

بررسی مقایسه حالت‌های مختلف مدلسازی سیال در تحلیل لرزه‌ای مخازن روزمینی با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه

سیما قابضی^۱، ایرج رسولان^۲، بیژن سیاف زاده^۳

^۱ کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران (نویسنده مسئول)

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۳ دانشجوی دکتری دانشگاه قم، قم، ایران

simaghabezi@gmail.com

چکیده

رفتار دینامیکی مخازن استوانه‌ای روزمینی ذخیره سازی مایعات از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است چرا که این مخازن کاربرد فراوانی در مجتمع‌های صنعتی دارند و آیین‌نامه‌های طراحی آن‌ها بیشتر براساس رفتار استاتیکی مخازن تدوین شده‌اند. در حالی که رفتار مخازن در هنگام زلزله کاملاً متفاوت می‌باشد. بنابراین به درک و پیش‌بینی بهتری از رفتار لرزه‌ای آنها نیاز است. بنابراین در این تحقیق به مدلسازی مخازن فولادی استوانه‌ای روزمینی با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-سیال تحت بار زلزله پرداخته شده است. در تحقیق حاضر سیال به دو روش اویلری و جرم و فنر مدلسازی شده است. این مدلسازی به کمک نرم افزار اجزا محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات پارامتریک اثر تغییر ضخامت، ارتفاع مخزن و تغییر ارتفاع سیال بر روی حداکثر تنش مخازن و جابجایی به دو روش اویلری و جرم و فنر بررسی شده است. در روش جرم و فنر تنش و جابجایی در حالت‌های مختلف مقادیر نزدیکی داشتند. به‌طور خلاصه نتایج نشان می‌دهند که روش جرم و فنر یک روش تقریبی و همراه با خطا است ولی روش اویلری به دلیل مدلسازی سیال به صورت واقعی و نمایش حرکات سطح سیال مطابقت بیشتری با واقعیت دارد و نسبت به روش جرم و فنر روش کامل‌تر و دقیق‌تری است.

واژه‌های کلیدی: مخازن استوانه‌ای روزمینی، مدلسازی سیال، نیروی زلزله، روش اویلری، روش جرم و فنر

۱. مقدمه

مخازن ذخیره سیال از اجزاء بسیار مهم و حیاتی در صنایع به حساب می‌آیند. از مخازن فولادی استوانه‌ای روزمینی به‌صورت گسترده برای ذخیره‌سازی و نگهداری سیالات در صنایع پتروشیمی و همچنین نگهداری انواع سیالات در صنایع مختلف استفاده می‌شود و حتی این مخازن از تجهیزات اصلی تأمین آب شرب شهرها می‌باشند. بنابراین باید به این نکته توجه نمود که آسیب‌هایی که به مخازن ذخیره سیال وارد می‌شوند می‌توانند زیان‌هایی به مراتب وسیع‌تر از هزینه‌های مالی دربرداشته باشند. کشور ایران در منطقه‌ای از جهان با خطر نسبی زلزله قابل‌توجه قرار گرفته است. بر این اساس توجه به عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها و تأسیسات مختلف از اهمیت بسزایی برخوردار است. وجود منابع متعدد نفت و گاز در کشور موجب گسترش مجتمع‌ها و تأسیسات مرتبط با صنایع نفت، گاز و پتروشیمی شده است، که تراکم بسیاری از تأسیسات در مناطق لرزه‌خیز سبب افزایش اهمیت بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها و تجهیزات موجود در این مجتمع‌ها شده است، بنابراین اطمینان از پایداری نسبی آن‌ها در برابر بارگذاری‌های لرزه‌ای امری بدیهی است. مخازن ذخیره مایعات روزمینی به‌عنوان سازه‌های مهندسی، برای ذخیره آب، نفت و سایر مایعات مورد استفاده قرار می‌گیرند. مخازن ذخیره مایعات از جمله سازه‌های مهم و حیاتی در جوامع امروزی می‌باشند [۱]. آسیب‌دیدگی مخازن ذخیره مایعات، پس از وقوع زلزله علاوه بر زیان اقتصادی ممکن است موجب قطع آب، آتش‌سوزی‌های کنترل نشده، اتلاف و نشت مواد شیمیایی آلوده‌کننده و سمی شود. آن‌ها همچنین نقش مهمی در امور امدادرسانی پس از وقوع زلزله ایفا می‌کنند. رفتار لرزه‌ای این مخازن بسیار پیچیده است. این پیچیدگی عمدتاً به علت اندرکنش سیال و مخزن است [۲].

واکنش دینامیکی مخازن ذخیره سیال تحت تأثیر زمین‌لرزه با رفتار سازه‌هایی نظیر پل‌ها و ساختمان‌ها و غیره تحت زلزله بسیار متفاوت است. دلیل عمده این تفاوت تأثیر فشار هیدرودینامیکی بر دیواره مخزن است. برای در نظر گرفتن چنین تأثیری مطالعات تحلیلی و عددی بسیاری در این زمینه ارائه شده است. در ادامه به بخشی از این مطالعات اشاره می‌نماییم.

مخازن نگهداری مایعات تحت تحریک زلزله توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اولین مطالعات منسجم در مورد رفتار دینامیکی مخازن توسط هاسکینز^۱ و همکاران در سال (۱۹۳۴) انجام گرفت، این مطالعه با فرض‌های ساده کننده‌ای از جمله صلب بودن جداره مخزن و پی که خود این فرض‌ها به در نظر نگرفتن صحیح اندرکنش‌های موجود بین سیال، مخزن و خاک منجر می‌شوند، انجام شد. ایشان فشار هیدرودینامیکی اعمالی به بدنه مخزن را به دو مؤلفه فشار ضربه‌ای ناشی از جرم شتاب‌دار سیال مخزن و فشار نوسانی ناشی از پدیده امواج متلاطم سطحی، تقسیم کردند [۳]. بعدها ژاکوبسن^۲ در سال (۱۹۴۹) فشار هیدرودینامیک وارد بر مخزن استوانه‌ای را تحت حرکت افقی زمین دست با یکسری فرض‌های ساده کننده از جمله صلب بودن مخزن و پی، غیرقابل تراکم و غیر ویسکوز بودن سیال و با صرف نظر از تأثیر امواج سطحی، به‌دقت آورد [۴]. هوسنر^۳ در سال (۱۹۵۷) در مدل ساده خود جرم سیال را به دو بخش تقسیم نمود یکی در نزدیکی کف مخزن که به‌صورت صلب به مخزن متصل است و دیگری در سطح سیال که می‌تواند نوسان کند [۵]. در زلزله ۱۹۶۴ آلاسکا خرابی‌های بسیاری به بار آمد و مخازن طرح شده تا به اینجا دچار آسیب‌های فراوان شدند و مشخص گردید که فرض‌های ساده کننده تأثیر بالایی در رفتار مخازن دارند و باید آن‌ها را تحلیل و در طراحی مخازن دخیل نمود لذا از این تاریخ به بعد عمده تحقیقات صورت گرفته در زمینه مخازن با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیواره و اثرات اندرکنشی موجود صورت گرفته است. ولتسوس^۴ در سال (۱۹۷۴) برای در نظر گرفتن اثر هم‌زمان فشار هیدرودینامیکی وارد به مخزن و پاسخ دینامیکی مخزن شرایط مرزی جدید و

