه و مهندسی رفتار لرزه‌ای مخازن حاوی مایع است و در بسیاری از آیین‌نامه‌ها و مطالعات مهندسی به‌عنوان یک روش معتبر و قابل قبول مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳. تنش حلقوی و طولی در مخازن

مخازن استوانه‌ای ذخیره مایعات تحت اثر فشار داخلی ناشی از سیال دچار تنش‌های مختلفی در پوسته خود می‌شوند. دو تنش اصلی که در طراحی این مخازن اهمیت دارند عبارتند از تنش حلقوی یا محیطی و تنش طولی یا محوری (شکل ۱). این تنش‌ها به دلیل فشار هیدرواستاتیکی سیال بر دیواره مخزن ایجاد می‌شوند.



شکل ۱ تنش حلقوی و طولی در مخازن

تنش حلقوی در امتداد محیط مخزن عمل می‌کند و عمود بر محور استوانه است. این تنش معمولاً بزرگ‌ترین تنش در مخازن استوانه‌ای محسوب می‌شود زیرا فشار داخلی تمایل دارد دیواره مخزن را در راستای محیطی باز کند. برای یک مخزن استوانه‌ای جدار نازک که در آن ضخامت دیواره بسیار کوچک‌تر از شعاع مخزن است، تنش حلقوی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_h = \frac{P.r}{t} \quad (۷)$$

که در آن

P فشار داخلی سیال

r شعاع داخلی مخزن

t ضخامت دیواره مخزن است.

این رابطه با بررسی تعادل نیروها در یک المان کوچک از پوسته مخزن به دست می‌آید. فشار داخلی بر سطح داخلی مخزن نیرویی رو به خارج ایجاد می‌کند و این نیرو توسط تنش کششی در دیواره مخزن متعادل می‌شود.

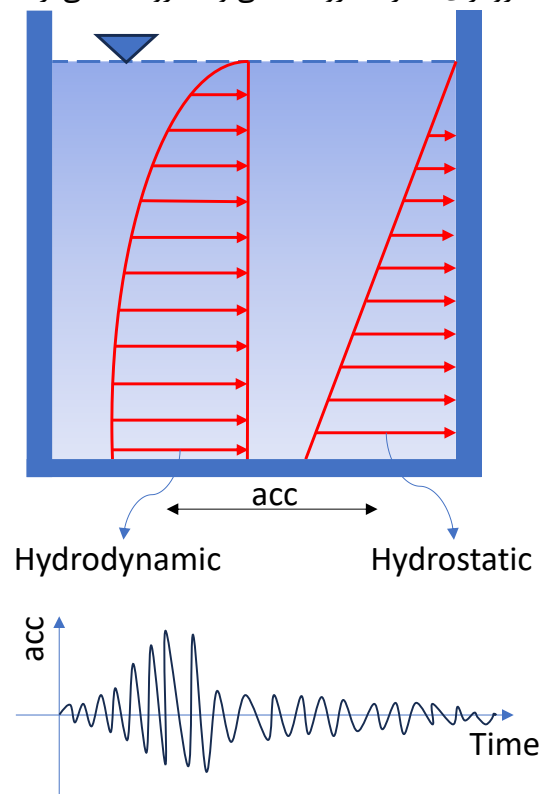
تنش طولی یا محوری در راستای محور مخزن عمل می‌کند و معمولاً مقدار آن کمتر از تنش حلقوی است. این تنش ناشی از فشاری است که سیال به کف یا درپوش مخزن وارد می‌کند و در نتیجه در دیواره مخزن تنش کششی ایجاد می‌شود. مقدار این تنش برای یک مخزن استوانه‌ای جدار نازک از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_l = \frac{P.r}{2t} \quad (۸)$$

همان‌طور که دیده می‌شود مقدار تنش طولی نصف تنش حلقوی است. به همین دلیل در بسیاری از موارد کنترل طراحی مخازن بیشتر بر اساس تنش حلقوی انجام می‌شود.

در حالت عادی که مخزن تحت شرایط استاتیکی قرار دارد، فشار سیال فقط ناشی از وزن مایع است و به آن فشار هیدرواستاتیکی گفته می‌شود. این فشار با افزایش عمق به صورت خطی افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار آن در کف مخزن رخ می‌دهد.

اما زمانی که مخزن در معرض زلزله قرار می‌گیرد، حرکت زمین باعث ایجاد شتاب در مخزن و سیال داخل آن می‌شود. در نتیجه علاوه بر فشار هیدرواستاتیکی، فشارهای دینامیکی نیز در سیال ایجاد می‌شوند که به آن فشار هیدرو دینامیکی گفته می‌شود. در شکل زیر کانتور توزیع نیرو برای فشار هیدرواستاتیکی و هیدرو دینامیکی ارائه شده است.



شکل ۲ توزیع فشار هیدرواستاتیکی و هیدرو دینامیکی

در اثر زلزله، سیال داخل مخزن دو نوع حرکت اصلی دارد:

حرکت ضربه‌ای (Impulsive) که در آن بخش پایینی سیال تقریباً همراه با مخزن حرکت می‌کند.

حرکت همرفتی (Convective) که مربوط به نوسان سطح آزاد مایع یا پدیده تلاطم است.

در نتیجه فشار وارد بر دیواره مخزن ترکیبی از فشار هیدرواستاتیکی و فشار هیدرو دینامیکی خواهد بود.

