



## بررسی مودهای شکست لرزه‌ای و راهکارهای مقاوم‌سازی مخازن استوانه‌ای فولادی مهار نشده در یک مجتمع نفتی

نقدعلی حسین‌زاده<sup>۱</sup>، امین معصومی گودرزی<sup>۲</sup>

### چکیده

مخازن استوانه‌ای فولادی روزمینی به طور گسترده در مجتمع‌های نفتی و از جمله انبارهای نفت ایران به کار برده می‌شوند. تجربه زلزله‌های گذشته در کشورهای مختلف نظیر ژاپن، ایالات متحده، ترکیه و غیره نشان می‌دهد که این گونه مخازن در مقابل حرکات نیرومند زمین در زلزله بسیار آسیب‌پذیر بوده و مطالعات آسیب‌پذیری و مقاوم‌سازی آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله رفتار لرزه‌ای ۵ مخزن فولادی روزمینی مهار نشده در یک مجتمع نفتی با نسبتهای ارتفاع به قطر (H/D) مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و انواع مودهای آسیب شامل کمانش پاقیلی، کمانش الماسی، آسیب دیدگی سقف در اثر نوسان سیال، لغزش، واژگونی، بلندشدگی کف و نشست نامتقارن با تحلیل غیرخطی بررسی شده است. در این مطالعات، علاوه بر ارزیابی ضوابط آیین‌نامه‌های معتبر از جمله API650 و ASCE، تحلیل‌های استاتیکی، مودال، طیفی (خطی) و تاریخچه زمانی (غیرخطی) نیز استفاده شده است. نتایج مطالعات موردی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد سیال داخل مخازن (Free Board) برابر ۱۳ درصد ارتفاع آنها، خطر آسیب‌دیدگی سقف از بین می‌رود. همچنین مخازن با نسبت ارتفاع به قطر بزرگتر و یا مساوی با یک ( $H/D \geq 1$ ) ناپایدار می‌باشند، سایر مودهای آسیب مذکور در مورد مخازن مورد مطالعه حاکم نمی‌باشند.

### کلمات کلیدی:

مخازن فولادی، آسیب‌پذیری، مقاوم‌سازی، کمانش پاقیلی، کمانش الماسی

## Evaluation of Seismic Failure Modes and Strengthening Methods of Unanchored Cylindrical Steel Liquid Tanks in an Oil Complex

Naghdali Hosseinzadeh, Amin Massoumi Goudarzi

### ABSTRACT

Cylindrical steel above ground tanks extensively used in oil refinery complexes and oil depots in Iran. Past earthquake experiences in Japan, U.S.A, and Turkey show that these tanks are very vulnerable to strong ground motions and the study of the vulnerability and strengthening of these tanks are very important. In this paper, 5 steel above ground tanks with different ratio of height to diameter (H/D) have been studied and different failure mechanisms including elephant foot buckling, diamond elastic buckling, failure of roof due to fluctuation of fluid, sliding, overturning, up lift and unsymmetrical settlement were assessed using nonlinear analyses. International documented references such as ASCE and API650 standards and static, modal, spectral (linear) and time history (nonlinear) analyses is used in this study. Results of the analytical study show that the minimum freeboard of tanks should be 13 percent of the tank Height to avoid of roof damage during an earthquake. In addition, tanks with a height to diameter ratio greater than 1.0 are unstable with the problem of overturning. Other failure mechanisms mentioned above are not dominant in the case studied tanks.

### Key words:

Steel Tanks, Vulnerability, Retrofitting, Elephant Foot Buckling, Diamond Buckling

۱. استادیار پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله hosseinz@iiees.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکزی amin\_massoumi@yahoo.com

اجرای آنها بر روی فونداسیون های صلب می باشد، زیرا نرمی فونداسیون سبب طولانی شدن پریود ارتعاشی مخازن در برابر نیروهای هیدرودینامیکی می گردد [۲].

در سال ۲۰۰۴ میلادی نیز مارتین کولر به همراه پراوین مالهوترا مقاله ای تحت عنوان «ارزیابی لرزه ای مخازن مهار نشده»، ارائه نمودند که در آن هفت مخزن با نسبت های ارتفاع به شعاع مختلف (H/R) تحت بررسی قرار گرفت. آنها چنین عنوان کردند که یک ارتباط تنگاتنگ بین نسبت (H/R) و بلند شدگی کف مخازن وجود دارد [۳].

مطالعات آسیب پذیری لرزه ای مخازن فولادی موجود در یک مجتمع پالایشگاهی در سال ۲۰۰۶ نشان داد که حدود ۴۰ درصد مخازن موجود بسیار آسیب پذیر بوده و نیازمند مقاوم سازی اساسی هستند [۴].

در این تحقیق، ۵ مخزن موجود در یک مجتمع پالایشگاهی با نسبت های ارتفاع به قطر مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر کنترل ضوابط آیین نامه ای تحلیل های استاتیکی، مودال، طیفی و تاریخچه زمانی غیرخطی برای هریک از مخازن صورت پذیرفته است.