^۱ Hoskins^۲ Jacobsen^۳ Housner^۴ Veletsos

بهبودیافته‌ای را ارائه نمود. وی سرعت عمودی ذرات مایع را در کف مخزن برابر صفر در نظر گرفت و در سطح پوسته مخزن سرعت حرکت سیال را برابر سرعت حرکت پوسته فرض نمود و فشار مایع را در سطح آزاد سیال برابر صفر در نظر گرفت، بنابراین فشار هیدرودینامیکی در هر عمقی با وزن مایع تا آن نقطه برابر است [۶]. گودوی^۵ و همکاران در سال (۲۰۰۳) به بررسی تأثیر نشست‌های محلی و موضعی پی بر رفتار مخازن ذخیره سیال استوانه‌ای جدار نازک پرداختند. آن‌ها از روش المان محدود استفاده کردند و برای تحلیل و مدل‌سازی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده نمودند. آن‌ها تحلیل را در حالت رفتار خطی و رفتار غیرخطی هندسی انجام دادند و در هر دو حالت به بررسی کمانش و تنش‌های ایجاد شده در دیواره مخازن پرداختند. نتایج نشان داد که تحلیل‌ها در حالت غیرخطی به جواب‌های منطقی‌تری می‌رسند و در حالت رفتار خطی نتایج ضعیفی حاصل شده است. نتایج آن‌ها مشخص نمود تغییر شکل‌های ایجاد شده در پوسته‌های جدار نازک ناشی از نشست‌های محلی پی با تغییر شکل‌های ناشی از نیروی باد یا زلزله بسیار متفاوت است و بیشتر از رفتار غیرخطی پوسته‌ها ناشی می‌شود [۷]. ادواردو^۶ و همکاران در سال (۲۰۰۴) طی مقاله‌ای به تحلیل دینامیکی غیرخطی مخازن جدار نازک تحت تحریکات نوسانی پرداختند. در این تحقیق از مدل یک مخزن استوانه‌ای با سقف مخروطی ساده استفاده شد که یک‌بار نوسانی ناشی از باد به آن اعمال گردید پاسخ‌ها با استفاده از روش المان محدود و انتگرال‌گیری صریح برای مقادیر مختلف فشار و بار نوسانی محاسبه گردید سپس پاسخ‌ها را در حوزه زمان و فرکانس تحلیل نمودند و نتایج نشان داد که نوسانات فشار ورودی منجر به این نمی‌شوند که پاسخ‌ها هم نوسانی باشند [۸]. کونستانتین راسیلیوس^۷ و همکاران در سال (۲۰۰۶) به بررسی اثر تمرکز تنش در نقاطی از پوسته مخزن که بر هر دلیلی دچار تغییر شکل شده بود پرداختند. از روش‌های تحلیلی به همراه روش المان محدود استفاده نمودند و روش‌هایی را برای کاهش این تنش‌ها در حالتی که دیواره مخزن صلب و یا منعطف باشد ارائه نمودند. آن‌ها تشخیص دادند که به علت به وجود آمدن پدیده تمرکز تنش بیشتر مشکلات در محدوده محل‌های جوشکاری شده و اتصالات پیش می‌آید [۹]. هوگو^۸ و همکاران در سال (۲۰۰۷) به بررسی ارتفاع امواج سرریز در مخازن استوانه‌ای ذخیره سیال در حالات غیرخطی تحت اثر زمین‌لرزه پرداختند آن‌ها برای اعمال شتاب از رکورد زلزله مکزیکو در سال ۱۹۸۵ استفاده کردند و از معادلات حرکت برای تحلیل مخازن ذخیره سیال تحت اثرات هیدرولیک غیرخطی بهره جستند. آن‌ها معادلات حرکت را از فضای فیزیکی به محیط‌های قابل حل انتقال دادند. آن‌ها اثرات تشدید را در مورد روی هم قرار گرفتن جواب قسمت‌های نوسانی و ضربه‌ای در نظر گرفتند. همچنین ایشان پاسخ‌های عددی به دست آمده را با نتایج خطی مقایسه نمودند و در انتها به این نتیجه رسیدند که میرایی‌های ویسکوز در مدل‌های عددی به نتایج بهتری نسبت به میرایی‌های صریح رسیدند [۱۰]. گرانج^۹ و همکاران در سال (۲۰۰۸) برای ساده در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه و در نظر گرفتن اثر بلند شدگی بر رفتار پی‌های سطحی در مخازن ذخیره سیال روشی را با استفاده از المان‌های بزرگ ارائه نمودند. آن‌ها برای حرکت و جابجایی پی پارامترهایی از جمله نیروی وارد و هندسه پی را در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند که با کاربرد المان‌های سه بعدی می‌توانند نتایج رضایت بخشی را برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی پی‌های صلب سطحی حتی در برابر بارهای سیکلیک بگیرند [۱۱]. یانگ^{۱۰} و همکاران در سال (۲۰۱۳) در مقاله خود به ارائه یک رابطه تحلیلی جهت بررسی ناپایداری الاستو پلاستیک مخازن استوانه‌ای بزرگ پرداختند. آن‌ها از قانون جریان پلاستیک استفاده نموده و روابط ارائه شده در کدهای مختلف جهت

^۵ Godoy^۶ Eduardo^۷ Konstantin Rasiulisa^۸ Hugo^۹ Grange^{۱۰} Yang

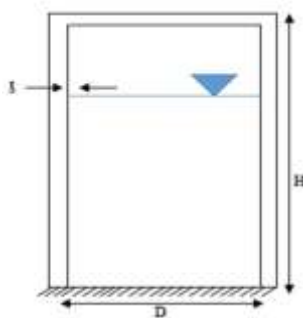
تخمین کماتش لرزه‌ای مخازن را بررسی نموده‌اند [۱۲]. ژنگ^{۱۱} در سال (۲۰۱۴) در مقاله‌ای که ارائه نمود اثر زلزله را بر مخازن سیال بزرگ در صنعت گاز بررسی نمود. ایشان در مقاله خود مخازن دوجداره را بررسی نمودند. مخازنی که به نحوی طراحی می‌شوند که کوچک‌ترین آسیب در آن‌ها می‌تواند کارکرد کل مخزن را مختل نماید. ایشان اثر انتقال نیرو بین جداره‌های داخلی و خارجی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۳]. فرجیان و همکاران در سال (۲۰۱۶) اثرات اندرکنش خاک و سازه را روی پاسخ مخزن ذخیره مایع تحت زلزله مطالعه کردند. برای مدل‌سازی اندرکنش سیال-سازه و خاک-سازه از مدل جرم و فنر استفاده کردند و دریافتند که اگرچه اندرکنش خاک و سازه منجر به کاهش جابجایی ضربه‌ای، لنگر واژگونی و نیروی برشی پایه می‌شود ولی جابجایی گردشی یا همرفتی با چنین اثراتی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد [۱۴]. شی^{۱۲} و همکاران در سال (۲۰۱۷) در مقاله‌ای تنش را در یک مخزن فولادی با مقیاس بزرگ و با سقف شناور به روش عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تنش در جداره و کف مخزن را با اندازه‌گیری مقاومت کششی اندازه‌گیری کردند. در ضمن، یک مدل المان محدود سه بعدی برای آنالیز تنش در مخزن مورد استفاده قرار دادند. با مقایسه نتایج محاسبات با داده‌های آزمایشگاهی، صحت مدل المان محدود را مورد تأیید قرار دادند. نتایج هر دو روش آزمایشگاهی و عددی پیشنهاد می‌کند که تنش روی محل اتصال پوسته‌های مخزن بیشتر است [۱۵]. بورکاکي^{۱۳} و همکاران در سال (۲۰۱۴) به بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن فولادی به کمک آزمایش میز لرزان پرداختند. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی نمونه مخزن به مقیاس معادل ۳۳،۳۳ : ۱ تبدیل، قطر و ارتفاع معادل مخزن برابر ۱/۵ متر و ۰/۷ متر، وزن معادل مخزن ۸۶ کیلوگرم، ضخامت صفحه‌ی پایینی ۳ میلی‌متر و ضخامت پوسته و سقف ۱/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد [۱۶]. مخزن مورد آزمایش برای چهار حالت خالی، پر شده از آب تا ارتفاع ۱۶۲ میلی‌متر (۱/۳ حد مجاز)، پر شده از آب تا ارتفاع ۳۲۴ میلی‌متر (۲/۳ حد مجاز) و پر شده از آب تا ارتفاع ۴۸۶ (حد مجاز) تحت آزمون لرزه‌ای چهار نوع رکورد زلزله سیووالکی، السنترو، پولکویس مینیگتر مور مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه پژوهش مرجع [۱۶] سیگنال‌های ثبت‌شده در معرض پردازش و تحلیل داده‌ها با استفاده از برنامه کامپیوتری صورت پذیرفت، سپس نتایج حاصل از پاسخ سازه در قالب نمودار شتاب-زمان تحت زمین‌لرزه‌های مذکور به‌دست‌آمده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده پاسخ سازه در قالب شتاب زمان در مخزنی که کاملاً پر است، افزایش یافته است [۱۶].

^{۱۱} Zhang^{۱۲} Shi^{۱۳} Burkacki

با توجه پژوهش‌های انجام‌شده در گذشته، در اکثر موارد سیال فقط به روش جرم و فنر مدل‌سازی شده و در تعداد کمی از آن‌ها سیال به روش اویلری مدل‌سازی شده است. در پژوهش حاضر تأثیر اندرکنش سازه-سیال بر پاسخ مخزن استوانه‌ای فولادی روزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مطالعات انجام شده بر روی مخازن فولادی روزمینی تحت زلزله، ازجمله نوآوری این پژوهش، مدل‌سازی سیال به هر دو روش جرم-فنر و اویلری است. در نهایت نتایج دو روش باهم مقایسه شده‌اند. هدف این پژوهش، مقایسه مدل‌سازی سیال به دو روش اویلری و جرم و فنر در مخازن استوانه‌ای روزمینی تحت اثر زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-سیال در این مخازن و همچنین بررسی تأثیر افزایش قطر، ضخامت، ارتفاع مخزن و ارتفاع سیال (مطالعات پارامتریک) در مخازن به هر دو روش اویلری و جرم و فنر است.