استاندارد API 650 برای محاسبه نیروها و تنش‌های ناشی از فشار هیدرو دینامیکی معیارهایی ارائه می‌دهد که بر اساس طیف طرح استاندارد ASCE 7 محاسبه می‌شوند. در این روش دو مؤلفه اصلی نیروی حلقوی در نظر گرفته می‌شود:

N_i نیروی حلقوی ناشی از مؤلفه ضربه‌ای

N_c نیروی حلقوی ناشی از مؤلفه همرفتی

این نیروها تابع پارامترهای مختلفی هستند از جمله:

D قطر مخزن

H ارتفاع مایع

Y فاصله از سطح مایع تا نقطه مورد بررسی

G وزن مخصوص نسبی سیال

Ai شتاب طیفی مؤلفه ضربه‌ای

Ac شتاب طیفی مؤلفه همرفتی

فرمول‌های ارائه شده در API 650 برای محاسبه این نیروها به نسبت هندسی مخزن یعنی D/H بستگی دارند. به همین دلیل روابط مختلفی برای شرایط مختلف نسبت قطر به ارتفاع ارائه شده است.

پس از محاسبه Ni و Nc از روابط زیر:

$$N_i = \begin{cases} 8.48 A_i G D H \left[\frac{Y}{H} - 0.5 \left(\frac{Y}{H} \right)^2 \right] \tanh \left(0.866 \frac{D}{H} \right) & D/H \geq 1.33 \\ 5.22 A_i G D^2 \left[\frac{Y}{0.75 D} - 0.5 \left(\frac{Y}{0.75 D} \right)^2 \right] & D/H < 1.33 \text{ \& } Y/D < 0.75 \\ 2.6 A_i G D^2 & D/H < 1.33 \text{ \& } Y/D \geq 0.75 \end{cases} \quad (9)$$

$$N_c = \frac{1.85 A_c G D^2 \cosh \left[\frac{3.68(H-Y)}{D} \right]}{\cosh \left[\frac{3.68 H}{D} \right]} \quad \text{For all } D/H \quad (10)$$

تنش حلقوی ناشی از بارهای دینامیکی از رابطه ۱۱ به دست می‌آید:

$$\sigma_T = \sigma_h \pm \sigma_s = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2 + (A_v N_h)^2}}{t} \quad (11)$$

که در آن

 σ_T تنش کل σ_h تنش ناشی از فشار هیدرواستاتیکی σ_s تنش ناشی از اثرات لرزه‌ای است.

در اثر بارهای لرزه‌ای ممکن است در ناحیه پایین پوسته مخزن تنش فشاری قابل توجهی ایجاد شود که می‌تواند منجر به کمناش دیواره شود. استاندارد API 650 برای کنترل این تنش دو حالت را در نظر می‌گیرد.

حالت اول زمانی است که نیروی بلندشدگی کف مخزن محاسبه نشده باشد و نسبت مهارشدگی J کمتر یا مساوی ۰.۷۸۵ باشد. در این حالت تنش فشاری طولی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_c = (w_t(1 + 0.4 A_v) + \frac{1.273 M_{rw}}{D^2}) \frac{1}{1000t} \quad (12)$$

حالت دوم زمانی است که بلندشدگی مخزن در نظر گرفته شود و نسبت مهارشدگی J بزرگ‌تر از ۰.۷۸۵ باشد. در این حالت رابطه تنش به صورت زیر است:

$$\sigma_c = \left(\frac{w_t(1 + 0.4 A_v) - w_a}{0.607 - 0.18667(J)^{2.3}} - w_a \right) \frac{1}{1000t} \quad (13)$$

که در آن

wt وزن سقف و دیواره مخزن در پایه

wa نیروی مقاوم در برابر بلندشدگی در ناحیه حلقوی کف

J نسبت مهاربندی مخزن است.

برای ارزیابی ایمنی مخزن، تنش‌های محاسبه شده باید با تنش‌های مجاز مقایسه شوند. استاندارد API 650 مقدار تنش مجاز برای تنش طولی و تنش حلقوی را مشخص می‌کند. تنش مجاز طولی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$F_{allow}^{Long} = \begin{cases} \frac{83t}{D} & \frac{GHD^2}{t^2} \geq 44 \\ \frac{83t}{2D} + 7.5\sqrt{GH} < 0.5F_y & \frac{GHD^2}{t^2} < 44 \end{cases} \quad (14)$$

تنش مجاز حلقوی نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{allow}^{Hoop} = \min(1.33S_d, 0.9F_y) \quad (15)$$

که در آن

t ضخامت مخزن

D قطر مخزن

H ارتفاع سیال

G وزن مخصوص نسبی سیال

Sd تنش مجاز پایه

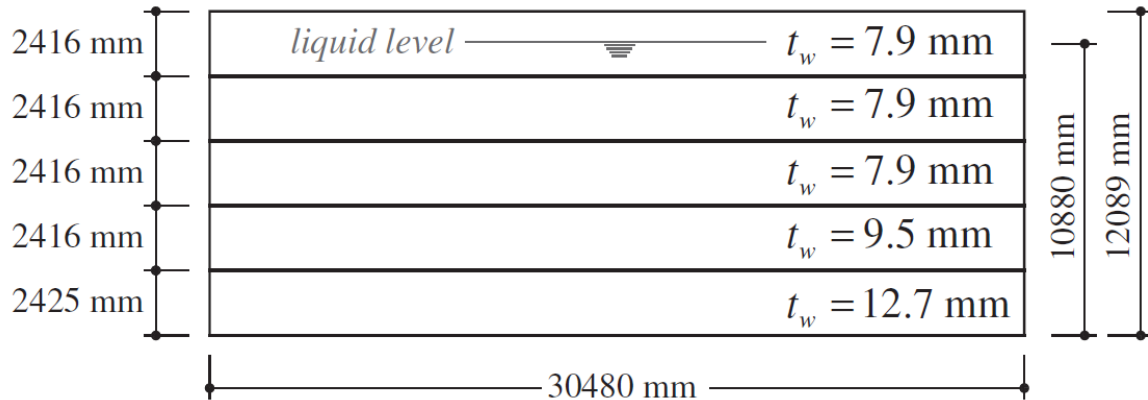
Fy تنش تسلیم فولاد است.