## ۲- مودهای آسیب مخازن

آسیب های وارده به مخازن را می توان در قالب هفت معیار آسیب پذیری بیان نمود که به صورت مختصر عبارتند از:

### ۲-۱- واژگونی

وقتی نسبت ارتفاع به قطر زیاد می شود، پایداری مخزن در برابر این آسیب دیدگی کاهش می یابد. علت این پدیده بالا رفتن ارتفاع مرکز ثقل مخزن می باشد. این معیار با استفاده از ضوابط آیین نامه API650 و بر اساس نسبت  $M/[D^2(w_1+w_2)]$  کنترل می گردد. در این رابطه M لنگر واژگونی مخزن برحسب  $W_1(N.m)$  وزن محتویات مخزن در واحد طول محیط  $(N/m)$  و  $W_2$  وزن ورق جداره در واحد طول محیط مخزن برحسب  $(N/m)$  می باشند. در صورتی که این نسبت بیشتر از  $1/57$  باشد مخزن ناپایدار بوده و واژگون خواهد شد [۵].

یکی از انواع سازه های مهم که کاربرد فراوانی در پالایشگاه های نفتی دارد، مخازن فولادی روزمینی نفتی هستند که به شکل استوانه ای طراحی و اجرا می گردند. در واقع مخزن را وقتی روزمینی گویند که کف آن منگی بر بستر خاک یا پی باشد. یک مخزن فولادی از سه جزء اصلی تشکیل یافته است: بدنه، کف و سقف. کف مخزن ورق تختی می باشد که منگی بر بستر متراکم و یا شالوده گسترده بوده و سقف آن نیز بسته به نوع ماده ذخیره شده به صورت ثابت و یا متحرک ساخته می شود. مخازن روزمینی بسته به شرایط تکیه گاهی، به دو دسته تقسیم می شوند: مهار شده و مهار نشده. در یک مخزن مهار شده از حرکت قائم نسبی جداره در سطح پی جلوگیری شده است، در حالیکه یک مخزن مهار نشده در اثر تکان های شدید می تواند از روی زمین یا پی بلند شود و بنابراین برای تحلیل دقیق دینامیکی آن آنالیز غیرخطی لازم است.

رفتار دینامیکی مخازن اولین بار توسط هاوژنر مدل سازی شد و مبنای طراحی آیین نامه ها قرار گرفت. وی چنین عنوان کرد که در یک مخزن دارای سطح آزاد که در معرض شتاب دینامیکی افقی قرار دارد، سیال از دو طریق بر روی جداره اثر می گذارد: (۱) فشار نوسانی (۲) فشار ضربانی. فشار نوسانی در اثر حرکت سیال موج در بالای مخزن پدید می آید و فشار ضربانی در اثر حرکت قسمتی از سیال در پایین مخزن و هماهنگی با پوسته ایجاد می گردد. فرکانس حرکت نوسانی به میزان قابل توجهی پایین تر از فرکانس حرکت ضربانی است بدین معنی که این مود در پریودهای بالای زلزله تحریک می گردد [۱].

در سال ۲۰۰۳ میلادی علی الزینی استاد و محقق دانشگاه کالیفرنیا مقاله ای تحت عنوان «بررسی پارامترهای مؤثر در پاسخ لرزه ای غیر خطی مخازن مهار نشده» ارائه کرد. وی در این تحقیق اثرات فشار هیدرودینامیکی سیال را بر روی جداره مخازن مهار نشده در طول ارتعاشات ناشی از زلزله مورد بررسی قرار داد. وی همچنین نتیجه گرفت که احداث مخازن بر روی فونداسیون های انعطاف پذیر مناسب تر از

از فرکانس جداره رخ می‌دهد. دامنه ارتعاش سیال متأثر از ارتعاش جداره نیست بلکه عموماً به محتوای فرکانسی زلزله بستگی دارد. بنابراین، اگر پیش‌بینی‌های لازم صورت نگیرد ممکن است پوشش سقف مخزن صدمه دیده و یا محتویات درونی آن به بیرون پاشیده شود عامل کنترل کننده در این حالت ارتفاع موج سیال می‌باشد. [۱].

#### ۲-۶- بلندشدگی کف

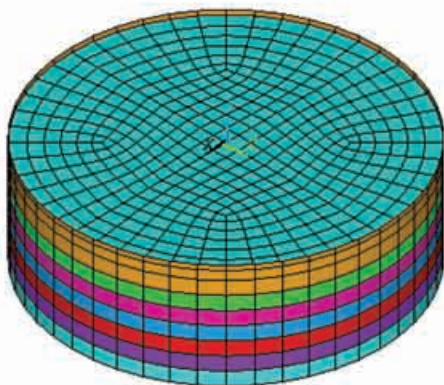
بلند شدگی کف مخازن مهار نشده یکی از مدهای آسیب در زلزله‌های گذشته محسوب می‌شود. در صورتی که مقدار این بلند شدگی از مقدار مجاز آن (۳۰ سانتیمتر) بیشتر شود، ممکن است منجر به پارگی جداره مخزن و یا شکستگی لوله‌های متصل به آن گردد [۱].

#### ۲-۷- نشست نامتقارن بستر

تنشهای ناشی از لنگر واژگونی و ضربه‌های ناشی از بلند شدگی کف مخزن در هنگام زلزله موجب نشست نامتقارن در تراز پایه می‌گردد. در نتیجه امکان آسیب دیدگی و خسارت مخزن وجود دارد. حداکثر نشست نامتقارن بستر طبق دستورالعمل‌های موجود به ۵ سانتیمتر محدود شده است [۱].