۲. مدل‌سازی مخزن با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه

در این قسمت مخزن به دو روش اویلری و جرم و فنر مورد مدل‌سازی قرار گرفته است. نمای شماتیک این مخازن در شکل (۱) نشان داده شده است. در این مدل‌ها تغییر شکل‌های مخزن و همچنین تنش با توجه به تئوری فون مایسز در بدنه مخزن مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- نمای شماتیک مخازن با حالت‌های تکیه‌گاهی مختلف

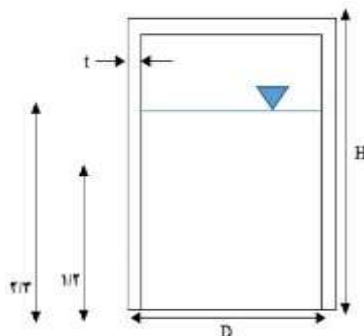
ابعاد مدل با توجه به ابعاد استاندارد مخازن مورد استفاده در شرکت ملی نفت انتخاب گردید. ابعاد مخزن مورد استفاده و ارتفاع سیال در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱- مشخصات ابعاد مخزن

پارامتر	مقادیر
شعاع مخزن	۵
ارتفاع مخزن	۷
ارتفاع سیال	۳/۵
ضخامت جداره و سقف مخزن	۰/۰۰۸
ضخامت کف مخزن	۰/۰۱
ارتفاع سقف مخزن	۰/۸۴

۲-۱ مطالعات پارامتریک

در این مدل‌ها، تغییرات ضخامت، ارتفاع مخزن، ارتفاع سیال و قطر مخازن در هر دو روش اویلری و جرم و فنر تحت زلزله مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقادیر جابه‌جایی-زمان، در ارتفاع‌های $\frac{1}{2}$ ، $\frac{2}{3}$ محاسبه و همچنین تنش با توجه به تئوری فون مایسز در بدنه مخزن مورد بررسی قرار گرفت. نمای شماتیک به همراه نقاط مورد بررسی در بدنه مخزن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- نمای شماتیک مخزن به همراه نقاط مورد بررسی در بدنه مخزن

۳- نتایج و بحث

به جهت صحت و دقت در پاسخ مدل‌سازی نمونه‌های ساخته‌شده، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به صورت ۳ بعدی، یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی مرجع [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل‌شده از نرم‌افزار آباکوس با نتایج مرجع مطابقت داده شد. فرضیات مورداستفاده در مدل ساخته‌شده به شرح زیر است:

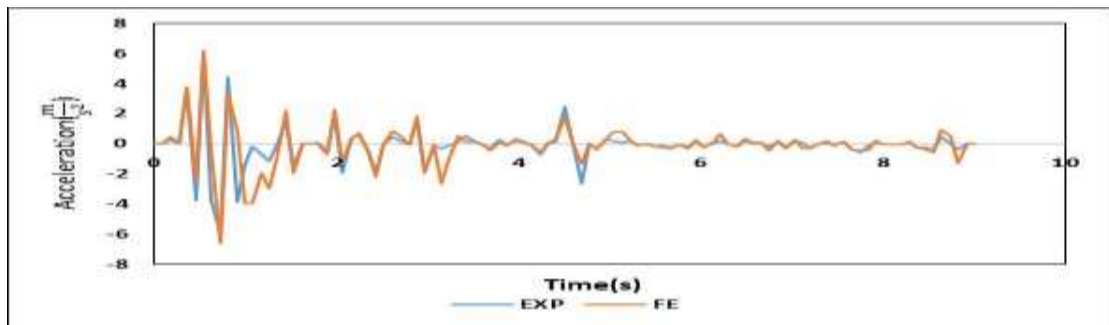
۱- جنس بدنه و کف مخزن از فولاد با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگا پاسکال و تنش تسلیم ۲۴۰ مگا پاسکال استفاده گردید.

۲- در المان بندی جداره مخزن از المان شل ۴ گره‌ای، و برای سیال از المان ای‌ا‌اس به صورت ۸ گره‌ای، استفاده گردید.

۳- چگالی سیال (آب) و فولاد (جداره مخزن) به ترتیب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد.

۴- زلزله السنترو مذکور در مرجع [۱۶] در یک‌جهت به مدل اعمال گردید.

نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی مرجع انطباق داده‌شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، نتایج به یکدیگر نزدیک‌اند و نمودارها در اکثر نقاط، از همخوانی خوبی برخوردار هستند.



شکل ۳- نمودار شتاب سیال-زمان تحت زلزله السنترو به صورت عددی و آزمایشگاهی

همچنین به جهت مقایسه بهتر مقادیر عددی و آزمایشگاهی، با توجه به نمودار شکل (۳) برخی از نقاط در جدول (۲) مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۲- مقایسه نتایج عددی نرم افزار آباکوس و مقادیر آزمایشگاهی مرجع [۱۶]

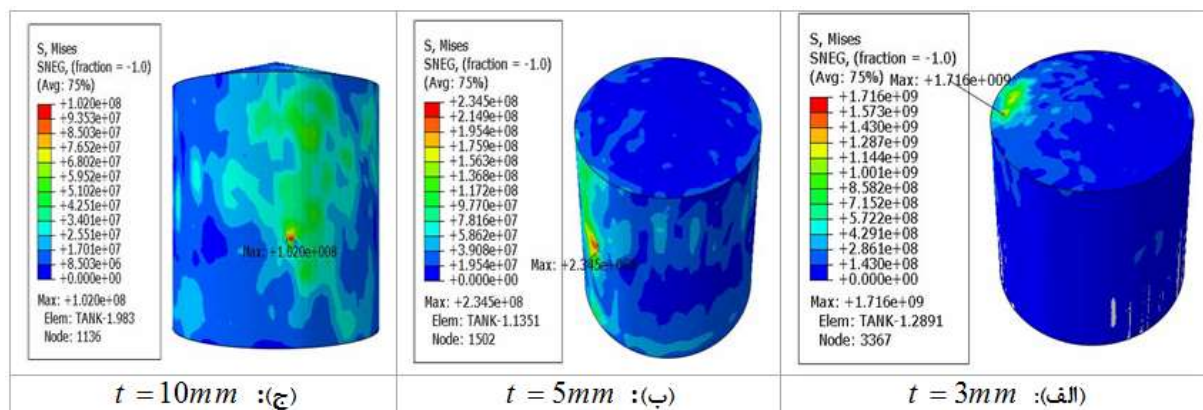
مقدار عددی	مقدار آزمایشگاهی	زمان (ثانیه)	درصد خطا
۵/۹	۶/۲۰۲	۰/۵۴	۵/۱۱%
- ۰/۴۹۱۰۷	- ۰/۵۱۶۹۲	۲/۳۴	۵/۲۷%
۰/۱۳۹۷۲	۰/۱۵۱۱۵	۳/۵۱	۸/۱۸%
۰/۶۶۶۱۷	- ۰/۵۸۶۴	۴/۲۳	۱۱/۹۷%
۰/۰۷۸۷۴	- ۰/۰۸۵۵۶	۵/۳۱	۷%
- ۰/۴۵۳۴۶	- ۰/۵۳۹۳۸	۷/۷۴	۱۵/۹۰%
- ۰/۰۲	- ۰/۰۲۰۰۷	۸/۱۹	۰/۳۴%
۰	۰	۹	۰%

۴- نتیجه گیری

در این بخش مطالعات پارامتریک به دو روش اویلری و جرم و فنر انجام شده است.

۴-۱- روش اویلری

به جهت بررسی اثر ضخامت در مدل‌ها، مخازنی به ضخامت $t = 3, 5, 10mm$ مدل شدند. این مدل‌ها تحت رکورد زلزله السنترو قرار گرفتند. ارتفاع سیال در تمام مدل‌ها برابر نصف ارتفاع مخزن است. حداکثر تنش وارده به جداره مخازن در اثر تغییر ضخامت، تحت رکورد زلزله السنترو در شکل‌های (الف)، (ب)، (ج) قابل مشاهده است.