۴. مدل سازی و صحت سنجی

بر اساس مطالعات انجام شده، مشاهده شده است که در حالتی که سیال به صورت سه بعدی مدل سازی می‌شود، زمان تحلیل بسیار طولانی و پرهزینه است. علاوه بر این، در این نوع مدل سازی به دلیل پیچیدگی مدل و وجود رفتار غیر خطی در سازه، نتایج تحلیل دچار واگرایی شده و در بسیاری از موارد تحلیل به طور کامل همگرا نمی‌شود.

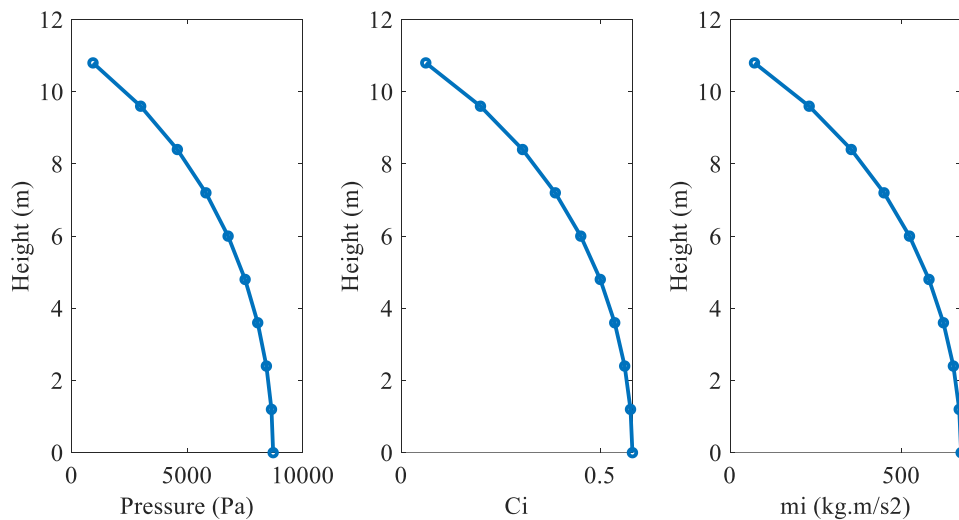
از این رو، با بررسی مقالات مختلف مشخص شد که در بسیاری از پژوهش‌ها برای کاهش هزینه محاسباتی در مسائل اندرکنش سیال و سازه از روشی موسوم به روش جرم افزوده (Added Mass Method) استفاده می‌شود. در این روش، برای در نظر گرفتن اثرات هیدرودینامیکی سیال، جرم معادل سیال به صورت متمرکز در گره‌های سازه اعمال می‌شود.

در این راستا، به منظور ارزیابی دقت مدل سازی، یک سازه نمونه از مرجع [۳۶] انتخاب شد و فرکانس مود اول و شکل مود اول آن مورد بررسی قرار گرفت. توزیع جرم در ارتفاع سازه از روابط بخش قبل به دست می‌آید. شکل ۳ نیز مشخصات هندسی مخزن مورد بررسی را نشان می‌دهد.

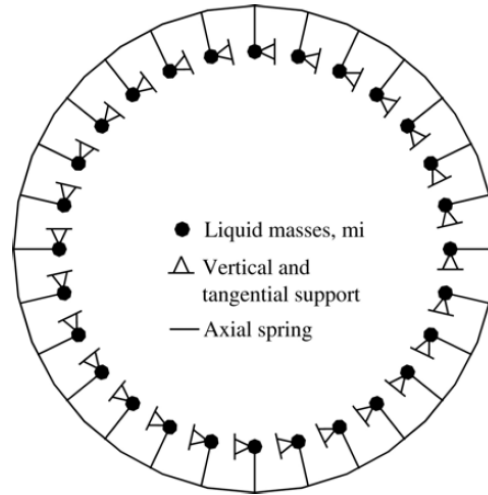


شکل ۳ هندسه مخزن مورد بررسی

شکل ۴ توزیع فشار، جرم و پارامتر C_i را در ارتفاع مخزن مورد بررسی بر اساس محاسبات نشان می‌دهد.