#### ۳- مدل‌سازی و تحلیل مخازن

مشخصات هندسی مخازن مورد بررسی به اختصار در جدول (۱) بیان شده است. همچنین مدل سه‌بعدی یکی از مخازن به همراه چگونگی مش‌بندی آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): مدل سه‌بعدی مخزن در ANSYS

#### ۲-۲- کماتش الماسی جداره

تنش‌های فشاری ایجاد شده در جداره مخازن سبب بروز کماتش در قسمتهای میانی آن می‌گردد که کماتش الماسی (کوماتش الاستیک) نام دارد. مخازن با ارتفاع زیاد معمولاً دچار چنین آسیبی می‌شوند. این آسیب با محدود کردن تنش فشاری ایجاد شده در جداره مخزن و مقایسه آن با تنش مجاز جداره مطابق با ضوابط آیین‌نامه API 650 کنترل می‌گردد [۵].

#### ۲-۳- کماتش پافیلی جداره

کوماتش پافیلی (کوماتش الاستوپلاستیک) معمولاً در مخازن بزرگ و در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری از کف مخزن رخ می‌دهد. علت ایجاد چنین کماتشی آن است که در هنگام بلندشدن قسمتی از کف مخزن تحت اثر نیروهای جانبی زلزله، در طرف مقابل آن تنش فشاری قائم به شدت جلوگیری از افزایش می‌یابد. در این حالت ترکیب دو تنش کششی حلقوی و فشاری قائم باعث ایجاد این کماتش در جداره می‌گردد. بدین ترتیب جلوگیری از افزایش بیش از حد تنش کششی حلقوی در جداره مخزن معیاری برای کنترل کماتش پافیلی محسوب می‌شود [۵].

#### ۲-۴- لغزش مخزن

نیروهای برشی ناشی از زلزله در تراز کف مخزن ممکن است بر نیروی اصطکاک غلبه کرده و باعث لغزش مخزن گردد. برای کنترل مخزن در برابر لغزش، برش پایه به عنوان نیروی محرک و نیروی اصطکاک کف مخزن با بستر به عنوان نیروی مقاوم در نظر گرفته می‌شود. بر اساس پیشنهاد دستورالعمل ASCE برای تأسیسات موجود، حداقل ضریب اطمینان لازم در مقابل لغزش برابر ۱/۵ می‌باشد. برای محاسبه نیروی مقاوم در برابر لغزش، ضریب اصطکاک بین کف مخزن و پی برابر ۰/۴ پیشنهاد شده است [۱].

#### ۲-۵- آسیب دیدگی سقف

نیروی ارتعاشی ناشی از زلزله باعث ارتعاش مخزن و سیال درون آن می‌گردد. ارتعاش سیال با فرکانس خیلی پایین تر

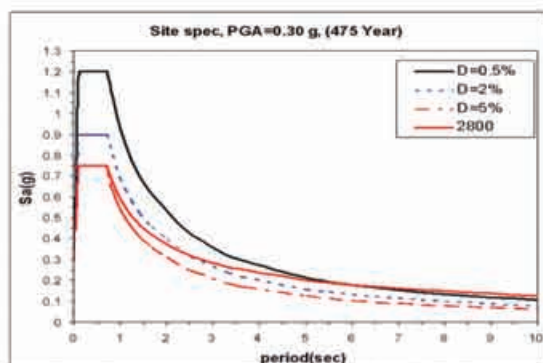
جدول (۱): مشخصات مخازن بررسی شده

شماره مخزن	ارتفاع H (m)	قطر D (m)	چگالی سیال (t/m <sup>3</sup> )	تنش تسلیم فولاد (kg/cm <sup>2</sup> )	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	۲۴/۳۸	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

رفتار دینامیکی مخزن مفید باشد. مودهای نوسانی و ضربانی از جمله مهمترین مودهای ارتعاشی محسوب می‌شوند که حداکثر جرم موثر را به خود اختصاص می‌دهند و در تحلیل‌های دینامیکی حائز اهمیت هستند.

### ۳-۳- تحلیل طیفی

پس از انجام تحلیل مودال و تعیین مودهای اصلی مخزن تحلیل طیفی انجام گرفته است. در این تحلیل برای ترکیب مودها از روش جذر مجموع مربعات (CQC) استفاده شده است. طیف طرح ویژه ساختگاه به صورت سه مولفه‌ای با نسبت‌های ۳۰، ۱۰۰ و ۳۰ استفاده شده است. نوع خاک محل تیب III مطابق استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران می‌باشد [۶]. مطابق دستورالعمل ASCE برای ارزیابی لرزه‌ای تأسیسات نفتی از طیف طرح ویژه ساختگاه با احتمال گذر ۱۰ درصد در ۵۰ سال ( دوره بازگشت ۴۷۵ سال ) استفاده گردیده که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود.