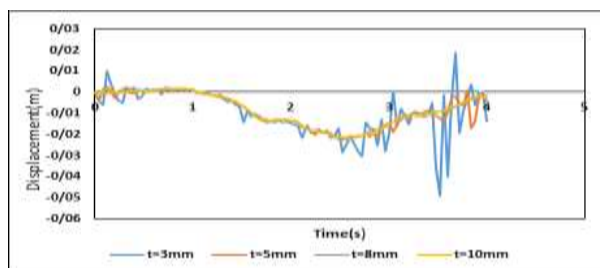
شکل ۴- تغییرات تنش در جداره مخزن به ازای ضخامت‌های مختلف تحت زلزله السنترو

با توجه به نتایج فوق مشاهده شد که با افزایش ضخامت، حداکثر تنش وارد شده به مخزن از لبه‌ی سقف به سمت جداره حرکت می‌کند و کاهش می‌یابد. در مخزن با ضخامت ۳ میلی‌متر حداکثر تنش در سقف مخزن رخ داده است، درحالی‌که در سایر ضخامت‌ها حداکثر تنش در قسمت میانی مخزن ایجاد شده است. با توجه به روابط آیین‌نامه محدوده مجاز تعیین شده برای ضخامت سقف (برای اینکه سقف مخزن دچار تغییر شکل نشود) به صورت زیر است:

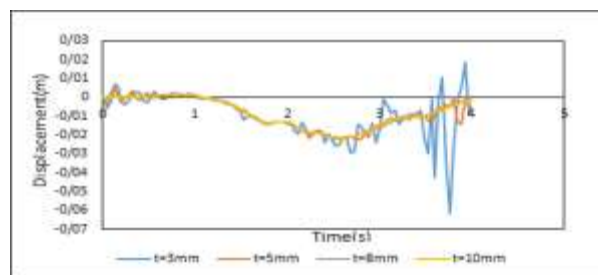
$$\frac{3}{16} < t < 0.5 \text{ in} \quad (1)$$

با توجه به اینکه سقف با ضخامت ۳ میلی‌متر نسبت به حالت استاندارد ضخامت کمتری دارد، نسبت به دیگر حالت‌ها دچار تغییر شکل و تنش بیشتری می‌شود.

به جهت بررسی اثر تغییرات ضخامت روی جابجایی، نمودارهای جابجایی در ارتفاع‌های $\frac{1}{2}$ ، $\frac{2}{3}$ در شکل (۵) قابل مشاهده است.



ب: $H = \frac{2}{3}$

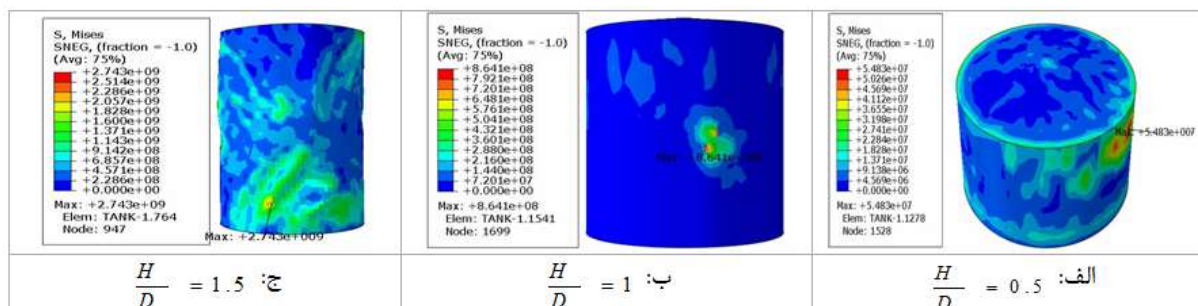


الف: $H = \frac{1}{2}$

شکل ۵- تغییرات جابجایی در ارتفاع الف: $1/2$ مخزن، ب: $2/3$ مخزن در اثر تغییر ضخامت

با توجه به نمودارهای فوق، با افزایش ضخامت مخزن جابجایی کاهش یافته و حداکثر جابجایی در کمترین ضخامت یعنی $t = 3mm$ رخ داده است. دلیل اختلاف جابجایی مخزن با $t = 3mm$ نسبت به دیگر حالت‌ها این است ضخامت مخزن نسبت مقدار مجاز ارائه شده در آیین‌نامه کمتر است.

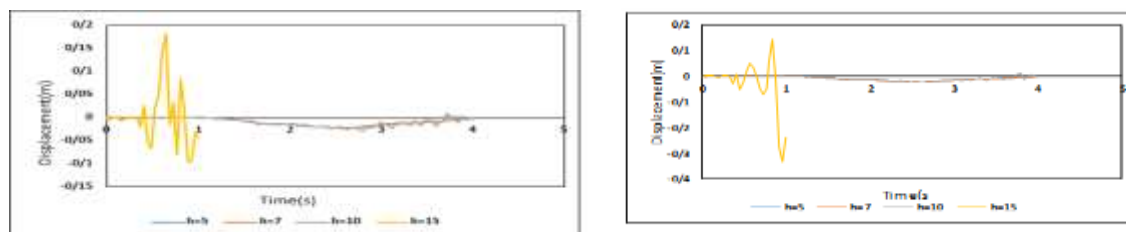
به جهت بررسی اثر ارتفاع در مدل‌ها، مخازنی با نسبت $\frac{H}{D} = 0.5, 1, 1.5$ با قطر ۱۰ متر و ضخامت ۸ میلی‌متر مدل شدند. این مدل‌ها تحت رکورد زلزله السنترو قرار گرفتند. ارتفاع سیال در تمام مدل‌ها برابر نصف ارتفاع مخزن است. حداکثر تنش وارده به جداره مخازن در اثر تغییر ارتفاع، تحت رکورد زلزله السنترو در شکل (۶) قابل مشاهده است.



شکل ۶- تغییرات تنش در جداره مخزن با نسبت‌های مختلف $\frac{H}{D}$ تحت زلزله السنترو

با توجه به نتایج فوق مشاهده شد که با افزایش نسبت $\frac{H}{D}$ ، حداکثر تنش وارده به سازه افزایش می‌یابد و محل آن در قسمت میانی مخزن از بالا به سمت پایین حرکت می‌کند به دلیل اینکه با افزایش نسبت $\frac{H}{D}$ دامنه نوسانات سیال کاهش پیدا می‌کند.

به جهت بررسی اثر تغییرات ارتفاع روی جابجایی، نمودارهای جابجایی در ارتفاع‌های $\frac{1}{2}, \frac{2}{3}$ در شکل (۷) قابل مشاهده است.

