

# بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و ارایه طرح مقاوم‌سازی مخازن نفتی فولادی

یاسر زارع<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۸۹/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۳/۳۰

## چکیده

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای پنج عدد مخزن با نسبت‌های ارتفاع به قطر ۰/۳۹، ۰/۴۷، ۰/۵۳، ۰/۶۳ و ۱/۰ توسط نرم‌افزار توانمند ANSYS بررسی شده و مکانیزم‌های خرابی آنها شامل کمانش الاستوپلاستیک پافیلی، کمانش الاستیک الماسی، آسیب‌دیدگی سقف در اثر نوسان سیال، لغزش، واژگونی، بلند شدگی کف و نشست نامتقارن مخزن به صورت کمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت بررسی پارامترهای فوق‌الذکر چندین تحلیل شامل تحلیل استاتیکی، مودال، طیفی (خطی) و تاریخیچه زمانی (غیرخطی) بر روی مخازن فوق صورت گرفته و نتایج به دست آمده بیان شده است. در نهایت مشخص گردید که اگر میزان Free board مخازن برابر  $0/18 H$  (H: ارتفاع مخزن) در نظر گرفته شود، خطری از نظر پدیده نوسان سیال به هنگام وقوع زلزله متوجه سقف مخزن نخواهد بود. همچنین مشاهده گردید که مخازن با نسبت ارتفاع به قطر بزرگ‌تر و یا مساوی یک تحت بارهای وارده واژگون شده و ناپایدار می‌باشند. سایر مکانیزم‌های بررسی شده نیز همگی کمتر از مقادیر مجاز آیین‌نامه ارزیابی گردید. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که مخازن مورد بررسی، در شیراز واقع شده‌اند و نتایج ارایه شده در مورد مخازن مهار نشده، محتوی نفت خام معتبر می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** مقاوم‌سازی، مخازن فولادی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای، کمانش پافیلی، کمانش الماسی

## ۱- مقدمه

یکی از سازه‌های بسیار مهم که کاربرد فراوانی در پالایشگاه‌های نفتی دارد، مخازن روزمینی نفتی است که به صورت استوانه‌های فولادی طراحی و اجرا می‌گردند. در واقع مخزن را وقتی روزمینی گویند که کف آن متکی بر بستر خاک باشد. یک مخزن فولادی از سه جزء اصلی تشکیل یافته است: بدنه، کف و سقف. کف مخزن، ورق تختی می‌باشد که متکی بر بستر متراکم و یا شالوده گسترده بوده و سقف آن نیز بسته به نوع ماده ذخیره شده در آن، به صورت ثابت و یا متحرک ساخته می‌شود. رفتار دینامیکی مخازن، اولین بار توسط هازنر مدلسازی شد و مبنای طراحی آیین‌نامه‌ها قرار گرفت. وی چنین عنوان کرد که در یک مخزن دارای سطح آزاد که در معرض شتاب جانبی دینامیکی قرار دارد، سیال از دو طریق بر روی جداره اثر می‌گذارد: (۱) فشار نوسانی (۲) فشار ضربانی. فشار نوسانی در اثر حرکت سیال مواج در بالای مخزن پدید می‌آید و فشار ضربانی در اثر حرکت قسمتی از سیال در پایین مخزن و هماهنگ با پوسته ایجاد می‌گردد. در حقیقت فرکانس حرکت نوسانی به میزان قابل توجهی پایین‌تر از فرکانس حرکت ضربانی است، بدین معنی که این مود در پرونده‌های بالای زلزله تحریک می‌شود [۱]. در سال ۲۰۰۳ میلادی علی‌الزینی استاد و محقق دانشگاه کالیفرنیا مقاله‌ای تحت عنوان «بررسی فاکتورهای مؤثر در پاسخ لرزه‌ای غیر خطی مخازن مهار نشده» ارائه کرد. وی در این تحقیق اثرات فشار هیدرو دینامیکی سیال را بر روی جداره مخازن مهار نشده در طول ارتعاشات ناشی از زلزله مورد بررسی قرار داد. او همچنین نتیجه گرفت که احداث مخازن بر روی فونداسیون‌های انعطاف‌پذیر مناسب‌تر از اجرای آنها بر روی فونداسیون‌های صلب می‌باشد، چرا که نرمی فونداسیون سبب طولانی شدن پریود جابجایی مخازن در برابر نیروهای هیدرو دینامیکی می‌گردد [۲]. در سال ۲۰۰۴ نیز مارتین کولر به همراه پروین مالهورترا مقاله‌ای تحت عنوان «ارزیابی لرزه‌ای مخازن مهار نشده» ارائه نمودند که در آن تعداد هفت مخزن را با نسبت‌های ارتفاع به شعاع ( $H/R$ ) مختلف تحت بررسی قرار دادند. آنها چنین عنوان کردند که یک ارتباط تنگاتنگ بین نسبت  $H/R$  و چرخش پلاستیک مخازن وجود دارد [۳].