شکل (۲): طیف طرح ساختگاه برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال با میرایی ۰/۵، ۲ و ۵ درصد و مقایسه با طیف استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران

برای مدل‌سازی رفتار دقیق مخازن به هنگام تحریک زلزله، هم جداره فولادی و هم سیال درون مخزن به کمک نرم افزار Ansys مدل‌سازی شده‌اند. برای مدل کردن جداره از المان Shell63 استفاده شده است. این المان یک المان خمشی - غشایی است که قابلیت تحلیل نیروهای درون صفحه و عمود بر صفحه را دارا می‌باشد. به‌علاوه، این المان قابلیت سخت‌شدگی کرنش و تغییر مکان‌های بزرگ را دارا می‌باشد. برای مدل‌سازی سیال از المان Fluid80 استفاده شده است. این المان برای مدل کردن سیال بدون جریان مناسب است و برای محاسبه فشار هیدرواستاتیک و اندرکنش سیال و سازه کاربرد دارد. همچنین برای مدل کردن بلند شدگی کف مخزن از المان Gap (Link10) استفاده شده است. این المان یک فنر فشاری است که سختی آن در هنگام کشش صفر می‌گردد.

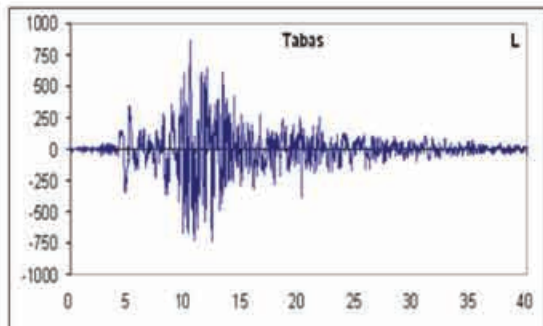
### ۳-۱- تحلیل استاتیکی

به عنوان اولین گام در تحلیل کمی، مخازن تحت اثر وزن جداره و فشار هیدرواستاتیک سیال تحلیل شده‌اند. نتایج این تحلیل بیانگر تنش‌های کششی حلقوی ایجاد شده در جداره مخزن تحت اثر فشار هیدرواستاتیک می‌باشد. همچنین، نتایج این تحلیل در ترکیبات بارگذاری مربوط به بارهای ثقلی و زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳-۲- تحلیل مودال

مشخصات ارتعاشی یک مخزن شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی از جمله پارامترهای مهم در تحلیل دینامیکی آن محسوب می‌شود که با تحلیل مودال حاصل می‌شود. تعیین و بررسی این پارامترها می‌تواند در تفسیر

برای تحلیل تاریخچه زمانی بکار می‌رود. در این مطالعات از رکوردهای زلزله‌های گلبافت، طیس و السترو که بیشترین تطابق را با شرایط ساختگاه داشته‌اند استفاده شده است. این رکوردها به صورت سه مؤلفه‌ای در جهات متعامد بانسبتهای ۱۰۰، ۳۰ و ۳۰ درصد به مخازن اعمال گردیده‌اند [۶]. نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله طیس به عنوان نمونه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): رکورد شتاب طولی زلزله طیس

#### ۴- کنترل معیارهای آسیب‌پذیری مورد بررسی

با بهره‌گیری از نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی هر یک از مخازن مورد نظر، معیارهای آسیب‌پذیری مربوطه کنترل گردیده است که در ادامه بررسی می‌شوند.

#### ۴-۱- کنترل واژگونی

با بهره‌گیری از ضوابط آیین‌نامه ASCE، نسبت  $M/[D^2(w_1+w_2)]$  برای کلیه مخازن مورد نظر محاسبه گردیده و نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود فقط مخزن شماره ۵ از نظر واژگونی مشکل دارد.

تغییرات میزان واژگونی مخازن بر حسب نسبت ارتفاع به قطر (H/D) در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییرات مربوطه غیر خطی است که با یک رابطه خطی تقریب زده شده است. روند تغییرات به گونه‌ای است که با افزایش نسبت (H/D) میزان واژگونی افزایش می‌یابد.

همچنین بر اساس ضمیمه E آیین‌نامه API650 میرایی ۲ درصد برای مود ضربانی و میرایی ۵/۰ درصد برای مود نوسانی مخزن در نظر گرفته شده است [۵].

#### ۳-۴- تحلیل تاریخچه زمانی

با آنالیز تاریخچه زمانی می‌توان کلیه عوامل غیر خطی را در آنالیز وارد کرد. هدف از تحلیل دینامیکی حل معادلات حرکت حاکمه طبق رابطه (۱) تحت اثر نیروهای زلزله می‌باشد.

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

که در آن  $[M]$ ،  $[C]$  و  $[K]$  به ترتیب ماتریسهای جرم، میرایی و سختی و  $\{U\}$ ،  $\{\dot{U}\}$  و  $\{\ddot{U}\}$  به ترتیب شتاب، سرعت و جابجایی سیستم می‌باشند.  $\ddot{u}_g(t)$  نیز بیانگر شتاب زمین است. این روابط به صورت غیر خطی تحلیل می‌شوند و برای برآورد میزان بلندشدگی کف مخزن و مقادیر دقیق پاسخ‌های سازه از این نوع تحلیل استفاده شده است. میرایی سیستم دینامیکی به صورت میرایی رایلی در نظر گرفته شده است که طبق رابطه (۲) تابع خطی از جرم و سختی است.

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

که در آن  $[CF_i]$  ماتریس میرایی المان  $i$  ام سیال و اسکوز و  $m$  تعداد المان‌های سیال می‌باشد. ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  از رابطه (۳) حاصل می‌شوند.