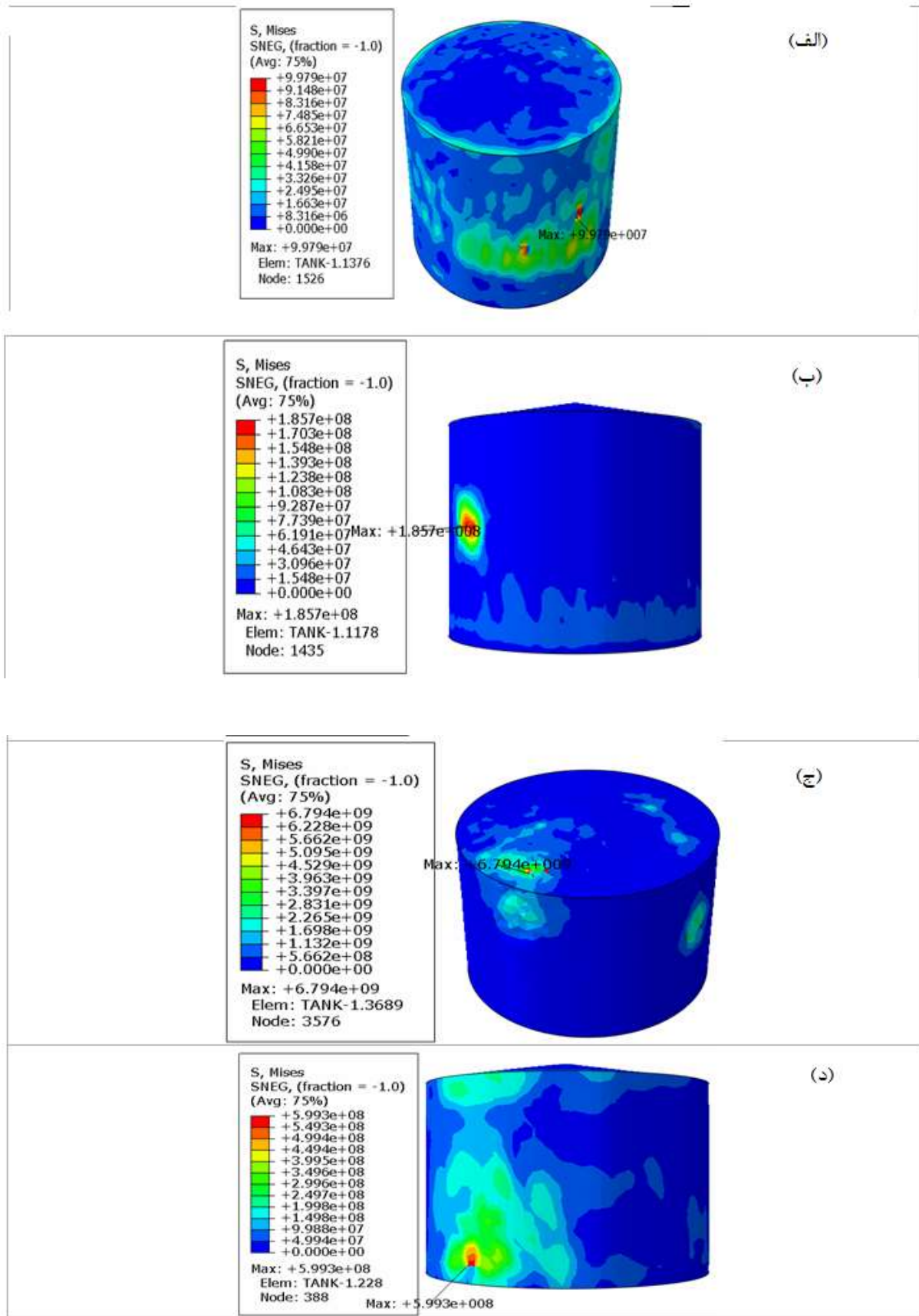


ب: $\frac{2}{3}$ ارتفاع مخزن

الف: $\frac{1}{2}$ ارتفاع مخزن

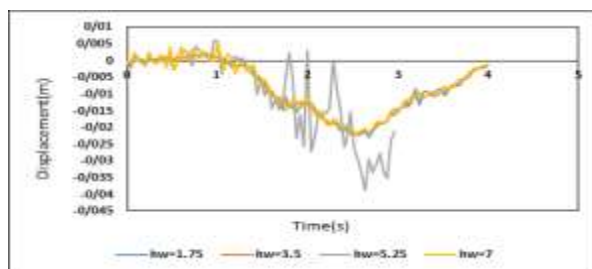
شکل ۷- تغییرات جابجایی در ارتفاع‌های $\frac{1}{2}, \frac{2}{3}$ مخزن

با توجه به نمودارهای فوق، با افزایش ارتفاع مخزن جابجایی افزایش یافته و حداکثر جابجایی در بیشترین ارتفاع یعنی ارتفاع ۱۵ متر رخ داده است. از نمودارهای فوق درمی‌یابیم که هر چه نسبت ارتفاع به قطر مخزن بیشتر باشد، جابجایی بیشتر است و در نسبت‌های بالا منجر به فروپاشی سازه می‌شود. به جهت بررسی اثر ارتفاع سیال در مدل‌ها، ارتفاع سیال در مخازن به ترتیب برای شکل‌های (الف) برابر ۱/۷ متر، شکل (ب) ۳/۵ متر، شکل (ج) ۵/۲۵ متر و شکل (د) ۷ متر و ارتفاع مخزن ۷ متر، قطر ۱۰ متر و ضخامت ۸ میلی‌متر مدل شدند. حداکثر تنش وارده به جداره مخازن در اثر تغییر ارتفاع سیال، تحت رکورد زلزله السنترو در شکل (۸) قابل مشاهده است.

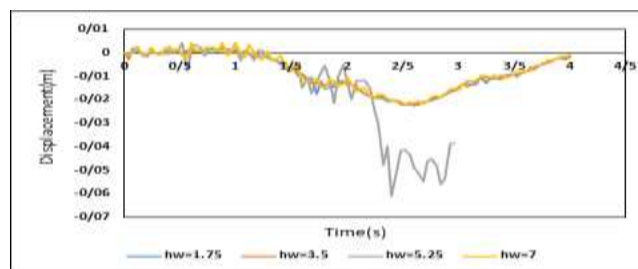


شکل ۸- تغییرات تنش در جداره مخزن به ازای مقادیر مختلف ارتفاع سیال (مخزن پر)

با توجه به نتایج فوق مشاهده شد که مخزن با ارتفاع سیال ۵/۲۵ متر (۴/۳ ارتفاع مخزن) دارای حداکثر تنش وارده بیشتری است. مخزنی که کاملاً از سیال پر شده نسبت به مخازن دارای ارتفاع سیال ۱/۷۵ و ۳/۵ متر (۴/۱ و ۲/۱ ارتفاع مخزن) دارای تنش وارد شده بیشتری است ولی نسبت به مخزن دارای ارتفاع سیال ۵/۲۵ متر (۴/۳ ارتفاع مخزن) دارای تنش وارد شده کمتری است. علت این امر این است که در مخزن پر فضای کافی برای حرکت اسلوشینگ سیال وجود ندارد و ضربات کمتری از طرف سیال به جداره و سقف مخزن وارد می‌شود. به جهت بررسی اثر تغییرات قطر روی جابجایی، نمودارهای جابجایی به ازای ارتفاع‌های مختلف در شکل (۹) قابل مشاهده است.



ب: $\frac{2}{3}$ ارتفاع مخزن



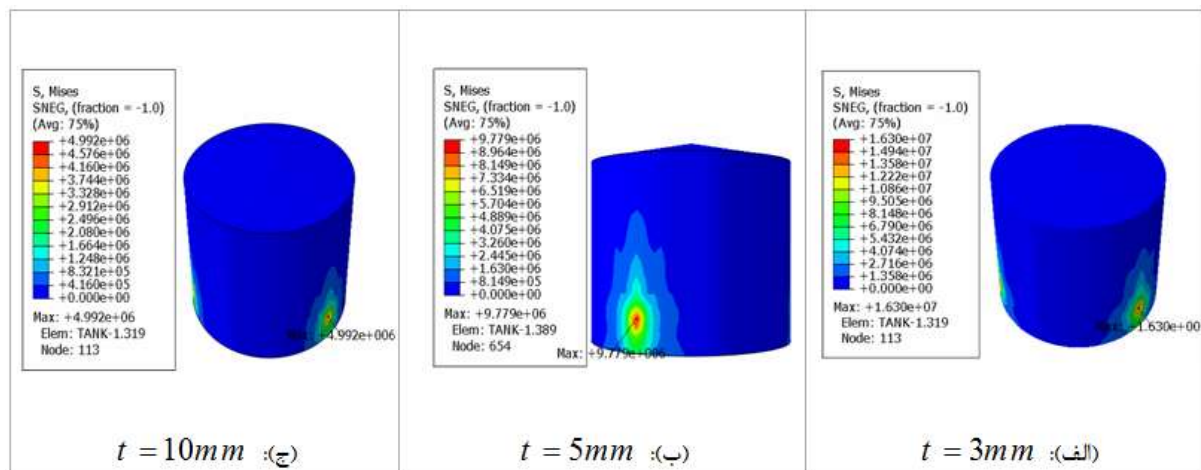
الف: $\frac{1}{2}$ ارتفاع مخزن

شکل ۹- تغییرات جابجایی در ارتفاع $\frac{1}{2}$ ، $\frac{2}{3}$ مخزن

با توجه به نتایج فوق مشاهده شد که مخزن با ارتفاع سیال ۵/۲۵ متر (۳/۴ ارتفاع مخزن) دارای حداکثر جابجایی است و مخزنی که کاملاً از سیال پر شده به دلیل اینکه فضای آزاد برای حرکت سطح سیال در آن وجود ندارد، دارای جابجایی کمتری است.

۴-۲- روش جرم و فنر

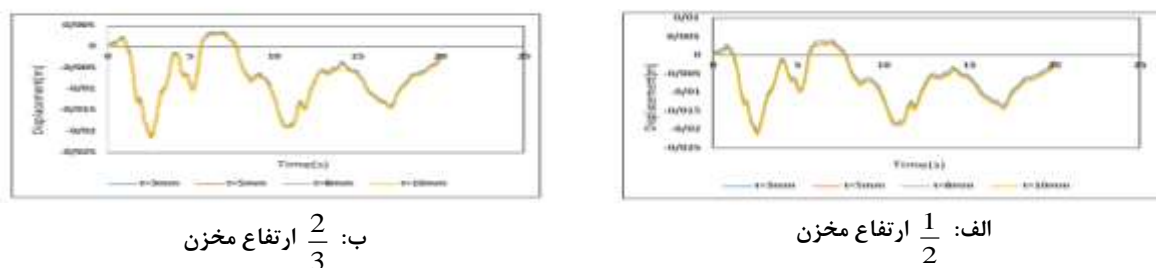
به جهت بررسی اثر ضخامت در مدل‌ها، مخازنی به ضخامت $t = 3, 5, 10 \text{ mm}$ با ارتفاع ۷ متر و قطر ۱۰ متر مدل شدند. این مدل‌ها تحت رکورد زلزله السنترو قرار گرفتند. ارتفاع سیال در تمام مدل‌ها برابر نصف ارتفاع مخزن است. حداکثر تنش وارده به جداره مخازن در اثر تغییر ضخامت، تحت رکورد زلزله السنترو در شکل (۱۰) قابل مشاهده است.