مخازن روزمینی بسته به شرایط تکیه‌گاهی، به دو دسته تقسیم می‌شوند: مهار شده و مهار نشده. در یک مخزن مهار شده از

حرکت قائم نسبی جداره در سطح پی جلوگیری شده است، در حالی که یک مخزن مهار نشده در اثر تکان‌های شدید می‌تواند از روی زمین بلند شود و بنابراین برای تحلیل دقیق دینامیکی آن یک آنالیز غیرخطی لازم است. بدین ترتیب جهت ارزیابی رفتار لرزه‌ای مخازن، تعداد ۵ مخزن با نسبت‌های ارتفاع به قطر مختلف توسط نرم‌افزار توانمند ANSYS مدلسازی شده و چندین تحلیل شامل تحلیل‌های استاتیکی، مودال، طیفی و تاریخچه زمانی بر روی آنها صورت پذیرفته است.

در این راستا طیف ویژه ساختگاه بر اساس پارامترهای ساختگاهی تهیه شده و در تحلیل طیفی از آن استفاده به عمل آمده است. طبق دستورالعمل ASCE جهت ارزیابی لرزه‌ای تأسیسات پالایشگاهی بایستی از طیف به‌دست آمده برای ساختگاه با احتمال گذر ۱۰ درصد در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ ساله) استفاده نمود [۱]. همچنین آیین‌نامه API 650 ضمیمه E، استفاده از میرایی ۲ درصد برای مود ضربانی و ۰/۵ درصد برای مود نوسانی مخزن را توصیه می‌نماید [۴]. جهت تحلیل تاریخچه زمانی پس از بررسی پارامترهای ساختگاهی، رکوردهای زلزله‌های گلباف، طیس و السنترو بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ بهترین تطابق را با شرایط ساختگاه داشته که به صورت سه مؤلفه‌ای در جهات متعامد با نسبت‌های ۱۰۰، ۳۰ و ۳۰ درصد اعمال گردیده‌اند [۵].

در ادامه، مکانیزم‌های خرابی مخازن و نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته بر روی هر یک از مخازن ذکر شده، در جدول (۱) آورده شده است.

## ۲- مکانیزم‌های خرابی مخازن

آسیب‌های وارده به مخازن را می‌توان در قالب هفت معیار آسیب‌پذیری بیان نمود که در ذیل به صورت مختصر ارائه می‌گردند.

## ۲-۱- واژگونی

وقتی نسبت ارتفاع به قطر زیاد می‌شود، پایداری مخزن در برابر این آسیب‌دیدگی کاهش می‌یابد. علت این پدیده بالا رفتن ارتفاع مرکز ثقل مخزن می‌باشد. این معیار با استفاده از ضوابط ضمیمه E آیین‌نامه API 650 و نسبت  $M/[D^2(W_L + W_t)]$  کنترل می‌گردد. بدین ترتیب که در

جدول ۱- مشخصات مخازن بررسی شده در این پژوهش

شماره مخزن	ارتفاع (m)	قطر (m)	چگالی سیال ( $T/m^3$ )	تنش تسلیم فولاد ( $kg/cm^2$ )	نسبت $H/D$
۱	۱۴/۶۴	۳۷/۱۹	۰/۷۵	۲۴۰۰	۰/۳۹
۲	۱۴/۶۴	۳۱/۱۰	۰/۷۵	۲۴۰۰	۰/۴۷
۳	۱۲/۸۱	۲۴/۳۸۴	۰/۷۵	۲۴۰۰	۰/۵۳
۴	۱۱/۹۲	۱۸/۹۸	۰/۷۵	۲۴۰۰	۰/۶۳
۵	۱۴/۶۴	۱۴/۶۴	۰/۷۵	۲۴۰۰	۱/۰۰

این پدیده می‌گردد. برای کنترل مخزن در برابر لغزش، برش پایه به‌عنوان نیروی محرک و نیروی اصطکاک کف مخزن با بستر به‌عنوان نیروی مقاوم در نظر گرفته شده و به پیشنهاد دستورالعمل ASCE برای تأسیسات موجود از ضریب اطمینان ۱/۵ استفاده شده است. همچنین برای محاسبه نیروی مقاوم نیز ضریب اصطکاک کف مخزن و بستر برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است [۱].

#### ۲-۵- آسیب‌دیدگی سقف

نیروی ارتعاشی زلزله باعث ارتعاش مخزن و سیال درون آن می‌گردد. ارتعاش امواج با فرکانسی خیلی پایینتر از فرکانس جداره رخ می‌دهد و متأثر از ارتعاش جداره نیست، بلکه دامنه آن بیشتر از محتوای فرکانسی رکورد می‌باشد. در این حالت اگر پیش‌بینی‌های لازم برای جابجایی سقف شناور متناسب با دامنه امواج سطح سیال نشده باشد، موجب می‌گردد که پوشش فوقانی صدمه دیده و محتویات درونی مخزن به بیرون پاشیده شود و یا با ضربه شدید به قسمت‌هایی از نگهدارنده‌های سقف صدمه بزند. عامل کنترل‌کننده، ارتفاع موج می‌باشد [۱].

#### ۲-۶- بلندشدگی کف

بلندشدگی کف مخزن در صورتی که از مقدار مجاز آن (۳۰ سانتیمتر مطابق با «راهنمای طرح و ارزیابی لرزه‌ای تأسیسات پتروشیمی») بیشتر شود، ممکن است باعث پارگی جداره مخزن و یا شکستگی لوله‌های متصل به آن گردد [۱].

صورتی که این نسبت بیشتر از ۱/۵۷ باشد، مخزن ناپایدار بوده و واژگون خواهد شد [۴]. در رابطه فوق،  $M$ : لنگر واژگونی مخزن،  $(N - m) W_L$ : وزن محتویات مخزن در واحد طول محیط،  $(N/m) W_f$ : نیز وزن ورق جداره در واحد طول محیط مخزن بر حسب  $(N/m)$  می‌باشد.

