



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

نقدعلی حسین‌زاده^۱، امین معصومی گودرزی^۲

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 موده‌های آسیب شامل کمانش پافیلی، 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 موده‌های آسیب مذکور در مورد مخازن مورد مطالعه حاکم نمی‌باشند.

کلمات کلیدی:

مخازن فولادی، آسیب‌پذیری، مقاوم‌سازی، کمانش پافیلی، 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

یکی از انواع سازه‌های مهم که کاربرد فراوانی در پالایشگاه‌های نفتی دارد، مخازن فولادی روزمینی نفتی هستند که به شکل استوانه‌ای طراحی و اجرا می‌گردند. در واقع مخزن را وقتی روزمینی گویند که کف آن متکی بر بستر خاک یا پی 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 به صورت ثابت و یا متحرک ساخته می‌شود. 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 حالیکه یک مخزن مهار نشده در اثر تکان‌های شدید می‌تواند از روی زمین یا پی بلند شود و بنابراین برای تحلیل دقیق دینامیکی آن آنالیز غیرخطی لازم است.

رفتار دینامیکی مخازن اولین بار توسط هاووزنر مدل‌سازی شد و مبنای طراحی آیین‌نامه‌ها 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 می‌گذارد: (۱) فشار نوسانی (۲) فشار ضربانی. فشار نوسانی در اثر حرکت سیال موج در بالای مخزن پدید می‌آید و فشار ضربانی در اثر حرکت قسمتی از سیال در پایین مخزن و هماهنگ با پوسته ایجاد می‌گردد. فرکانس حرکت نوسانی به میزان قابل توجهی پایین‌تر از فرکانس حرکت ضربانی است بدین معنی که این مود در پروده‌های بالای زلزله تحریک می‌گردد [۱].

در سال ۲۰۰۳ میلادی علی الزینی استاد و محقق دانشگاه کالیفرنیا مقاله‌ای تحت عنوان «بررسی پارامترهای 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. وی همچنین نتیجه گرفت که احداث مخازن بر روی فونداسیون‌های انعطاف‌پذیر مناسب‌تر از

اجرای آنها بر روی فونداسیون‌های صلب می‌باشد، زیرا نرمی فونداسیون سبب طولانی شدن پریود ارتعاشی مخازن در برابر نیروهای هیدرو دینامیکی می‌گردد [۲].

در سال ۲۰۰۴ میلادی نیز مارتین کولر به همراه پراوین مالهوترا مقاله‌ای تحت عنوان «ارزیابی لرزه‌ای مخازن مهار نشده»، ارائه نمودند که در آن هفت مخزن با نسبت‌های 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 آسیب‌پذیری لرزه‌ای 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 نسبت‌های ارتفاع به قطر مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر کنترل ضوابط آیین‌نامه‌ای تحلیل‌های استاتیکی، مودال، طیفی و تاریخیچه زمانی غیرخطی برای هر یک از مخازن صورت پذیرفته است.

۲- مودهای آسیب مخازن

آسیب‌های وارده به مخازن را می‌توان در قالب هفت معیار آسیب‌پذیری بیان نمود که به صورت مختصر عبارتند از:

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 آیین‌نامه API650 و بر اساس نسبت $M/[D^2(w_L+w_t)]$ کنترل می‌گردد. در این رابطه M لنگر واژگونی مخزن برحسب $W_L(N.m)$ و وزن محتویات مخزن در واحد طول محیط (N/m) و W_t وزن ورق جداره در واحد طول محیط مخزن برحسب (N/m) می‌باشند. در صورتی که این نسبت بیشتر از $1/57$ باشد مخزن ناپایدار بوده و واژگون خواهد شد [۵].

۲-۲- کمانش الماسی جداره

تنش‌های فشاری ایجاد شده در جداره مخازن سبب بروز کمانش در قسمتهای میانی آن می‌گردد که کمانش الماسی (کمانش الاستیک) نام دارد. مخازن با ارتفاع زیاد معمولا 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- کمانش پافیلی جداره

کمانش پافیلی (کمانش الاستوپلاستیک) معمولا در مخازن بزرگ و در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری از کف مخزن رخ می‌دهد. علت ایجاد چنین کمانشی 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 کمانش در جداره می‌گردد. بدین ترتیب جلوگیری از افزایش بیش از حد تنش کششی حلقوی در جداره مخزن معیاری برای کنترل کمانش 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

از فرکانس جداره رخ می‌دهد. دامنه ارتعاش سیال متأثر از ارتعاش جداره نیست بلکه عموما 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