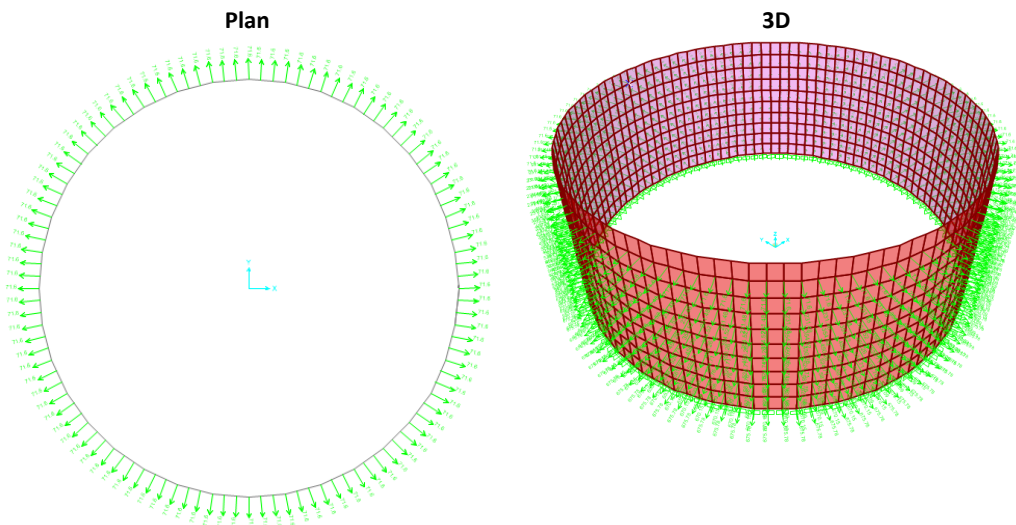
شکل ۴ توزیع فشار، جرم و پارامتر C_i

جرم افزوده سیال به صورت جرم‌های متمرکز (lumped mass) در گره‌های پوسته نصب شد. این جرم‌ها از طریق المان‌های فنری بدون جرم که به عنوان میله‌هایی صلب در نظر گرفته شده‌اند، به گره‌های پوسته متصل شدند (مطابق شکل ۵). فنرهای مورد استفاده دارای یک جهت‌گیری محلی یک‌بعدی هستند، به گونه‌ای که تکیه‌گاه هر فنر فقط اجازه‌ی حرکت جرم گره‌ای را در راستای عمود بر سطح پوسته (جهت نرمال) می‌دهد. حرکت تکیه‌گاه‌های فنر در راستای مماسی سراسری (یعنی عمود بر محور المان) و نیز در راستای قائم محدود شده است، اما در راستای شعاعی (که با محور محلی فنر هم‌راستا است) آزاد می‌باشد. بنابراین، جرم‌های مایع تنها مجاز به حرکت در راستای شعاعی هستند، و به این ترتیب، اثر اصلی سیال—که همان نیروی هیدرودینامیکی شعاعی بر پوسته است—به صورت مؤثر مدل‌سازی می‌شود.



شکل ۵ مدل با جرم نرمال در اطراف محیط

در شکل ۶، مدل ساخته شده بر اساس روش جرم افزوده در نرم افزار SAP2000 نشان داده شده است.



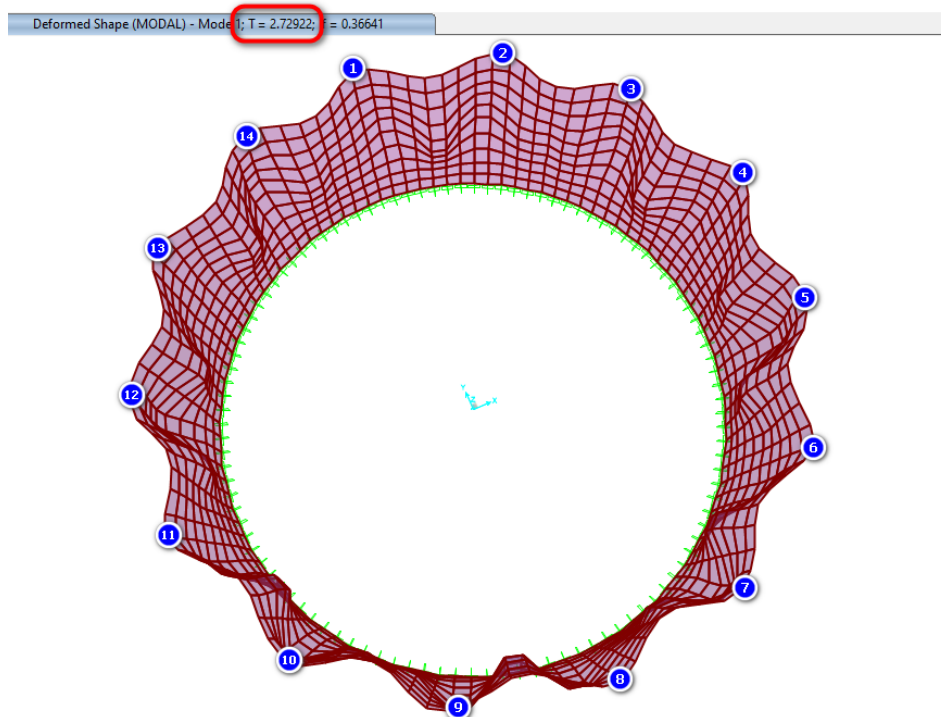
شکل ۶ مدل با جرم عمودی در اطراف محیط در SAP2000

بر اساس مرجع [۳۶]، جدول ۱ دوره‌های طبیعی به دست آمده را گزارش می‌کند. در این جدول تنها دوره‌های طبیعی با شماره فرد ارائه شده‌اند، زیرا به دلیل تقارن سازه، برخی از موده‌های طبیعی به صورت تکراری به دست می‌آیند. در این جدول، پارامتر n بیانگر تعداد موج‌های محیطی (Circumferential waves) در امتداد پیرامون مخزن است.

جدول ۱ دوره تناوب، T ، از ۳۰ مد طبیعی اول: n و m تعداد امواج محیطی و محوری را نشان می‌دهند.