#### ۲-۲- کماتش الاستیک الماسی جداره

تنش‌های فشاری ایجاد شده در جداره مخازن سبب بروز کماتشی در قسمت‌های میانی آن می‌گردد که کماتش الماسی نام دارد. مخازن با ارتفاع زیاد معمولاً دچار چنین آسیبی می‌شوند. با محدود کردن تنش فشاری ایجاد شده در جداره مخزن و مقایسه آن با تنش مجاز جداره مطابق با ضوابط ضمیمه E آیین‌نامه API 650 کنترل می‌گردد [۴].

#### ۲-۳- کماتش الاستوپلاستیک پافیلی جداره

معمولاً در مخازن بزرگ در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری از سطح زمین رخ می‌دهد و علت ایجاد چنین کماتشی این است که در هنگام وقوع بلندشدگی در مخزن، تنش فشاری قائم به شدت افزایش می‌یابد. در این حالت ترکیب دو تنش کششی حلقوی و فشاری قائم باعث ایجاد این کماتش در جداره می‌گردد. بدین ترتیب افزایش بیش از حد تنش کششی حلقوی در جداره مخزن می‌تواند به‌عنوان معیاری برای کنترل کماتش پافیلی به‌کار رود [۴].

#### ۲-۴- لغزش مخزن

نیروی برشی بزرگ در مقابل نیروی اصطکاک کم باعث بروز

سه بعدی یکی از مخازن به همراه چگونگی مش‌بندی آن در شکل (۱) نشان داده شده است. المان Shell 63 یک المان خمشی - غشائی است که قابلیت تحمل نیروهای داخل صفحه و عمود بر صفحه را دارا می‌باشد. از ویژگی‌های دیگر این المان می‌توان قابلیت‌های سخت‌شدگی تنش و تغییر مکان‌های بزرگ را نام برد. المان Fluid 80 برای مدل کردن سیال داخل مخازن که بدون جریان می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این المان خصوصاً برای محاسبه فشار هیدرواستاتیک و اندرکنش سیال و سازه بسیار مناسب است. در ادامه، تحلیل‌های صورت گرفته بر روی مخازن به اختصار شرح داده می‌شود.

### ۳-۱- تحلیل استاتیکی

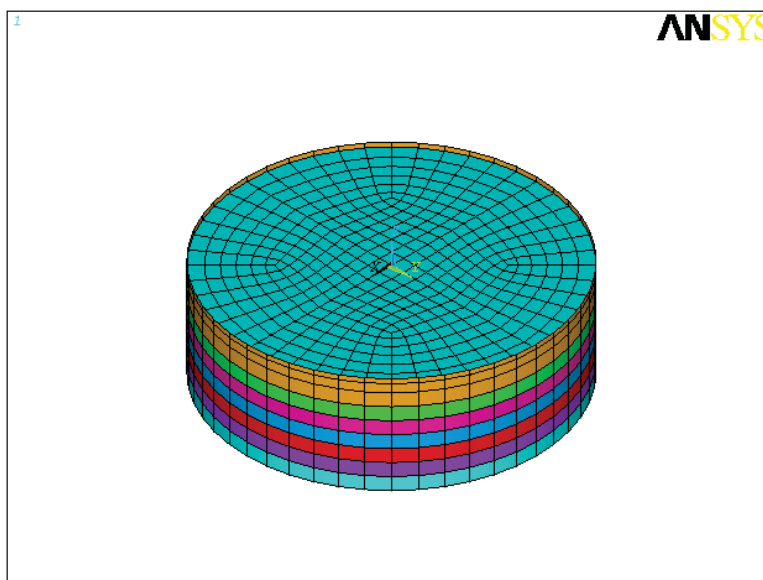
به‌عنوان اولین گام در تحلیل کمی، مخازن تحت اثر وزن خود و فشار هیدرواستاتیک سیال داخل آن تحلیل شده‌اند. از این تحلیل، علاوه بر اثر آن در ترکیب بارگذاری، می‌توان به‌عنوان معیاری برای ارزیابی مدل ساخته شده استفاده نمود. در حقیقت فشار هیدرواستاتیک ایجاد شده سبب ایجاد تنش‌های کششی حلقوی در جداره مخزن می‌گردد.

### ۲-۷- نشست نامتقارن بستر

در اثر ضربه ناشی از بلندشدگی کف ممکن است مخزن دچار این آسیب دیدگی شود. برای کنترل آن، حداکثر نشست بستر، به ۵ سانتیمتر محدود شده است [۱].