شکل ۱۰- تغییرات تنش در جداره مخزن به ازای ضخامت‌های مختلف تحت زلزله السنترو

با توجه به نتایج فوق، با افزایش ضخامت مخزن حداکثر تنش وارد شده به سازه کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، حداکثر تنش در تمام حالت‌ها در قسمت تحتانی مخزن متمرکز شده است که دلیل این امر همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد، نحوه مدل‌سازی جرم سخت سیال است.

به جهت بررسی اثر تغییرات ضخامت روی جابجایی، نمودارهای جابجایی در ارتفاع‌های $\frac{1}{2}$ ، $\frac{2}{3}$ در شکل (۱۱) قابل مشاهده است.



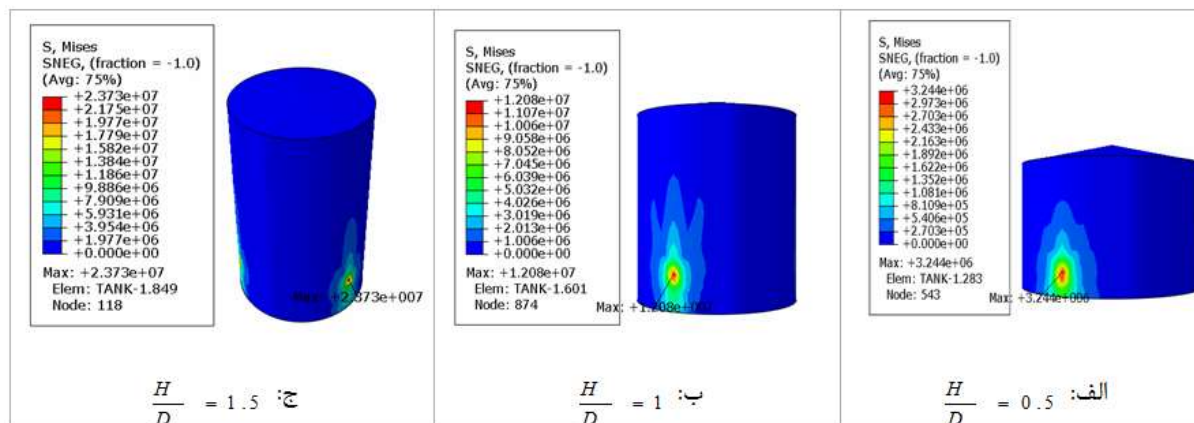
ب: $\frac{2}{3}$ ارتفاع مخزن

الف: $\frac{1}{2}$ ارتفاع مخزن

شکل ۱۱ - تغییرات جابجایی در ارتفاع $\frac{1}{2}$ ، $\frac{2}{3}$ مخزن در اثر تغییر ضخامت

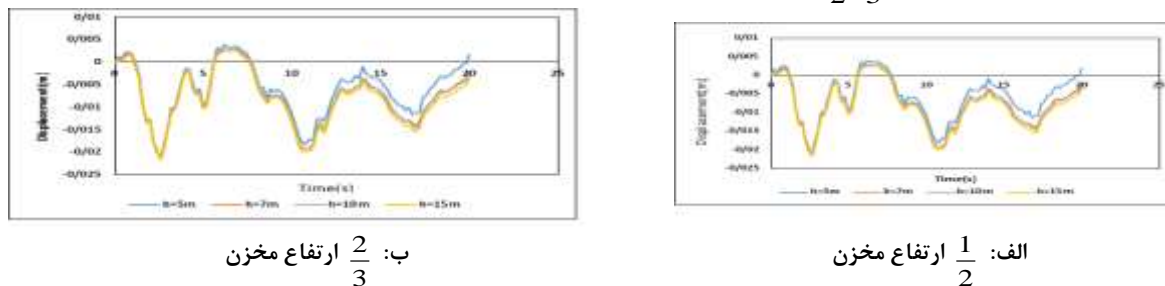
با توجه به نمودارهای فوق، با افزایش ضخامت مخزن جابجایی کاهش یافته و حداکثر جابجایی در کمترین ضخامت یعنی ضخامت ۳ میلی‌متر رخ داده است. همان‌طور که در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود، به دلیل اینکه جرم و فنر یک روش تقریبی و همراه با خطا است و همچنین به علت نحوه مدل‌سازی جرم سخت سیال، مقادیر جابجایی در حالت‌های مختلف به هم نزدیک هستند.

به جهت بررسی اثر ارتفاع در مدل‌ها، مخازنی با نسبت $\frac{H}{D} = 0.5, 1, 1.5$ با قطر ۱۰ متر و ضخامت ۸ میلی‌متر مدل شدند. این مدل‌ها تحت رکورد زلزله السنترو قرار گرفتند. ارتفاع سیال در تمام مدل‌ها برابر نصف ارتفاع مخزن است. حداکثر تنش وارده به جداره مخازن در اثر تغییر ارتفاع، تحت رکورد زلزله السنترو در شکل (۱۲) قابل مشاهده است.



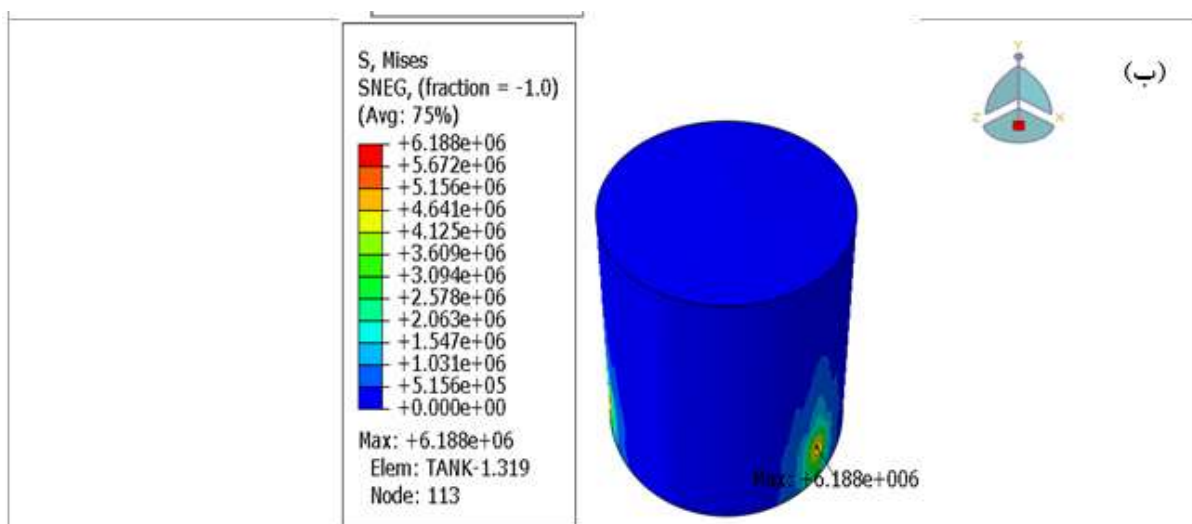
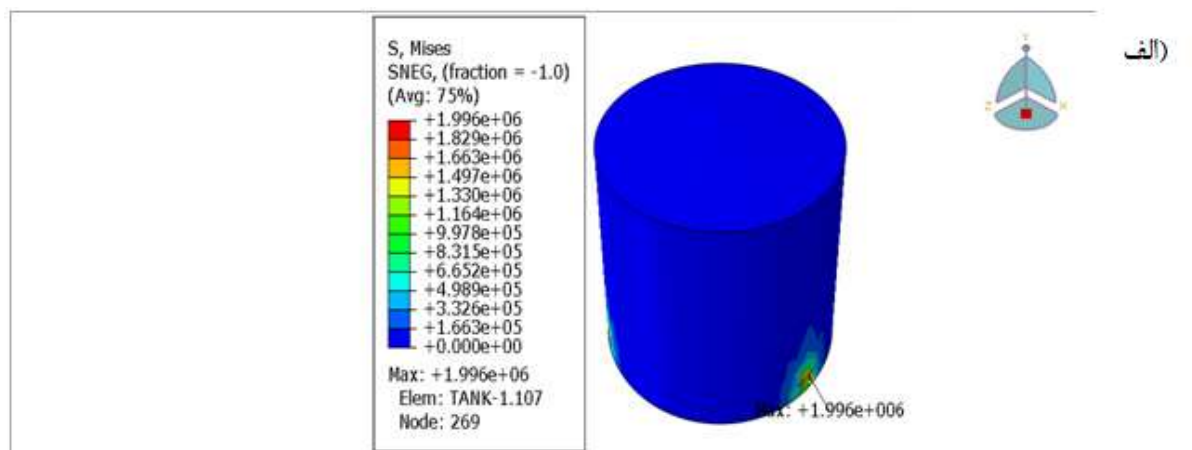
شکل ۱۲- تغییرات تنش در جداره مخزن با نسبت‌های مختلف $\frac{H}{D}$ تحت زلزله السنترو