Mode	Pre-stress considered			Pre-stress neglected		
	T [s]	m	n	T [s]	m	n
1	0.96	1	8	2.74	1	14
3	0.96	1	9	2.70	1	15
5	0.93	1	10	2.69	1	13
7	0.92	1	7	2.60	1	16
9	0.89	1	11	2.54	1	12
11	0.84	1	12	2.46	1	17
13	0.83	1	6	2.32	1	18
15	0.79	1	13	2.31	1	11
17	0.75	1	14	2.19	1	19
19	0.71	1	15	2.07	1	20
21	0.69	1	5	2.02	1	10
23	0.67	1	16	1.96	1	21
25	0.64	1	17	1.85	1	22
27	0.61	1	18	1.75	1	23
29	0.58	1	19	1.72	1	9

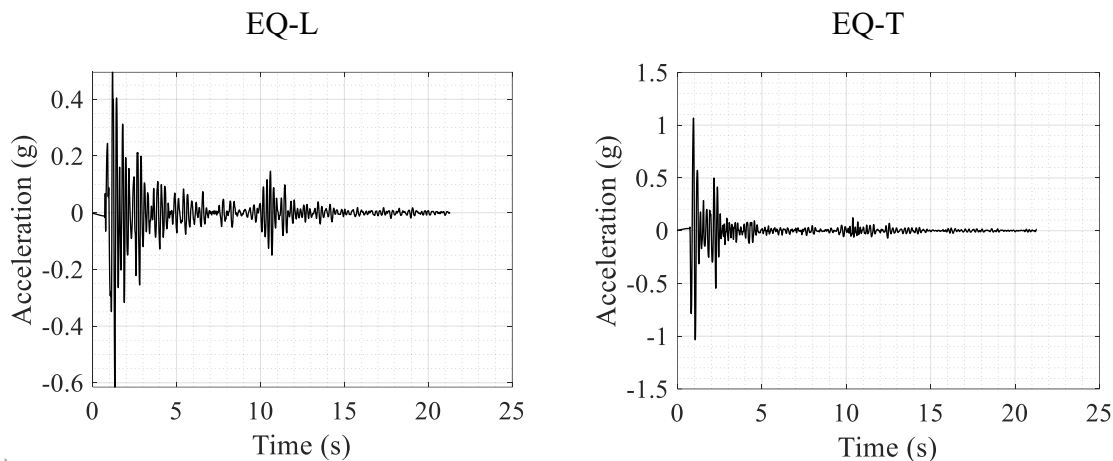
بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده در نرم‌افزار SAP2000، دوره تناوب طبیعی مود اول سازه برابر با ۲.۷۳ ثانیه به دست آمده است. این مقدار با نتایج گزارش‌شده در مرجع [۳۶] تفاوت بسیار اندکی (کمتر از ۰.۵ درصد) دارد. همچنین با توجه به شکل ۷، ملاحظه می‌شود که پارامتر n (تعداد امواج محیطی) در خروجی نرم‌افزار SAP2000 نیز برابر با ۱۴ می‌باشد. بنابراین، با استناد به این نتایج، می‌توان از صحت فرآیند مدل‌سازی و دقت نتایج حاصل اطمینان حاصل کرد.



شکل ۷ دوره تناوب طبیعی مود اول سازه

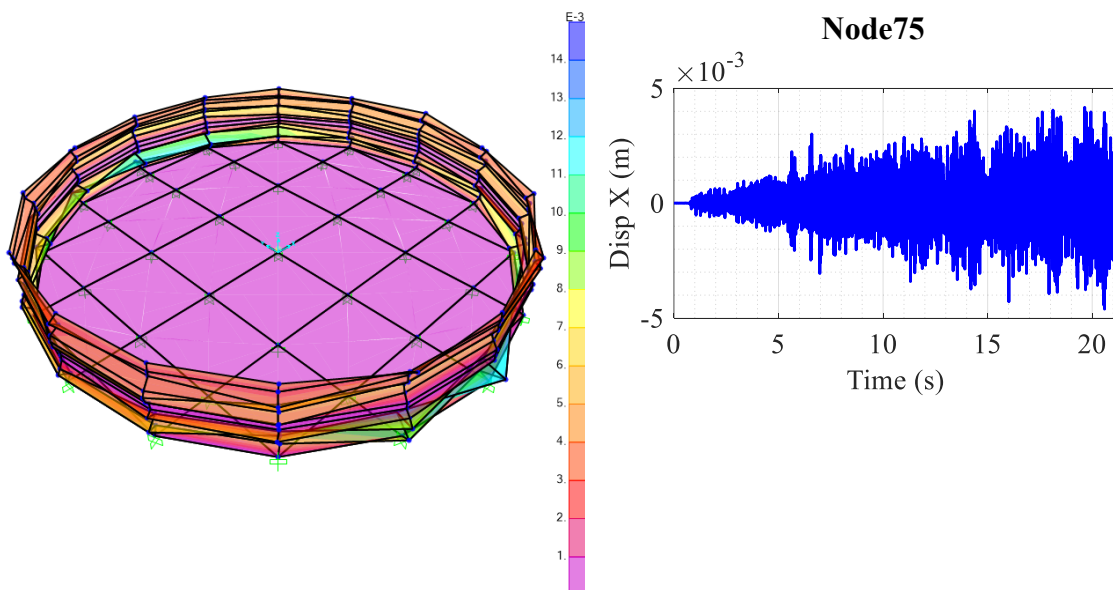
۵. به دست آوردن تنش

پس از اطمینان از صحت روش مدل سازی سازه، در گام بعدی تحلیل سازه تحت زلزله است. در شکل ۸، رکورد مربوط زلزله انتخابی ارائه شده است. سازه مورد بررسی تحت اثر همزمان دو مؤلفه افقی از رکورد زلزله نشان داده شده در شکل ۸، تحلیل خواهد شد. ضخامت مخزن مورد مطالعه بر اساس الزامات استاندارد API 650 برابر با ۰.۰۰۳۸ متر در نظر گرفته شده است.