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

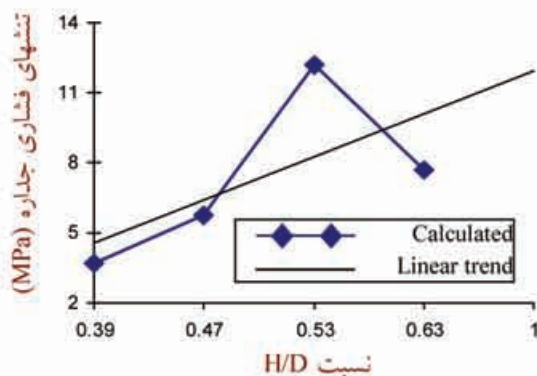
در رابطه فوق  $\omega_i$  و  $\omega_j$  فرکانس‌های دو مود اصلی مخزن و  $\xi_i$  و  $\xi_j$  میرایی‌های مربوط به آنها می‌باشند. ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$

جدول (۳): تنش‌های فشاری جداره و کنترل کمانش الماسی

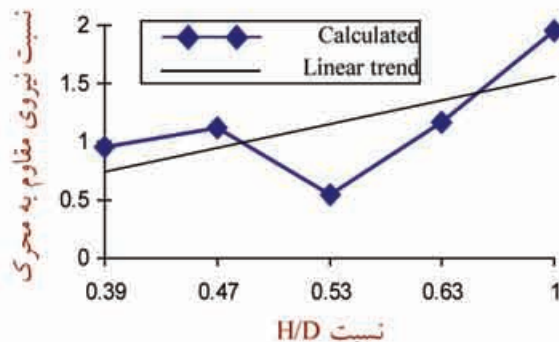
شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار بدست آمده (MPa)	مقدار مجاز (MPa)	وضعیت آسیب‌پذیری
۱	تنش فشاری	۳/۶۹	۲۴/۸۶	مناسب
۲	تنش فشاری	۵/۷۳	۳۷/۳۶	مناسب
۳	تنش فشاری	۱۲/۱۶	۳۲/۳۴	مناسب
۴	تنش فشاری	۷/۶۹	۳۹/۳۹	مناسب
۵	تنش فشاری	-	-	-

جدول (۲): نتایج کنترل واژگونی در مخازن مورد نظر

شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار بدست آمده	مقدار مجاز	وضعیت آسیب‌پذیری
۱	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۰/۹۶۱	۱/۵۷	مناسب
۲	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۱/۱۲۰	۱/۵۷	مناسب
۳	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۰/۵۵۰	۱/۵۷	مناسب
۴	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۱/۱۷۰	۱/۵۷	مناسب
۵	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۱/۹۶۰	۱/۵۷	نامناسب



شکل (۵): تنشهای فشاری جداره بر حسب نسبت H/D



شکل (۴): تغییرات واژگونی مخازن بر حسب نسبت H/D

#### ۴-۳- کنترل کمانش الاستوپلاستیک پافیلی

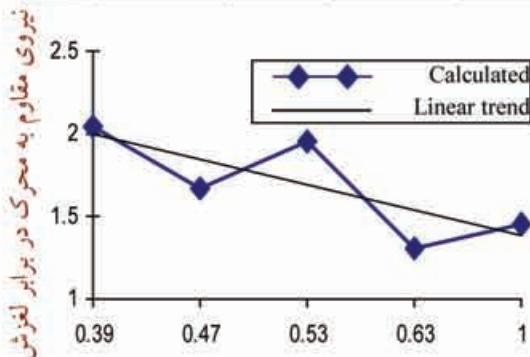
برای کنترل این پدیده، تنش‌های کششی حلقوی در جداره مخازن تحت اثر آنالیزهای مختلف کنترل شده و نتایج بدست آمده در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آنست که مقدار این تنش در تحلیل طیفی بیشتر از مقادیر بدست آمده از سایر تحلیل‌ها می‌باشد. تغییرات این تنش‌ها برحسب نسبت H/D در شکل (۶) نشان داده شده است. طبق دستورالعمل ASCE ظرفیت مجاز تنشهای کششی در جداره مخازن برابر با  $F_a = 1.6(0.6F_y)$  می‌باشد که  $F_y$  تنش حد جاری شدن فولاد مصرفی است و در مخازن مورد بررسی برابر با ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود مساله کمانش پافیلی در مورد هیچ یک از مخازن مورد نظر مطرح نیست.

#### ۴-۲- 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 بدست آورد. این نیرو با توجه به ضوابط آیین‌نامه API650 محاسبه شده و سپس تنش فشاری جداره مخزن  $(b/1000t)$  با تنش مجاز مربوطه مقایسه شده است (t ضخامت ورق جداره به میلی‌متر است). نتایج بدست آمده از این محاسبات در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین تغییرات تنش فشاری جداره بر حسب نسبت H/D در شکل (۵) نشان داده شده است. طبق ضوابط آیین‌نامه API650 کنترل کمانش الاستیک الماسی تنها در مورد مخازنی صورت می‌گیرد که پایدار بوده و مشکل واژگونی نداشته باشد. در واقع روابط موجود در این آیین‌نامه برای کنترل کمانش الماسی تنها در مورد مخازن پایدار معتبر می‌باشد. بنابراین کنترل این پارامتر در مورد مخزن شماره پنج امکان‌پذیر نیست [۵].