### ۳- مدلسازی مخازن

برای نزدیک شدن به رفتار دقیق مخازن به هنگام تحریک زلزله، هم جداره و هم سیال درون مخزن مدل شده‌اند. برای مدل کردن جداره از المان Shell 63 و برای سیال از المان Fluid 80 استفاده شده است. همچنین برای مدل کردن بلندشدگی کف مخازن از شرایط Gap استفاده شده است. در حقیقت یک فنر فشاری بوده که به‌هنگام کشش، سختی آن صفر می‌گردد. برای این منظور المان Link 10 انتخاب شده است. لازم به توضیح است که محدوده مرزی المان‌های مایع درست منطبق با پوسته نیستند. روابط قیدی در مرز مایع و جداره طوری تعریف شده‌اند که امکان حرکت نسبی بین آنها فراهم گشته است. همچنین گره‌های مایع و جداره در کف مخزن می‌توانند مستقلاً حرکت داشته باشند. مدل



شکل ۱- مدل سه بعدی یکی از مخازن و نحوه مش‌بندی آن در نرم‌افزار ANSYS

### ۲-۳- تحلیل مودال

پارامترهای مشخصات نوسان یک مخزن شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی از عوامل مهم در تحلیل آن به‌شمار می‌رود. تعیین این پارامترها در گام اول می‌تواند در تفسیر چگونگی رفتار مخزن بسیار مفید واقع شود. تحلیل مودال با هدف تعیین این مشخصات به‌کار رفته است. در این میان فرکانس‌های اصلی مخازن شامل فرکانس مود نوسانی و مود ضربانی جهت استفاده در تحلیل‌های بعدی استخراج گردیده است. ذکر این نکته ضروری است که دو مود ذکر شده دارای حداکثر جرم مؤثر می‌باشند [۵].

### ۳-۳- تحلیل طیفی

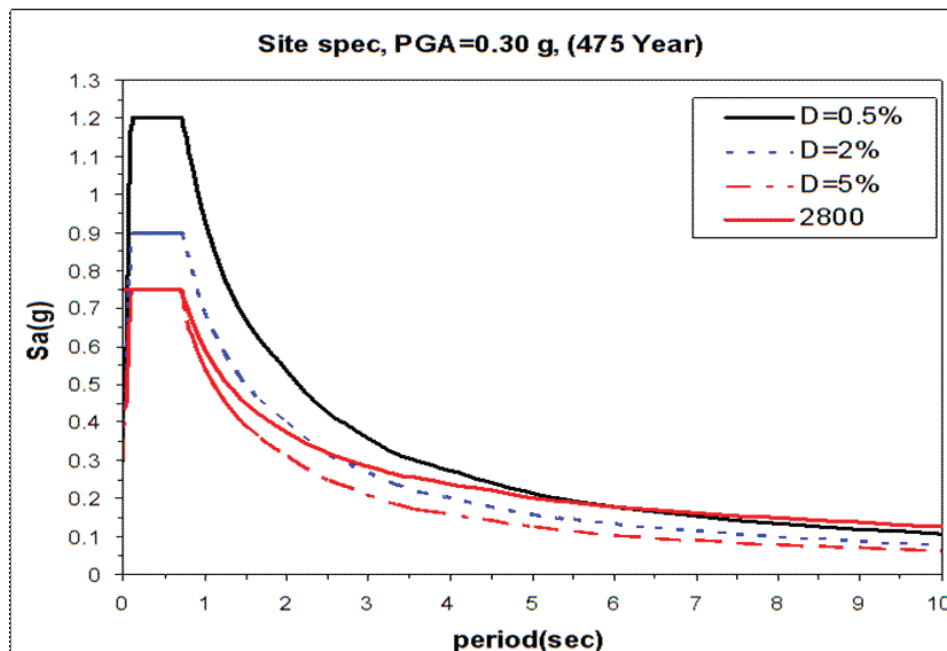
پس از انجام تحلیل مودال و تعیین مدهای اصلی مخزن بایستی با استفاده از طیف طرح ساختمانگاه، مخازن را تحلیل طیفی نمود. در این تحلیل ترکیب مودها با استفاده از روش CQC انجام گرفته و نتایج جهات متعامد با درصدهای ۳۰ و ۱۰۰ ترکیب شده است. مطابق با دستورالعمل ASCE جهت ارزیابی لرزه‌ای تأسیسات پالایشگاهی بایستی از طیف طرح با

احتمال گذر ۱۰ درصد در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) استفاده نمود. همچنین ضمیمه E آیین‌نامه API 650 استفاده از میرایی ۲ درصد برای مود ضربانی و ۰/۵ درصد برای مود نوسانی مخزن را توصیه می‌نماید. در شکل (۲) طیف طرح ساختمانگاه به همراه طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ که در تحلیل از آن استفاده شده، نشان داده شده است [۴] و [۵].

### ۴-۳- تحلیل تاریخچه زمانی

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، آنالیز تاریخچه زمانی می‌تواند کلیه عوامل غیر خطی را در آنالیز وارد کند. بنابراین جهت برآورد میزان بلندشدگی و میزان دقیق پاسخ‌های سازه از این تحلیل استفاده شده است. هدف از تحلیل تاریخچه زمانی حل معادله حرکت زیر برای شتاب‌های متوالی اعمال شده به کف سازه می‌باشد.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \ddot{u}_g(t)[M] \quad (1)$$



شکل ۲- طیف طرح ساختمانگاه برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال با میرایی ۲/۵ و ۰/۵ درصد و آیین‌نامه ۲۸۰۰

#### ۴- کنترل واژگونی

همانگونه که قبلاً ذکر شد، کنترل واژگونی مطابق با ضوابط ضمیمه E آیین‌نامه API 650 صورت گرفته است. از طرفی براساس آیین‌نامه ASCE، جهت بررسی تأسیسات پالایشگاهی موجود، نیازی به در نظر گرفتن ضریب اهمیت بالای یک نمی‌باشد. خاک محل از نوع III بوده و ضریب S برابر ۱/۶ در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب نسبت  $M/[D^2(W_L + W_t)]$  در کلیه مخازن محاسبه گردیده و نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است [14]. مشاهده می‌شود که مخازن با نسبت  $H/D = 1$  تحت بارگذاری‌های جانبی واژگون خواهد شد.