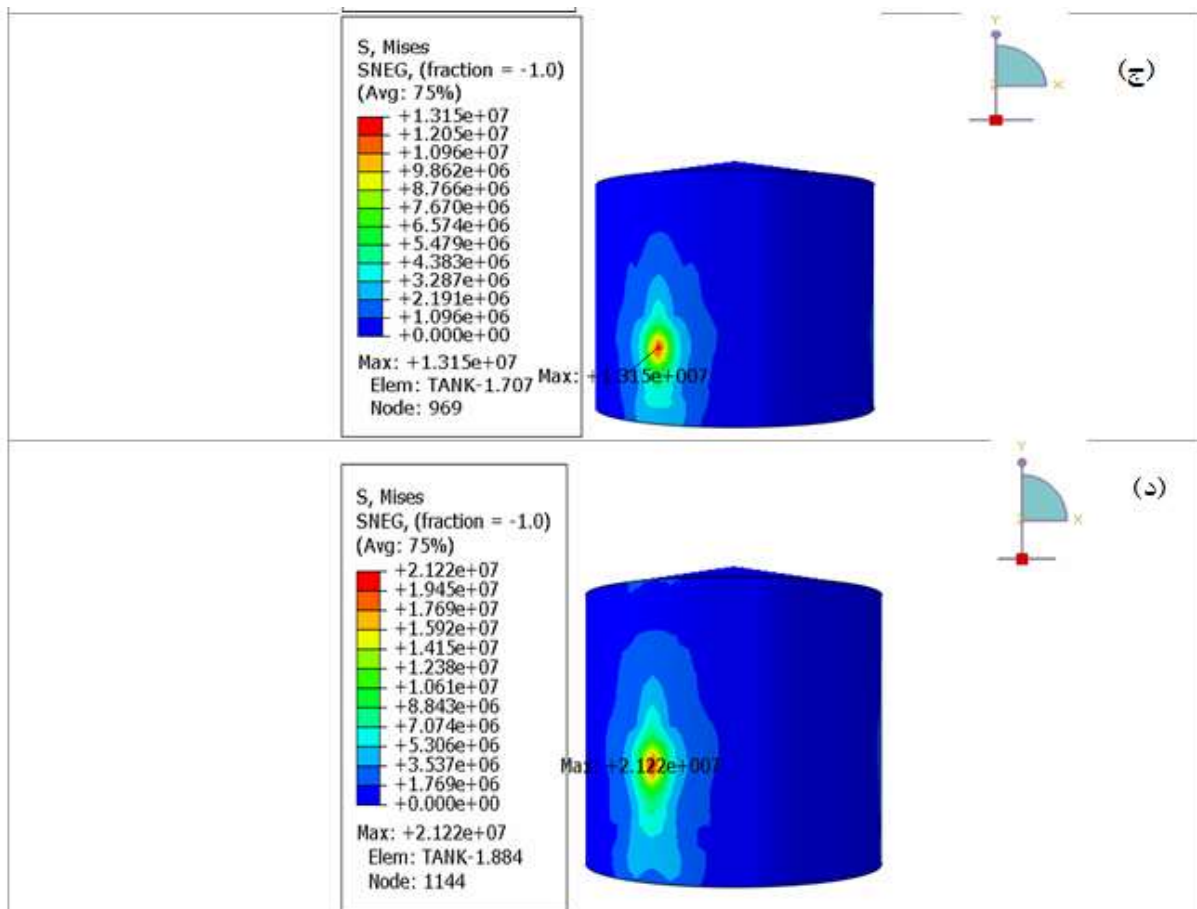
با توجه به نتایج فوق مشاهده شد که با افزایش نسبت $\frac{H}{D}$ ، حداکثر تنش وارد شده به سازه افزایش می‌یابد و محل آن در قسمت تحتانی مخزن و نزدیکی ارتفاع جرم سخت سیال قرار دارد. به جهت بررسی اثر تغییرات ارتفاع روی جابجایی، نمودارهای جابجایی در ارتفاع‌های $\frac{1}{2}$ ، $\frac{2}{3}$ در شکل (۱۳) قابل مشاهده است.



شکل ۱۳- تغییرات جابجایی در ارتفاع مخزن در اثر تغییر ضخامت

با توجه به نمودارهای فوق مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع مخزن جابجایی افزایش پیدا کرده و مخزن با ارتفاع ۱۵ متر دارای بیشترین جابجایی است. به جهت بررسی اثر ارتفاع سیال در مدل‌ها، ارتفاع سیال در مخازن به ترتیب برای شکل‌های (الف) برابر ۱/۷۵ متر، شکل (ب) ۳/۵ متر، شکل (ج) ۵/۲۵ متر و شکل (د) ۷ متر و ارتفاع مخزن ۷ متر، قطر ۱۰ متر و ضخامت ۸ میلی‌متر مدل شدند. حداکثر تنش وارده به جداره مخازن در اثر تغییر ارتفاع سیال، تحت رکورد زلزله السنترو در شکل (۱۴) قابل مشاهده است.

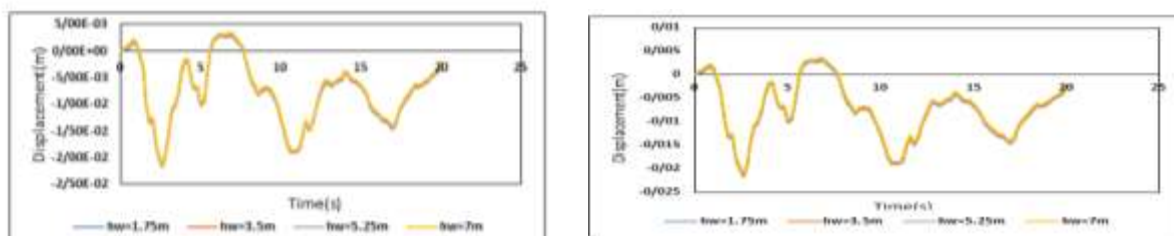




شکل ۱۴- تغییرات تنش در جداره مخزن به ازای مقادیر مختلف ارتفاع سیال (مخزن پر)

با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود، مخزن دارای بیشترین ارتفاع سیال (مخزن پر) دارای حداکثر تنش وارد شده بیشتری است.

به جهت بررسی اثر تغییرات قطر روی جابجایی، نمودارهای جابجایی در ارتفاع‌های $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ در شکل (۱۵) قابل مشاهده است.



ب: $\frac{2}{3}$ ارتفاع مخزن

الف: $\frac{1}{2}$ ارتفاع مخزن

شکل ۱۵- تغییرات جابجایی در ارتفاع مخزن در اثر تغییر ضخامت

با توجه به نمودارهای فوق مشاهده می‌شود مقادیر جابجایی در حالت‌های مختلف به هم نزدیک هستند ولی جابجایی در مخزن با بیشترین ارتفاع سیال با اختلاف بسیار کمی از سایر حالت‌ها بیشتر است.

در این پژوهش مدل‌سازی سیال در مخازن استوانه‌ای روزمینی تحت اثر زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-سیال به دو روش اویلری و جرم و فنر انجام شد. در مدل‌های پارامتریک اثر تغییر ضخامت، ارتفاع مخزن و ارتفاع سیال روی تنش و تغییر شکل مخازن به دو روش اویلری و جرم و فنر بررسی شد.

۱- در روش اویلری با افزایش ضخامت، حداکثر تنش وارد شده به مخزن از لبه‌ی سقف به سمت جداره حرکت می‌کند و مقدار آن کاهش می‌یابد. در مخزن با کمترین ضخامت یعنی ۳ میلی‌متر حداکثر تنش در سقف مخزن رخ داده است، درحالی‌که در سایر ضخامت‌ها حداکثر تنش در قسمت میانی مخزن ایجاد شده است. در اینجا مخزن با ضخامت ۳ میلی‌متر به دلیل اینکه نسبت به استاندارد ارائه شده در آیین‌نامه ضخامت کمتری دارد حداکثر تنش آن در سقف اتفاق افتاده و نسبت به دیگر حالت‌ها دچار تغییر شکل و تنش بیشتری می‌شود.