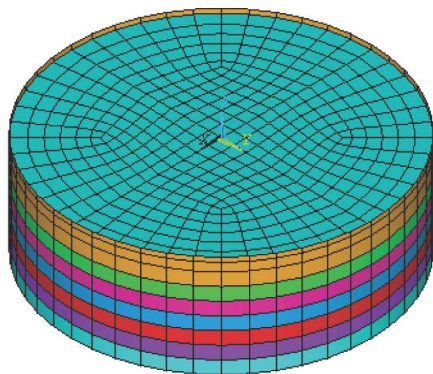
بلند شدگی کف مخازن مهار نشده یکی از مدهای آسیب در زلزله‌های گذشته محسوب می‌شود. در صورتی که مقدار این بلند شدگی از مقدار مجاز آن (۳۰ سانتیمتر) بیشتر شود، ممکن است منجر به پارگی جداره مخزن و یا شکستگی لوله‌های متصل به آن گردد [۱].

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

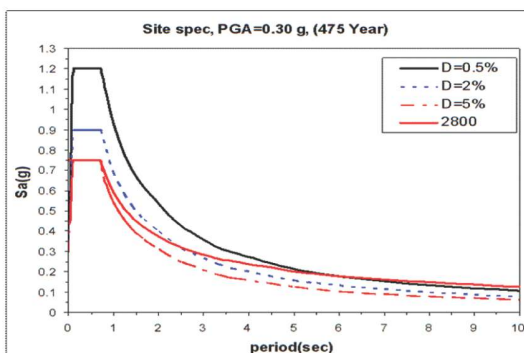
جدول (۱): مشخصات مخازن بررسی شده

شماره مخزن	ارتفاع H (m)	قطر D (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	۲۴/۳۸	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 ازجمله 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 - غشائی است که قابلیت تحلیل نیروهای درون صفحه و عمود بر صفحه را دارا می‌باشد. به علاوه، 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

همچنین بر اساس ضمیمه E آیین نامه 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 می توان کلیه عوامل غیر خطی را در آنالیز وارد کرد. هدف از تحلیل دینامیکی حل معادلات حرکت حاکمه طبق رابطه (۱) تحت اثر نیروهای زلزله می باشد.

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

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 می باشند. $\ddot{u}_g(t)$ نیز بیانگر شتاب زمین است. این روابط به صورت غیر خطی تحلیل می شوند و برای برآورد میزان بلندشدگی کف مخزن و مقادیر دقیق پاسخ های 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.

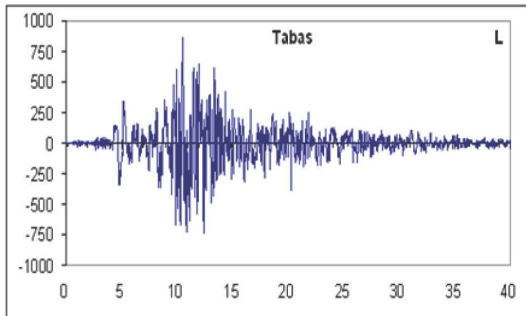
$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] + \sum_{i=1}^m [CF_i] \quad (2)$$

که در آن $[CF_i]$ ماتریس میرایی المان i ام سیال و اسکوز و m تعداد المان های سیال می باشد. ضرایب α و β از رابطه (۳) حاصل می شوند.

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

در رابطه فوق ω_i و ω_j فرکانس های دو مود اصلی مخزن و ξ_j و ξ_i میرایی های مربوط به آنها می باشند. ضرایب α و β

برای تحلیل تاریخچه زمانی بکار می رود. در این مطالعات از رکوردهای زلزله های گلبافت، طبس و السنترو که بیشترین تطابق را با شرایط ساختگاه داشته اند استفاده شده است. این رکوردها به صورت سه مؤلفه ای در جهات متعامد بانسبتهای ۱۰۰، ۳۰ و ۳۰ درصد به مخازن اعمال گردیده اند [۶]. نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله طبس به عنوان نمونه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): رکورد شتاب طولی زلزله طبس

۴- کنترل معیارهای آسیب پذیری مورد بررسی

با بهره گیری از نتایج تحلیل های دینامیکی غیرخطی هر یک از مخازن مورد نظر، معیارهای آسیب پذیری مربوطه کنترل گردیده است که در ادامه بررسی می شوند.

۴-۱- کنترل واژگونی

با بهره گیری از ضوابط آیین نامه ASCE، نسبت $M/[D^2(w_L + w_i)]$ برای کلیه مخازن مورد نظر محاسبه گردیده و نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود فقط مخزن شماره ۵ از نظر واژگونی مشکل دارد.