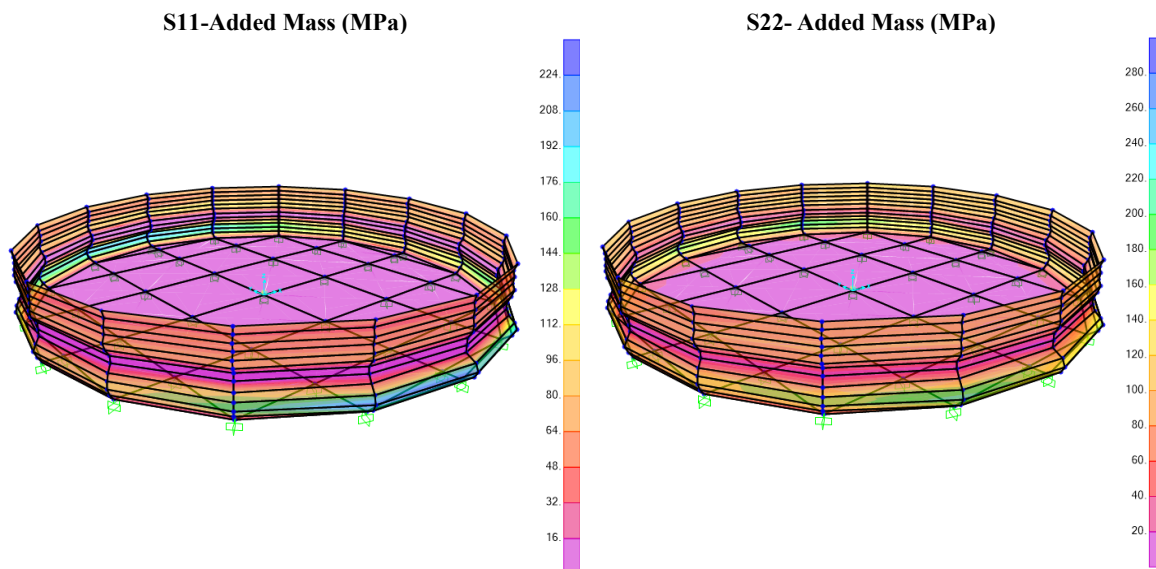
شکل ۸ رکورد زلزله انتخابی

به دلیل پیچیدگی مدل در حالتی که سیال به صورت سه بعدی مدل سازی می شود، این سازه با ضخامت مذکور پس از چندین ساعت تحلیل در نرم افزار به طور کامل تحلیل نشد و نتایج به علت واگرایی همگرا نگردید. در مقابل، در حالتی که از روش جرم افزوده استفاده شد، تحلیل سازه مورد نظر در زمانی کمتر از دو ساعت انجام گرفت. شکل ۷ کانتور بیشینه جابه جایی سازه را تحت اثر رکورد زلزله نشان می دهد. همچنین در این شکل، تاریخچه زمانی پاسخ گره شماره ۷۵ نیز ارائه شده است.



شکل ۹ کانتور حداکثر جابه جایی

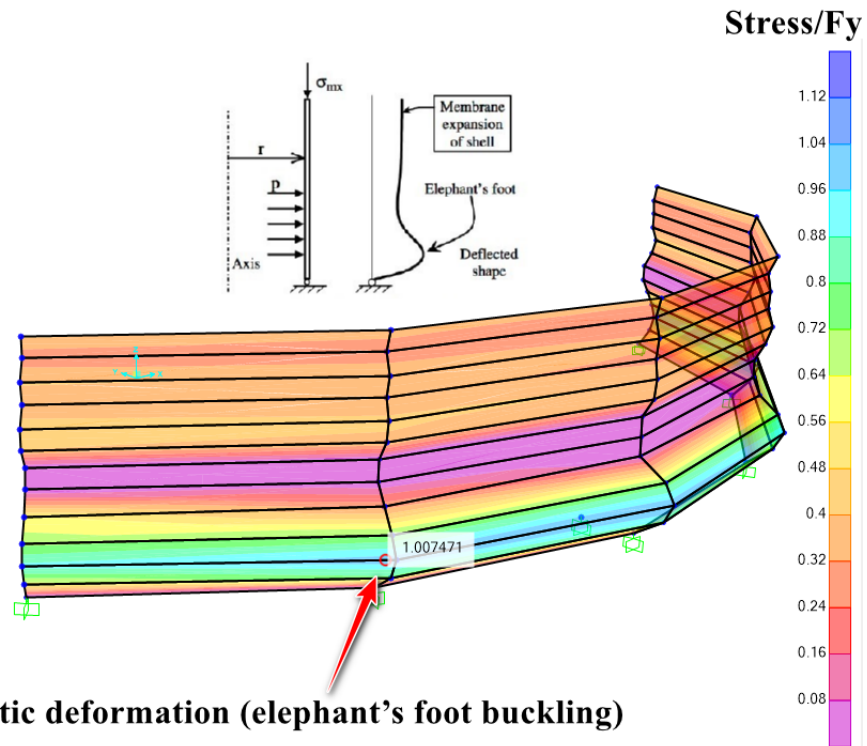
همچنین در شکل‌های زیر، پارامترهای تنش S_{11} و S_{22} برای مخزن نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنش‌های ایجادشده در سازه از تنش تسلیم فولاد برابر با ۲۰۵ مگاپاسکال (فولاد A283C) عبور کرده‌اند و در نتیجه سازه وارد محدوده رفتار غیرخطی شده است.