#### ۵- کنترل کمانش الاستیک الماسی در جداره

پس از محاسبه نسبت  $M/[D^2(W_L + W_t)]$  می‌توان حداکثر مقدار نیروی فشاری در واحد طول محیط جداره مخزن (b) را به دست آورد. این نیرو با توجه به ضوابط E آیین‌نامه API 650 محاسبه شده و به دنبال آن، تنش فشاری جداره مخزن  $(b/1000t)$  و تنش مجاز مربوطه به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده از این محاسبات در جدول (۳) به نمایش درآمده است. طبق ضوابط آیین‌نامه API 650 کنترل کمانش الاستیک الماسی تنها در مورد مخازنی صورت می‌گیرد که پایدار بوده و مشکل واژگونی نداشته باشند. در حقیقت روابط موجود در این آیین‌نامه جهت کنترل کمانش الماسی تنها در مورد مخازن پایدار معتبر می‌باشد. بنابراین کنترل این پارامتر در مورد مخزن شماره پنج امکان‌پذیر نمی‌باشد [۴].

برای حل این معادله در حوزه زمان از روش نیومارک استفاده می‌شود. ماتریس میرایی کل سیستم در معادله فوق از مجموع ماتریس‌های میرایی المان‌های لزج سیال و ماتریس میرایی سازه‌ای تشکیل می‌شود. برای میرایی سازه‌ای، فرض میرایی رایلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، یعنی میرایی وابسته خطی از جرم و سختی است. در این صورت خواهیم داشت:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] + \sum_{i=1}^m [CF_i] \quad (2)$$

که در آن،  $[CF_i]$  ماتریس میرایی المان  $i$  ام سیال ویسکوز، و  $m$ ، تعداد المان‌های سیال می‌باشد. در این صورت ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  مطابق رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_j^2 + \omega_i^2} \begin{bmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -1/\omega_j & 1/\omega_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $\omega_j$  و  $\omega_i$  فرکانس‌های دو مود اصلی مخزن و  $\xi_j$  و  $\xi_i$  میرایی‌های مربوط به آنها می‌باشد. ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  به دست آمده از این رابطه به عنوان ورودی برنامه جهت تحلیل تاریخیچه زمانی به کار رفته است [۱].

پس از شرح مختصر تحلیل‌های صورت گرفته در مورد مخازن، معیارهای آسیب‌پذیری فوق‌الذکر در مورد کلیه مخازن کنترل و نتایج هر کدام به صورت جداگانه و در قالب اشکال و جداولی بیان شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از کنترل واژگونی در مخازن

شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار به دست آمده از تحلیل	مقدار مجاز	وضعیت آسیب‌پذیری
۱	$M/[D^2(W_L + W_t)]$	۰/۹۶۱	۱/۵۷	OK
۲	$M/[D^2(W_L + W_t)]$	۱/۱۲	۱/۵۷	OK
۳	$M/[D^2(W_L + W_t)]$	۰/۵۵	۱/۵۷	OK
۴	$M/[D^2(W_L + W_t)]$	۱/۱۷	۱/۵۷	OK
۵	$M/[D^2(W_L + W_t)]$	۱/۹۵	۱/۵۷	N.G.

جدول ۳- تنش‌های فشاری جداره و کنترل کمانش الماسی

شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار به دست آمده از تحلیل (Mpa)	مقدار مجاز (Mpa)	وضعیت آسیب پذیری
۱	تنش فشاری جداره	۳/۶۹	۲۴/۸۶	OK
۲	تنش فشاری جداره	۵/۷۳	۳۷/۳۶	OK
۳	تنش فشاری جداره	۱۲/۱۶	۳۲/۳۴	OK
۴	تنش فشاری جداره	۷/۶۹	۳۹/۳۹	OK
۵	تنش فشاری جداره	-	-	-

### ۶- کنترل کمانش الاستوپلاستیک پافیلی

با توجه به مطالب گفته شده در قسمت‌های قبل، عامل به وجود آورنده این نوع کمانش، ترکیب تنش‌های کششی حلقوی و فشاری قائم در جداره مخازن می‌باشد. بنابراین جهت کنترل این پدیده، تنش‌های کششی حلقوی در جداره مخازن تحت اثر آنالیزهای مختلف کنترل شده و نتایج به دست آمده در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۳) میزان تنش‌های کششی حلقوی حداکثر در جداره مخزن شماره سه در آنالیز طیفی به عنوان نمونه به نمایش گذاشته شده است. طبق دستورالعمل ASCE ظرفیت مجاز تنش‌های کششی در جداره مخازن برابر با  $F_a = 1.6(0.6F_y)$  بوده که  $F_y$  در این رابطه برابر با تنش حد جاری شدن فولاد مصرفی است که در مخازن مورد بررسی برابر با ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد [۱].