۲- در روش اویلری با افزایش ضخامت مخزن، جابجایی کاهش پیدا می‌کند. دلیل اختلاف جابجایی مخزن با ضخامت ۳ میلی‌متر نسبت به دیگر حالت‌ها این است که ضخامت آن از مقدار ضخامت مجاز ارائه شده در آیین‌نامه کمتر است.

۳- در روش اویلری با افزایش نسبت حداکثر تنش وارد شده به مخزن افزایش می‌یابد و محل آن با افزایش نسبت از قسمت میانی مخزن به سمت پایین حرکت می‌کند به دلیل اینکه با افزایش نسبت دامنه نوسانات سیال کاهش پیدا می‌کند. همچنین در این حالت با افزایش نسبت جابجایی افزایش پیدا می‌کند.

۴- در روش اویلری با افزایش ارتفاع سیال تا جایی که فضای کافی برای حرکت اسلوشینگ آن وجود داشته باشد حداکثر تنش افزایش پیدا کرده و محل آن از میانه به سمت سقف مخزن حرکت می‌کند. ولی مخزن کاملاً پر به دلیل اینکه فضای کافی برای حرکت سیال ندارد دارای حداکثر تنش کمتری است و محل آن در قسمت تحتانی مخزن است. همچنین در این حالت با افزایش ارتفاع سیال تا جایی که فضای کافی برای حرکت سیال وجود داشته باشد جابجایی افزایش پیدا می‌کند، ولی مخزن کاملاً پر به دلیل اینکه فضای کافی برای حرکت اسلوشینگ سیال ندارد و ضربات کمتری از طرف سیال به جداره وارد می‌شود، دارای جابجایی کمتری است.

۶- در روش جرم و فنر با افزایش ضخامت حداکثر تنش وارد به سازه کاهش می‌یابد و محل آن در تمام حالت‌ها در قسمت تحتانی مخزن قرار دارد و دلیل آن نحوه مدل‌سازی جرم سخت سیال است. همچنین در این حالت با افزایش ضخامت جابجایی کاهش پیدا می‌کند.

۷- در روش جرم و فنر با افزایش نسبت حداکثر تنش وارد شده افزایش پیدا می‌کند و محل آن در تمام نسبت‌ها در قسمت تحتانی مخزن قرار دارد. همچنین در این حالت با افزایش نسبت جابجایی افزایش پیدا می‌کند.

۸- در روش جرم و فنر با افزایش ارتفاع سیال تنش وارده افزایش پیدا کرده و مخزن کاملاً پر دارای حداکثر تنش بیشتری است. محل حداکثر تنش در تمام حالت‌ها در قسمت تحتانی مخزن قرار دارد. همچنین در این حالت با افزایش ارتفاع سیال جابجایی افزایش پیدا می‌کند.

۹- در روش جرم و فنر تنش و جابجایی در پارامترهای بررسی شده مقادیر نزدیکی دارند و محل تنش حداکثر در تمام حالت‌ها در قسمت تحتانی مخزن قرار دارد، به دلیل اینکه در این روش برای مدل‌سازی سیال از روابط تقریبی آیین‌نامه استفاده می‌کنیم و سیال را با جرم سخت و جرم مواج به دست آمده جایگزین می‌کنیم و جرم سخت را در ارتفاع مورد نظر (ارتفاع جرم سخت به دست آمده از آیین‌نامه) به صورت بار متمرکز روی جداره مخزن قرار می‌دهیم، در نتیجه محل حداکثر تنش در محل قرارگیری جرم سخت سیال و در قسمت تحتانی مخزن قرار دارد.

۱۰- با مقایسه مقادیر تنش و جابجایی در دو روش اویلری و جرم و فنر مشاهده شد که این مقادیر در روش اویلری نسبت به جرم و فنر بیشتر است، به دلیل اینکه در روش اویلری سیال به صورت واقعی مدل‌سازی شده و حرکت اسلوشینگ آن

به خوبی نمایش داده می شود ولی روش جرم و فنر بر مبنای روابط تقریبی است و سیال واقعی با جرم معادل آن جایگزین می شود.

۱۱- روش جرم و فنر یک روش ساده شده، همراه با خطا و بر مبنای روابط تقریبی است، ولی روش اویلری به دلیل اینکه سیال را به صورت واقعی مدل سازی می کند و تغییر شکل سیال و حرکت اسلوشینگ آن را به خوبی نشان می دهد، تطابق بیشتری با واقعیت دارد و نسبت به روش جرم و فنر روش دقیق تری است.

۵- مراجع

۱. Bayraktar, A, Sevim, B, Altunışık, A, and Türker, T. (۲۰۱۰). Effect of the model Updating on the earthquake behavior of steel storage tanks. Journal of Constructional Steel Research., ۶۶:۳, ۴۶۲-.
۲. Shekari, M, Khaji, N, and Ahmadi, M. (۲۰۱۰). On the seismic behavior of cylindrical base-isolated liquid storage tanks excited by long-period ground motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering., ۳۰:۱۰, ۹۶۸-۹۸۰.
۳. Hoskins L.M. and Jacobsen L.S, ۱۹۳۴, Water Pressure in a Tank Caused by Simulated Earthquake, Bulletin of the seismological society of America. vol. ۲۴, pp۱-۱۰.
۴. Jacobsen L.S, ۱۹۴۹, Impulsive Hydrodynamics of Fluid Inside a Cylindrical Tank and a Fluid Surrounding a Cylindrical Peir, Bulletin of the seismological society of America, vol. ۳۹, pp۱۸۹-۲۰۴.
۵. Housner, G.W, ۱۹۵۷, Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the seismological society of America. vol. ۴۷, pp۱۵-۳۵.
۶. Veletsos A.S, ۱۹۷۴, Seismic Effects in a Flexible Liquid Storage Tanks, Proceedings of ۵th world Conference of Earthquake Engineering, Rome, Italy, pp۶۳۰-۶۳۹.
۷. L.A. Godoy, E.M. Sosa, ۲۰۰۳, Localized support settlements of thin-walled storage tanks, Thin-Walled Structures. vol. ۴۱, pp. ۹۴۱-۹۵۵.
۸. Eduardo M. Sosa, Luis A. Godoy, ۲۰۰۴, Nonlinear dynamics of above-ground thin walled tanks under fluctuating pressures, Journal of Sound and Vibration. vol. ۲۸۳, pp. ۲۰۱-۲۱۵.
۹. Konstantin Rasiulisa, Antanas Sapalasa, Romualdas Vad, Michail Samofalovc, ۲۰۰۶, Stress/strain state investigations for extreme points of thin wall cylindrical tanks, Journal of Constructional Steel Research, vol. ۶۲, pp. ۱۲۳۲-۱۲۳۷.
۱۰. Hugo Hernández-Barrios, Ernesto Heredia-Zavoni, A lvaro A. Aldama-Rodríguez, ۲۰۰۷, Nonlinear sloshing response of cylindrical tanks subjected to earthquake ground motion, Engineering Structures, vol. ۲۹, pp. ۳۳۶۴-۳۳۷۶.
۱۱. Stéphane Grange, Panagiotis Kotronis, Jacky Mazars, ۲۰۰۸, A macro-element for a shallow foundation to simulate Soil-Structure Interaction considering uplift, C. R. Mecanique, vol. ۳۳۶,

pp. ۸۵۶-۸۶۲

۱۲. Licai Yang, Zhiping Chen, ۲۰۱۳, An analytical formula for elastic-plastic instability of large oil storage tanks, International journal of Pressure vessels and piping, Vol ۱۰۱, pp ۷۲-۸۰.
۱۳. Ruifu Zhang, Dagen Weng, ۲۰۱۴, Assessment of the seismic effects of isolation on extra-large cryogenic liquid natural gas storage tanks, Journal of loss prevention in the process industries, Vol. ۳۰, pp ۹-۱۶.
۱۴. Farajian, M., Khodakarami, M. I., & Kontoni, D. P. N. (۲۰۱۶). Evaluation of Soil-Structure Interaction on the Seismic Response of Liquid Storage Tanks under Earthquake Ground Motions. Computation, ۵(۱), ۱۷.
۱۵. Shi, L., Shuai, J., Wang, X., & Xu, K. (۲۰۱۷). Experimental and numerical investigation of stress in a large-scale steel tank with a floating roof. Thin-Walled Structures, ۱۱۷, ۲۵-۳۴.
۱۶. Burkacki, Daniel, and Robert Jankowski. "Experimental Study on Steel Tank Model Using Shaking Table/Badania Eksperymentalne Modelu Zbiornika Stalowego Na Stole Sejsmicznym." Civil and Environmental Engineering Reports ۱۴, ۳ (۲۰۱۴): ۳۷-۴۷.