شکل ۱۰: کانتور تنش برای مخزن

رفتار کمانشی مخازن فولادی تحت تحریک لرزه‌ای از طریق مطالعات آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است و به طور کلی دو نوع اصلی کمانش برای آن‌ها تعریف شده است: کمانش الاستیک-پلاستیک و کمانش الاستیک. رفتار الاستیک-پلاستیک با پدیده‌ای موسوم به «کمانش پافیلی» (Elephant's Foot Buckling) همراه است که با ایجاد برآمدگی رو به بیرون در ناحیه‌ای کمی بالاتر از کف مخزن مشخص می‌شود. این نوع کمانش معمولاً در اثر ترکیب تنش‌های فشاری محوری و تنش‌های حلقوی ناشی از فشار هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی رخ می‌دهد و بیانگر ورود موضعی پوسته به محدوده تغییرشکل‌های پلاستیک است.

در مقابل، کمانش الاستیک با پدیده‌ای به نام «کمانش لوزی‌شکل» (Diamond-Shape Buckling) شناخته می‌شود که با موج‌دار شدن و چروکیدگی پوسته در ناحیه پایینی مخزن همراه است. در این حالت، ناپایداری عمدتاً در محدوده الاستیک اتفاق می‌افتد و تغییرشکل‌ها پیش از رسیدن تنش به حد تسلیم رخ می‌دهند. مطابق شکل ۹، مشاهده می‌شود که رفتار مخزن منجر به وقوع کمانش از نوع پای فیل در ناحیه تغییرشکل پلاستیک شده است که نشان‌دهنده تسلیم موضعی و تمرکز تنش در بخش تحتانی پوسته مخزن می‌باشد.



Plastic deformation (elephant's foot buckling)

شکل ۱۱ کمایش الاستوپلاستیک

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای مخازن فولادی استوانه‌ای ذخیره مایع با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور کاهش هزینه محاسباتی و جلوگیری از ناپایداری‌های عددی ناشی از مدل‌سازی صریح سه‌بعدی سیال، از روش کلاسیک جرم افزوده برای لحاظ کردن اثرات هیدرودینامیکی سیال استفاده شد. در این روش، اثر دینامیکی بخش ضربه‌ای سیال به صورت جرم‌های معادل متمرکز در گره‌های پوسته مخزن مدل‌سازی گردید و تنها حرکت شعاعی این جرم‌ها مجاز در نظر گرفته شد، به گونه‌ای که فشارهای هیدرودینامیکی اصلی به صورت مؤثر به سازه منتقل شوند.

نتایج صحت‌سنجی مدل عددی نشان داد که دوره تناوب مود اول طبیعی مخزن استخراج‌شده از تحلیل انجام‌شده در نرم‌افزار SAP2000 تطابق بسیار خوبی با نتایج گزارش‌شده در مرجع معتبر دارد و اختلاف آن کمتر از ۰/۵ درصد است. همچنین تعداد امواج محیطی مود اول به درستی در خروجی تحلیل عددی بازتولید شد که این موضوع بیانگر دقت مناسب مدل‌سازی جرم افزوده و نحوه توزیع آن در ارتفاع مخزن می‌باشد.

تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه تحت رکورد زلزله انتخاب شده نشان داد که مدل‌سازی صریح سه‌بعدی سیال، علاوه بر زمان‌بر بودن، منجر به واگرایی نتایج و عدم همگرایی تحلیل می‌شود، در حالی که استفاده از روش جرم افزوده امکان انجام تحلیل کامل سازه را در زمانی به مراتب کمتر فراهم نمود. این موضوع نشان‌دهنده کارایی بالای روش جرم افزوده در تحلیل‌های مهندسی و کاربردی مخازن ذخیره مایع است.

بررسی نتایج تنش‌ها بیانگر آن است که تنش‌های حاصل در پوسته مخزن، به ویژه در ناحیه پایینی دیواره، از تنش تسلیم فولاد A283C برابر با ۲۰۵ مگاپاسکال عبور کرده و سازه وارد محدوده رفتار غیرخطی مصالح شده است. تمرکز تنش‌های فشاری محوری و تنش‌های حلقوی در این ناحیه، منجر به بروز تغییرشکل‌های پلاستیک موضعی و در نهایت وقوع کمانش از نوع الاستیک-پلاستیک یا کمانش پافیلی گردیده است. این الگوی خرابی با مشاهدات آزمایشگاهی و گزارش‌های زلزله‌های گذشته تطابق خوبی دارد و صحت نتایج عددی را تأیید می‌کند.

به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش جرم افزوده، علی‌رغم ساده‌سازی‌های انجام‌شده، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی اندرکنش سیال و سازه در تحلیل غیرخطی هندسی مخازن فولادی تحت بارگذاری لرزه‌ای است. این روش ضمن حفظ دقت قابل قبول، موجب کاهش چشمگیر زمان تحلیل و افزایش پایداری عددی می‌شود. با این حال، در شرایطی که تلاطم شدید، شکست موج یا اثرات غیرخطی سطح آزاد نقش غالبی در پاسخ سیستم داشته باشند، استفاده از روش‌های پیشرفته‌تری نظیر SPH یا CFD می‌تواند برای مطالعات تکمیلی ضروری باشد.