### ۷- کنترل لغزش

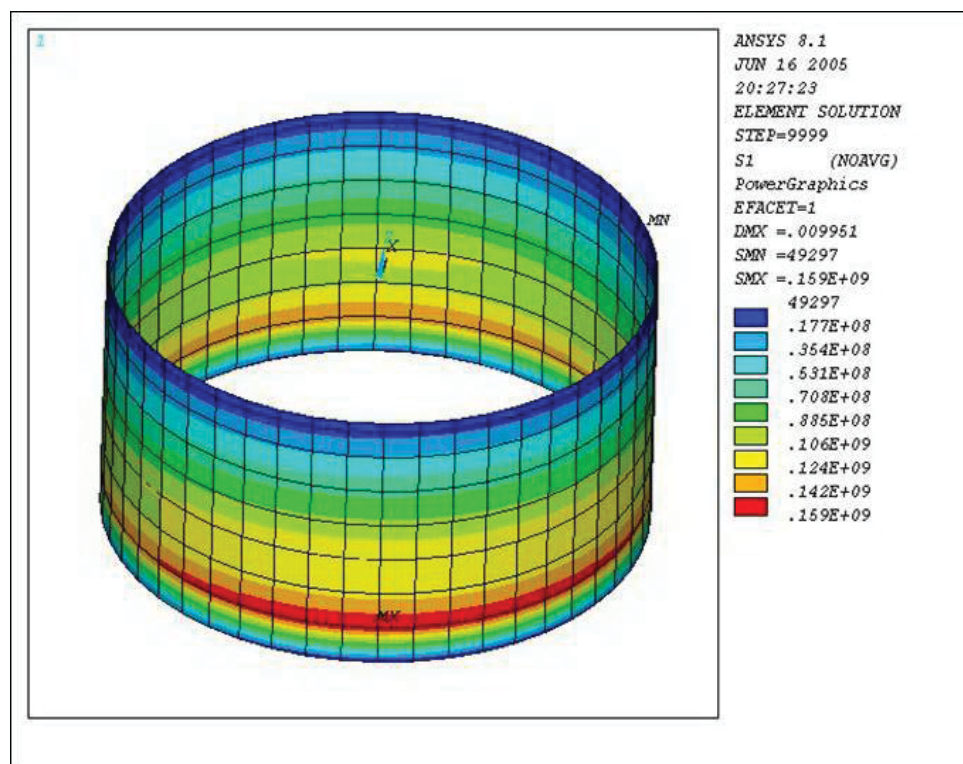
به منظور کنترل لغزش مخازن، حداکثر برش پایه به دست آمده برای هر مخزن با استفاده از نتایج تحلیل طیفی و تاریخچه زمانی به عنوان نیروی محرک (V) از نرم افزار استخراج شده است. نیروی مقاوم در برابر لغزش توسط وزن سازه و اصطکاک بین کف و بستر مخزن به دست می‌آید. مطابق آیین‌نامه ASCE ضریب اطمینان در برابر لغزش تأسیسات موجود بایستی ۱/۵ در نظر گرفته شود. همچنین ضریب اصطکاک کف مخزن و بستر نیز برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب جهت کنترل لغزش مخازن رابطه ذیل بررسی شده است [۱].

$$1.5V \leq 0.4W \quad (۴)$$

که در این رابطه، W وزن مخزن و سیال درون آن بر حسب نیوتن می‌باشد.

جدول ۴- تنش‌های کششی حلقوی و کنترل کمانش پافیلی

شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار به دست آمده از تحلیل (Mpa)	مقدار مجاز (Mpa)	وضعیت آسیب پذیری
۱	تنش کششی حلقوی	۱۷۲	۲۲۶	OK
۲	تنش کششی حلقوی	۱۶۵	۲۲۶	OK
۳	تنش کششی حلقوی	۱۵۹	۲۲۶	OK
۴	تنش کششی حلقوی	۱۶۰	۲۲۶	OK
۵	تنش کششی حلقوی	۱۱۸	۲۲۶	OK



شکل ۳- تنش کششی حلقوی در جداره مخزن شماره ۳ در آنالیز طیفی ( $N/m^2$ )

جدول ۵- کنترل لغزش با توجه به نیروی محرک و مقاوم در برابر آن

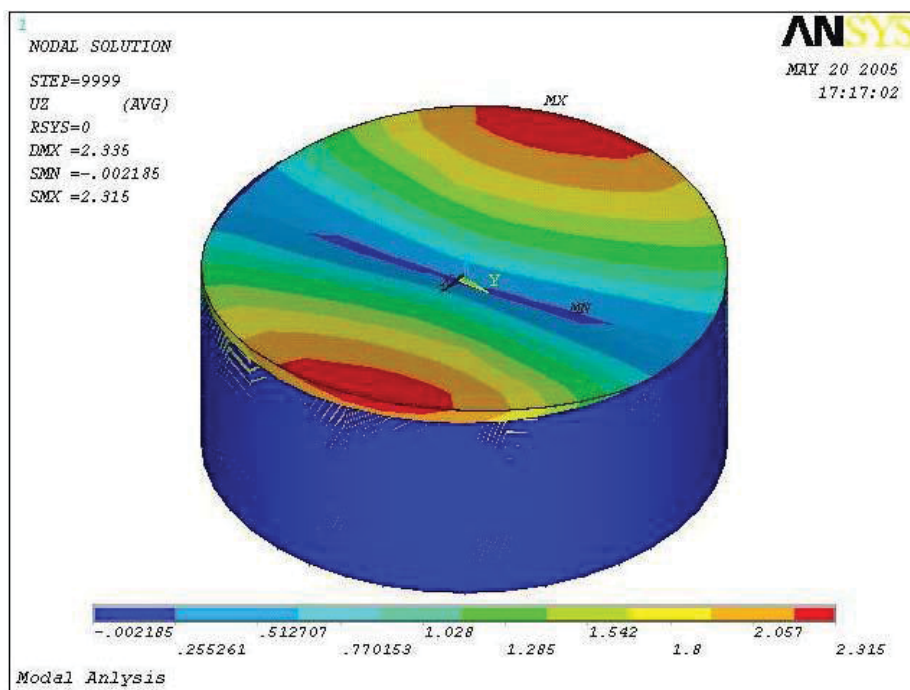
شماره مخزن	نیروی محرک (MN)	نیروی مقاوم (MN)	نیروی مقاوم به نیروی محرک	وضعیت آسیب پذیری
۱	۲۳/۱۴	۴۵/۷۸	۲/۰۵	OK
۲	۱۵/۶۳	۳۱/۹۷	۱/۶۷	OK
۳	۸/۴۵	۱۸/۵۳	۱/۹۶	OK
۴	۷/۴۱	۹/۶۹	۱/۳۱	OK
۵	۴/۸۹	۷/۱۵	۱/۴۶	OK