جدول (۵): نتایج کنترل لغزش در مخازن

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



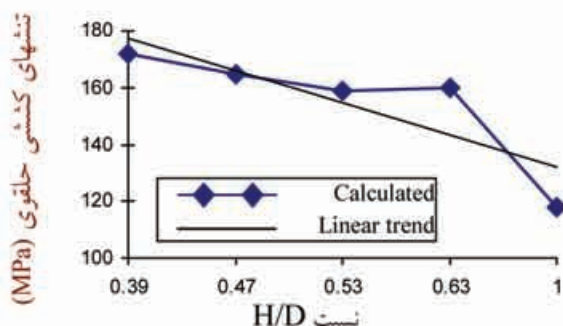
شکل (۷): تغییرات میزان لغزش بر حسب نسبت H/D

#### ۴-۵- کنترل نوسانات سیال (Sloshing) و آسیب سقف

ارتعاش مخزن و سیال درون آن در اثر لرزشهای ناشی از زلزله سبب پدیدار شدن امواجی در سطح سیال درون آن می شود. اگر پیش بینی های لازم در این مورد به عمل نیاید، این امواج سبب وارد آمدن آسیب هایی به سقف مخازن می گردد. حداکثر ارتفاع امواج ایجاد شده در سطح سیال مخزن شماره دو به عنوان نمونه در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج حاصل از دامنه نوسان سیال در مخازن مورد نظر حاصل از تحلیل های دینامیکی در جدول (۶) و منحنی تغییرات آن در شکل (۹) ارائه گردیده است. همان طور که ملاحظه می شود، ارتفاع آزاد موجود (Free Board) در مخازن کافی نبوده و لذا آسیب پذیر هستند. یک راه حل برای جلوگیری از آسیب دیدگی سقف مخازن افزایش ارتفاع آزاد و راه حل دوم تقویت سقف مخازن می باشد. بر اساس API650 ارتفاع آزاد مورد نیاز معادل ۷۰ درصد ارتفاع موج می باشد.

جدول (۴): تنش های کششی حلقوی و کنترل کمانش پاییلی

شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار بدست آمده (Mpa)	مقدار مجاز (Mpa)	وضعیت آسیب پذیری
۱	تنش کششی	۱۷۲	۲۲۶	مناسب
۲	تنش کششی	۱۶۵	۲۲۶	مناسب
۳	تنش کششی	۱۵۹	۲۲۶	مناسب
۴	تنش کششی	۱۶۰	۲۲۶	مناسب
۵	تنش کششی	۱۱۸	۲۲۶	مناسب



شکل (۶): تنشهای کششی جداره بر حسب نسبت H/D

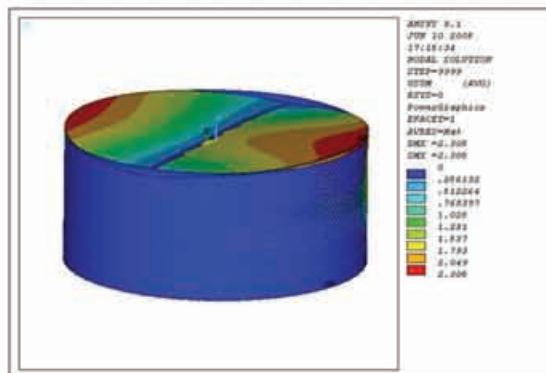
#### ۴-۴- کنترل لغزش

به منظور کنترل لغزش مخازن، حداکثر برش پایه به دست آمده برای هر مخزن به عنوان نیروی محرک (V) با استفاده از نتایج تحلیل طیفی و تاریخچه زمانی استخراج شده است. نیروی مقاوم در برابر لغزش توسط وزن سازه و اصطکاک بین کف و بستر مخزن به دست می آید. مطابق آیین نامه ASCE ضریب اطمینان در برابر لغزش مخازن 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 برای کنترل لغزش مخازن رابطه (۴) بررسی شده است [۱].

$$0.4W \geq 1.5V \quad (4)$$

که در این رابطه W وزن مخزن و سیال درون آن می باشد. نتایج حاصل از کنترل لغزش مخازن مورد بررسی در جدول (۵) و منحنی تغییرات میزان آن بر حسب نسبت H/D در شکل (۷) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود مساله لغزش در مخازن مورد نظر وجود ندارد.

کف مخزن تحت رکوردهای فوق بررسی و حداکثر مقادیر آنها استخراج شده است. نتایج تحلیل در جدول (۷) آمده است. همچنین نتایج نشست نامتقارن بستر در شکل (۱۰) و نتایج بلندشدگی کف مخزن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود میزان بلند شدگی کف و همچنین میزان نشست بستر در تمام مخازن در محدوده مجاز قرار دارد ولی با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H/D) این مقادیر افزایش می یابند.