۷. مراجع

- [1] Calvi G M, Nascimbene R. Seismic Design and Analysis of Tanks. John Wiley & Sons; 2023.
- [2] Jia J. Modern earthquake engineering: Offshore and land-based structures. Springer; 2016.
- [3] Tsiapanitis A, Tsompanakis Y. Impact of damping modeling on the seismic response of base-isolated liquid storage tanks. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2019; 121 281-292
- [4] Housner G W. The dynamic behavior of water tanks. Bulletin of the seismological society of America 1963; 53(2) 381-387
- [5] Veletsos A S, Tang Y, Tang H. Dynamic response of flexibly supported liquid-storage tanks. Journal of Structural Engineering 1992; 118(1) 264-283
- [6] Malhotra P K. Seismic response of soil-supported unanchored liquid-storage tanks. Journal of Structural Engineering 1997; 123(4) 440-450

- [7] Bakalis K, Vamvatsikos D, Fragiadakis M. Seismic risk assessment of liquid storage tanks via a nonlinear surrogate model. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2017; 46(15) 2851-2868
- [8] Rawat A, Mittal V, Chakraborty T, Matsagar V. Earthquake induced sloshing and hydrodynamic pressures in rigid liquid storage tanks analyzed by coupled acoustic-structural and Euler-Lagrange methods. *Thin-Walled Structures* 2019; 134 333-346
- [9] Eshghi S, Razzaghi M S. Performance of cylindrical liquid storage tanks in Silakhor, Iran earthquake of March 31, 2006. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 2007; 40(4) 173-182
- [10] Yazdani M, Ingham J M, Kahanek C, Dizhur D. Damage to flat-based wine storage tanks in the 2013 and 2016 New Zealand earthquakes. *Journal of Constructional Steel Research* 2020; 168 105983
- [11] Zama S, et al. *On damage of oil storage tanks due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0), Japan*. in *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering (WCEE)*. 2012.
- [12] Fischer E C, Liu J, Varma A H. Investigation of cylindrical steel tank damage at wineries during earthquakes: Lessons learned and mitigation opportunities. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 2016; 21(3) 04016004
- [13] Fischer E. Learning from earthquakes: 2014 Napa Valley earthquake reconnaissance report. 2014;
- [14] Korkmaz K A, Sari A, Carhoglu A I. Seismic risk assessment of storage tanks in Turkish industrial facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2011; 24(4) 314-320
- [15] Wu G, Ma Q, Taylor R E. Numerical simulation of sloshing waves in a 3D tank based on a finite element method. *Applied ocean research* 1998; 20(6) 337-355
- [16] Xue M-A, et al. Fluid dynamics analysis of sloshing pressure distribution in storage vessels of different shapes. *Ocean Engineering* 2019; 192 106582
- [17] Felix-Gonzalez I, Sanchez-Mondragon J, Cruces-Giron A. Sloshing study on prismatic LNG tank for the vertical location of the rotational center. *Computational Particle Mechanics* 2022; 1-20
- [18] Haroun M A, Tayel M A. Response of tanks to vertical seismic excitations. *Earthquake engineering & structural dynamics* 1985; 13(5) 583-595
- [19] Park J-H, Koh H, Kim J. *Fluid-structure interaction analysis by a coupled boundary element-finite element method in time domain*, in *Boundary element technology VII*. 1992, Springer. p. 227-243.
- [20] Chen W, Haroun M A, Liu F. Large amplitude liquid sloshing in seismically excited tanks. *Earthquake engineering & structural dynamics* 1996; 25(7) 653-669
- [21] Hoskins L M, Jacobsen L S. Water pressure in a tank caused by a simulated earthquake. *Bulletin of the seismological society of America* 1934; 24(1) 1-32
- [22] Yang J Y *Dynamic behavior of fluid tank systems*. 1976.
- [23] Kianoush M, Chen J. Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering structures* 2006; 28(5) 704-715
- [24] Veletsos A. *Seismic effects in flexible liquid storage tanks*. in *Proceedings of the 5th world conference on earthquake engineering*. 1974. Bulletin of the Seismological Society of America McLean, VA, USA.
- [25] Wu G, Eatock Taylor R, Greaves D. The effect of viscosity on the transient free-surface waves in a two-dimensional tank. *Journal of Engineering Mathematics* 2001; 40(1) 77-90
- [26] Estekanchi H, Alembagheri M. Seismic analysis of steel liquid storage tanks by endurance time method. *Thin-Walled Structures* 2012; 50(1) 14-23

- [27] Constantin L, et al. Analysis of damping from vertical sloshing in a SDOF system. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2021; 152 107452
- [28] Jamshidi S, Firouz-Abadi R, Amirzadegan S. New mathematical model to analysis fluid sloshing in 3D tanks with slotted middle baffle. *Ocean Engineering* 2022; 262 112061
- [29] Huang S, et al. Nonlinear analysis of sloshing and floating body coupled motion in the time-domain. *Ocean engineering* 2018; 164 350-366
- [30] Monaghan J J. Simulating free surface flows with SPH. *Journal of computational physics* 1994; 110(2) 399-406
- [31] Shao J, Li H, Liu G, Liu M. An improved SPH method for modeling liquid sloshing dynamics. *Computers & Structures* 2012; 100 18-26
- [32] Bagheri S, Farajian M. The effects of input earthquake characteristics on the nonlinear dynamic behavior of FPS isolated liquid storage tanks. *Journal of Vibration and Control* 2018; 24(7) 1264-1282
- [33] Api-650. Welded tanks for oil storage. American Petroleum Institute 2021; 1220
- [34] Asce-7. *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. 2016. American Society of Civil Engineers.
- [35] Veletsos A, Shivakumar P. Tanks containing liquids or solids. *A handbook in computer analysis and design of earthquake resistant structures* 1997; 725-774
- [36] Buratti N, Tavano M. Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2014; 43(1) 1-21