آسیب‌هایی به سقف مخازن می‌گردد. در ادامه، حداکثر ارتفاع امواج ایجاد شده در مخازن شماره یک که از تحلیل طیفی استخراج شده به عنوان نمونه در شکل (۴) نشان داده شده است. خلاصه نتایج به‌دست آمده نیز در جدول (۶) ارائه گردیده است.

#### ۸- کنترل پدیده Sloshing و آسیب‌دیدگی سقف

ارتعاش مخزن و سیال درون آن در اثر لرزش‌های ناشی از زلزله سبب پدیدار شدن امواجی در سطح سیال درونی شده که اگر پیش‌بینی‌های لازم در این مورد نشود، سبب وارد آمدن





شکل ۴- حداکثر ارتفاع سیال مخازن شماره یک

جدول ۶- حداکثر ارتفاع موج ایجاد شده در مخازن در اثر زلزله

شماره مخزن	نسبت H/D	ارتفاع موج ایجاد شده (m)	Free board فعلی (m)	درصد ارتفاع بحرانی (m)	وضعیت آسیب پذیری
۱	۰/۳۹	۲/۳۱۵	۰/۶۴	۱۵/۸۱	N.G.
۲	۰/۴۷	۲/۳۰۵	۰/۶۴	۱۵/۷۴	N.G.
۳	۰/۵۳	۲/۲۷۹	۰/۵۵	۱۷/۷۹	N.G.
۴	۰/۶۳	۱/۷۲۰	۰/۵۵	۱۴/۴۳	N.G.
۵	۱/۰۰	۱/۵۸۰	۰/۶۴	۱۰/۷۹	N.G.

صورت گرفته است. پارامترهایی که در انتخاب رکورد زلزله می‌تواند تأثیر زیادی داشته باشد شامل مکانیزم گسلش، تطابق شرایط ساختگاه با ایستگاه ثبت رکورد، اعم از پروفیل لایه‌ها و جنس خاک، دوره زمین‌شناسی، فاصله ایستگاه تا گسل، بیشینه پتانسیل لرزه‌زایی گسل اصلی و... مدنظر قرار گرفته و

## ۹- کنترل میزان بلندشدگی و نشست نامقارن

### بستر

با توجه به غیر خطی بودن رفتار مخازن مهار نشده، جهت بررسی میزان بلندشدگی کف و نشست ناشی از ضربه این بلندشدگی‌ها، آنالیز غیرخطی تاریخچه زمانی بر روی مخازن

شده و ناپایدار می‌باشد. بدین ترتیب در ادامه راهکارهایی جهت مقاوم‌سازی این مخازن ارائه گردیده است. به منظور جلوگیری از آسیب‌های وارده به سقف در اثر پدیده Sloshing سیال که در همگی مخازن بررسی شده مشاهده گردیده است، به نظر می‌رسد کاهش ارتفاع سیال درونی تا سطوح بیان شده در جدول (۶) بهترین راه‌حل موجود و در عین حال کم‌هزینه‌ترین طرح پیشنهادی می‌باشد. در واقع چنین می‌توان بیان کرد که اگر میزان Free board مخازن برابر با  $0.18 H$  (ارتفاع مخزن) در نظر گرفته شود، پدیده Sloshing، هیچگونه آسیبی را به سقف سازه وارد نخواهد ساخت.

در مورد مخزن شماره پنج، پس از بررسی راه‌حل‌های پیشنهادی آیین‌نامه API 650، افزودن یک رینگ بتنی به اطراف مخزن (زیر ورق پوسته) و مهار مخزن در این رینگ بتنی انتخاب شده و نسبت  $M/[D^2(W_L + W_T)]$  در آن کنترل گردیده است. بدین ترتیب این نسبت به  $0.56$  تقلیل یافته و کمتر از حد مجاز آن یعنی  $1/57$  می‌باشد [۴]. نمایی از طرح پیشنهادی در شکل (۵) نشان داده شده است. تنش‌های کششی جداره نیز محاسبه گردیده و نتایج حاصله مطلوب ارزیابی شده است، بدین ترتیب که مقدار تنش کششی موجود در جداره پس از مقاوم‌سازی برابر با  $12/34$  مگاپاسکال بوده که کمتر از مقدار مجاز آن ( $43/58$  مگاپاسکال) می‌باشد. در طراحی این رینگ بتنی باید توجه نمود که بر طبق ضوابط آیین‌نامه API 650، فاصله میله مهارها نباید بیشتر از  $3$  متر در نظر گرفته شود. همچنین قطر مهارهای به کار رفته نباید کمتر از  $25$  میلیمتر باشد [۴].