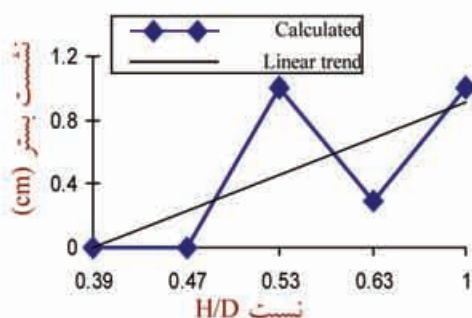
شکل (۸): حداکثر ارتفاع سیال در مخزن شماره ۲ (m)

جدول (۷): مقادیر نشست نامتقارن و بلند شدگی کف مخازن

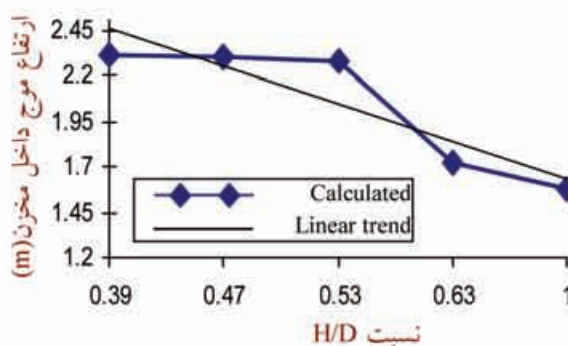
شماره مخزن	میزان نشست (cm)	حد مجاز (cm)	میزان بلندشدگی (cm)	حد مجاز (cm)	وضعیت آسیب پذیری
۱	۰	۵	۱/۴	۳۰	مناسب
۲	۰	۵	۲/۴	۳۰	مناسب
۳	۱/۰	۵	۱۹/۰	۳۰	مناسب
۴	۰/۳	۵	۶/۵	۳۰	مناسب
۵	۱/۰	۵	۲۴/۰	۳۰	مناسب

جدول (۶): حداکثر دامنه نوسان سیال مخازن در اثر زلزله

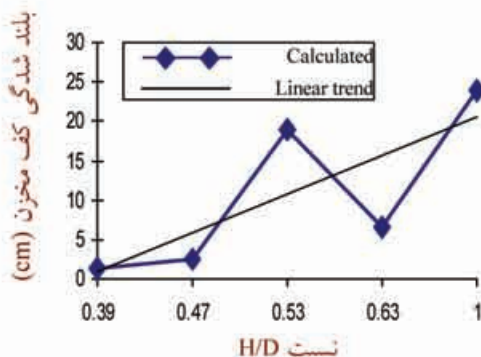
شماره مخزن	ارتفاع موج (m)	ارتفاع آزاد موجود (m)	ارتفاع آزاد مورد نیاز (m)	وضعیت آسیب پذیری
۱	۲/۳۱۵	۰/۶۴	۱/۶۲	نامناسب
۲	۲/۳۰۵	۰/۶۴	۱/۶۱	نامناسب
۳	۲/۲۷۹	۰/۵۵	۱/۶۰	نامناسب
۴	۱/۷۲۰	۰/۵۵	۱/۲۰	نامناسب
۵	۱/۵۸۰	۰/۶۴	۱/۱۱	نامناسب



شکل (۱۰): میزان نشست مخازن بر حسب نسبت H/D



شکل (۹): دامنه نوسانات سیال مخازن بر حسب نسبت H/D



شکل (۱۱): میزان بلندشدگی مخازن بر حسب نسبت H/D

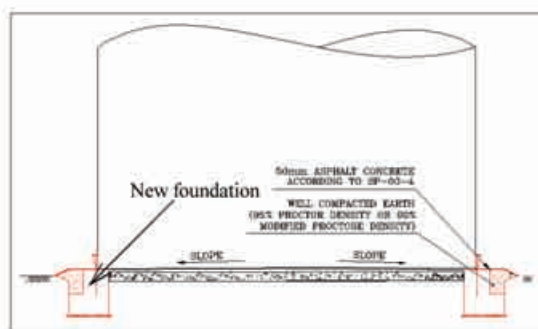
#### ۴-۶- کنترل بلندشدگی و نشست نامتقارن بستر

پدیده بلند شدگی و نشست نامتقارن مخازن یک پدیده غیرخطی هندسی می باشد. لذا برای بررسی میزان بلندشدگی کف و نشست ناشی از ضربه این بلندشدگی ها، آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی بر روی مخازن صورت گرفته است. رکورد زلزله های طبرس، گلبافت و السترو که با شرایط ساختگاهی سازگاری بیشتری دارند، انتخاب شده اند. پس از آنالیز تاریخیچه زمانی، تغییر مکان قائم گره های



مهارهای لازم در فواصل مساوی طوری طراحی می‌شوند که تحمل تنشها و نیروهای کششی ناشی از لنگر واژگونی را داشته باشند. باید توجه نمود که بر طبق ضوابط آیین‌نامه API650، فاصله میل مهارها نباید بیشتر از ۳ متر در نظر گرفته شود. همچنین قطر مهارها نباید کمتر از ۲۵ میلیمتر باشد [۵].

تحلیل مجدد مخزن پس از مقاوم‌سازی نشان می‌دهد که تنشهای کششی جداره برابر با ۱۲/۳۴ مگاپاسکال می‌باشد که کمتر از مقدار مجاز (۴۳/۵۸ مگاپاسکال) بوده و لذا قابل قبول می‌باشد.



شکل (۱۲): نمایی از رینگ بتنی برای مقاوم‌سازی مخزن شماره ۵

#### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ۵ مخزن فولادی استوانه‌ای روزمینی موجود در یک مجتمع نفتی مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار گرفته است. مخازن مورد بررسی در یک ناحیه لرزه‌خیز قرار دارند که حداکثر شتاب زلزله طرح ساختگاه معادل 0.3g بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران می‌باشد. مهمترین یافته‌های حاصل از مطالعات تحلیلی و ارزیابی ضوابط آیین‌نامه‌ای به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- به منظور جلوگیری از پدیده واژگونی مخازن مهار نشده، بایستی نسبت ارتفاع به قطر (H/D) آنها از ۰/۷ کمتر باشد. این نسبت در آیین‌نامه‌های موجود به ۰/۶ محدود شده است.
- ۲- با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H/D)، خطر کماتش الاستیک الماسی در جداره نیز افزایش می‌یابد.

#### ۵- راهکارهای مقاوم‌سازی

با توجه به محدودیت‌های موجود در شناخت میزان دقیق خطر لرزه‌ای یک ساختگاه برای طراحی یا مقاوم‌سازی، و کاستی‌های موجود در مدل‌سازی‌های تحلیلی نتایج قطعی قابل ارائه نمی‌باشد، بنابراین همواره پذیرش سطوحی از خطر اجتناب ناپذیر است. در نتیجه، افزودن حاشیه اطمینان و تامین ضوابط طراحی و مقاوم‌سازی و همچنین بررسی جزئیات با دقت بیشتر می‌تواند به عملکرد مطمئن و رفتار مناسب مخازن تحت زلزله‌های محتمل در آینده منجر شود. لذا هدف اصلی در یک پروژه طراحی و یا مقاوم‌سازی، کاهش خطر و حداقل نمودن آن با در نظر گرفتن امکانات و منابع موجود می‌باشد.

در تمام مخازن بررسی شده، سطح سیال درونی در وضعیت بحرانی قرار گرفته است. بدین ترتیب در ادامه راهکارهایی برای مقاوم‌سازی این مخازن ارائه گردیده است.

به منظور جلوگیری از آسیب‌های وارده به سقف در اثر پدیده نوسان سیال (Sloshing) که در تمام مخازن مورد بررسی به وجود می‌آید، کاهش ارتفاع سیال درون مخازن تا سطوح بیان شده در جدول (۶) کم‌هزینه‌ترین راه حل محسوب می‌شود. در این صورت لازم است میزان ارتفاع آزاد (Free Board) حداقل معادل ۱۳ در صد ارتفاع کل هر مخزن در نظر گرفته شود. در صورتی که به دلایل خاصی کاهش ارتفاع سیال امکان پذیر نباشد، لازم است با افزودن رینگ فولادی در بالای مخزن، تقویت کنج در مقابل ضربات ناشی از نیروی سیال، مقاوم‌سازی لازم به عمل آید.

نتایج حاکی از آن است که مخزن شماره ۵ با نسبت ارتفاع به قطر مساوی یک دچار واژگونی شده و ناپایدار می‌باشد. در مورد این مخزن پس از بررسی راه‌حل‌های پیشنهادی آیین‌نامه API650، راه حل افزودن یک رینگ بتنی مسلح در پیرامون مخزن (زیر ورق پوسته) و مهار نمودن جداره مخزن به این رینگ بتنی انتخاب شده است. نمایی از طرح پیشنهادی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. میل

مراجع

- 1- ASCE.; "Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities", American Society of Civil Engineers, 1997.
- 2- El-zeiny, A.A. "Factors Affecting the Nonlinear Seismic Response of unanchored Tank", 16<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seattle, July 16-18, 2003.
- 3- KOLLER, M.; MALHOTRA, P.; "Seismic Evaluation of Unanchored Cylindrical Tanks", 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, P.P. 2534, August 1-6, 2004.
- 4- N.A. Hosseinzadeh, Ali Valaee, "Seismic vulnerability analyses of cylindrical Steel above ground Tanks in an oil refinery complex" First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (1<sup>st</sup> ECEES), Geneva, Switzerland, 2006;
- 5- API STANDARD 650; "Welded steel Tanks for oil storage" American Petroleum Institute, Tenth Edition, November 1998, Adendum 1, March 2000.
- 6- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، «آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله- استاندارد ۸۴-۲۸۰۰ ایران»، نشریه شماره ض-۲۵۳، ویرایش سوم، ۱۳۸۴.

- ۳- با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H/D)، میزان کماتش الاستوپلاستیک کاهش می یابد. همچنین، در مخازن با قطر بزرگتر، خطر کماتش الاستوپلاستیک پافیلی بیشتر است.
- ۴- در مخازن مورد مطالعه پدیده لغزش بستر اتفاق نمی افتد. تجربه زلزله های گذشته نشان می دهد که تاکنون در مخازن با قطر بزرگتر از ۹ متر لغزش قابل ملاحظه ای دیده نشده است.
- ۵- با افزایش قطر مخازن دامنه نوسان سیال داخل آنها (Sloshing) نیز افزایش می یابد، لیکن با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H/D)، این دامنه کاهش می یابد. ارتفاع آزاد سیال حداقل بایستی ۱۳ درصد ارتفاع کل مخزن باشد تا از آسیب دیدگی سقف جلوگیری شود.
- ۶- با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H/D)، میزان بلندشدگی کف و همین طور میزان نشست کف نیز افزایش می یابد. در مخازن بررسی شده که نسبت های ارتفاع به قطر کوچکتر از یک بوده است ( $H/D \leq 1$ ) میزان بلندشدگی و نشست بستر کمتر از مقادیر مجاز آیین نامه ای می باشد.