زلزله طیس با توجه به اهمیت آن از لحاظ قدرت، فرم طیف شتاب، محتوای فرکانسی و مدت زمان وقوع زلزله به‌عنوان رکورد مورد استفاده انتخاب شده است [۵] و از آنجا که اغلب آیین‌نامه‌ها حداقل سه رکورد از سه زلزله مختلف را توصیه می‌نمایند، در این تحقیق رکورد زلزله‌های طیس، گلباف و السنتر و که شرایط فوق‌الذکر را برآورده کرده‌اند، انتخاب شده‌اند [۱]. پس از آنالیز، تاریخچه زمانی تغییر مکان قائم گره‌های کف مخزن تحت رکوردهای فوق بررسی شده و حداکثر مقادیر آنها استخراج و در جدول (۷) ارائه گردیده است.

### ۱۰- راهکارهای مقاوم‌سازی

با توجه به محدودیت‌های موجود در شناخت میزان دقیق خطر لرزه‌ای در ارتباط با یک ساختگاه یا پروژه طراحی، هیچ فرایند طراحی و یا مقاوم‌سازی نمی‌تواند عدم رخداد مشخصی را از جهت خرابی در یک زلزله بزرگ تضمین نماید و یا با قطعیت اعلام کند. اما افزودن حاشیه اطمینان و عملکرد محافظه‌کارانه در مسیر طراحی و یا ارزیابی آسیب‌پذیری و بررسی‌های دقیق با جزئیات بیشتر می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری را از رفتار آتی مخازن در اختیار قرار دهد؛ اگرچه همواره پذیرش سطوحی از خطر، اجتناب‌ناپذیر است. لذا هدف اصلی در مسیر طراحی و یا ارزیابی آسیب‌پذیری و مقاوم‌سازی، کاهش خطر و حداقل نمودن آن با در نظر گرفتن امکانات و منابع موجود می‌باشد [۱]. با توجه به مطالب عنوان شده در فوق مشخص گردید که در کلیه مخازن بررسی شده، سطح سیال درونی در وضعیت بحرانی قرار گرفته است. همچنین نتایج حاکی از آن است که مخزن شماره پنج با نسبت ارتفاع به قطر یک دچار واژگونی

جدول ۷- حداکثر میزان بلندشدگی کف و نشست نامتقارن بستر

شماره مخزن	حداکثر نشست (cm)	مقدار مجاز نشست (cm)	حداکثر بلندشدگی کف (cm)	مقدار مجاز بلندشدگی (cm)	وضعیت آسیب‌پذیری
۱	۰	۵	۱/۴	۳۰	OK
۲	۰	۵	۲/۴	۳۰	OK
۳	۱/۰	۵	۱۹	۳۰	OK
۴	۰/۳	۵	۶/۵	۳۰	OK
۵	۱/۰	۵	۲۴	۳۰	OK



## مراجع

۱. آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰-۸۴ ایران، ویرایش سوم، نشریه شماره ض-۲۵۳، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۸۴).
2. ASCE, "Guidelines For Seismic Evaluation And Design Of Petrochemical Facilities", Task Committee On Seismic Evaluation And Design Of Petrochemical Facilities, New York, USA, (1997).
3. EI-zeiny, A. A., "Factors Affecting the Nonlinear Seismic Response of unanchored Tank", 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seattle, July 16-18, (2003).
4. Koller, M., Malhotra, P., "Seismic Evaluation Of Unanchored Cylindrical Tanks", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, P.P. 2534, August 1-6, (2004).
5. API Standard 650, November 1998, "Welded steel Tanks for oil storage", American Petroleum Institut, Tenth Edition, Adendum 1, March (2000).

# The Evaluation Of Seismic Vulnerability And Retrofitting Steel Oil Tanks

Yaser Zaree<sup>1</sup>

## Abstract

Abstract: In this study, the seismic behavior of five oil storage tanks with height to diameter ratios of 0.39, 0.47, 0.53, 0.63, 1.0 was examined using the powerful software ANSYS and their failure mechanisms, including elephant leg buckling, diamond elastic buckling, failure of roof due to fluctuation of fluid, sliding, overturning, up lift and unsymmetrical tank leakage were assessed. several analyses, including static, modal, spectral (linear), and time history (nonlinear) analyses were done for studying the above parameter on the above-mentioned tanks, and the results were stated. Finally it was realized that if the tank freeboard considered as 0.18 H (H: the tank Height), no roof tank risk shall be present as regards fluctuation of fluid during an earthquake. Also, it was seen that tanks with a height to diameter ratio greater or equal to 1.0 would overturn under the loads applied and are unstable.

Other mechanisms studied were all less than the value allowed by the code. It is noteworthy that the tanks in question are located in Shiraz and the results are valid for unanchored, crude oil storage tanks.

**Key Words:** *Steel Oil Tanks, Seismic Damage, Elephant Leg Buckling, Diamond Buckling, Freeboard, Sloshing*

---

1- Faculty of Islamic Azad University, Abadeh Branch