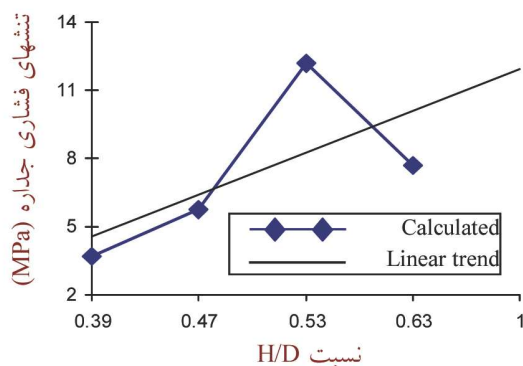
تغییرات میزان واژگونی مخازن بر حسب نسبت ارتفاع به قطر (H/D) در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود تغییرات مربوطه غیر خطی است که با یک رابطه خطی تقریب زده شده است. روند تغییرات به گونه ای است که با افزایش نسبت (H/D) میزان واژگونی افزایش می یابد.

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

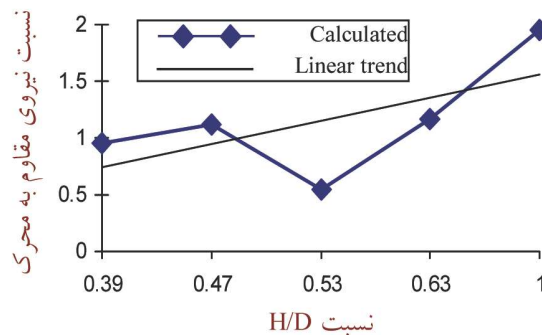
شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار بدست آمده	مقدار مجاز	وضعیت آسیب پذیری
۱	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۰/۹۶۱	۱/۵۷	مناسب
۲	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۱/۱۲۰	۱/۵۷	مناسب
۳	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۰/۵۵۰	۱/۵۷	مناسب
۴	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۱/۱۷۰	۱/۵۷	مناسب
۵	$M/[D^2(w_L+w_t)]$	۱/۹۶۰	۱/۵۷	نامناسب

جدول (۳): تنش های فشاری جداره و کنترل کمانش الماسی

شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار بدست آمده (MPa)	مقدار مجاز (MPa)	وضعیت آسیب پذیری
۱	تنش فشاری	۳/۶۹	۲۴/۸۶	مناسب
۲	تنش فشاری	۵۷۳	۳۷/۳۶	مناسب
۳	تنش فشاری	۱۲/۱۶	۳۲/۳۴	مناسب
۴	تنش فشاری	۷/۶۹	۳۹/۳۹	مناسب
۵	تنش فشاری	-	-	-



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

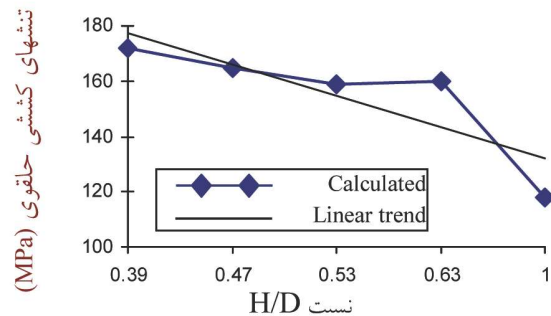
برای کنترل این پدیده، تنش های کششی حلقوی در جداره مخازن تحت اثر آنالیزهای مختلف کنترل شده و نتایج بدست آمده در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آنست که مقدار این تنش در تحلیل طیفی بیشتر از مقادیر بدست آمده از سایر تحلیل ها می باشد. تغییرات این تنش ها بر حسب نسبت H/D در شکل (۶) نشان داده شده است. طبق دستورالعمل ASCE ظرفیت مجاز تنشهای کششی در جداره مخازن برابر با $F_a = 1.6(0.6F_y)$ می باشد که F_y تنش حد جاری شدن فولاد مصرفی است و در مخازن مورد بررسی برابر با ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می باشد. همانطور که ملاحظه می شود 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 $M/[D^2(w_L+w_t)]$ می توان حداکثر مقدار نیروی فشاری در واحد طول محیط جداره مخزن (b) را بدست آورد. این نیرو با توجه به ضوابط آیین نامه 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 آیین نامه API650 کنترل کمانش الاستیک الماسی تنها در مورد مخازنی صورت می گیرد که پایدار بوده و مشکل واژگونی نداشته باشد. در واقع روابط موجود در این آیین نامه برای کنترل کمانش الماسی تنها در مورد مخازن پایدار معتبر می باشد. بنابراین کنترل این پارامتر در مورد مخزن شماره پنج امکان پذیر نیست [۵].

جدول (۴): تنش‌های کششی حلقوی و کنترل کمانش پافیلی

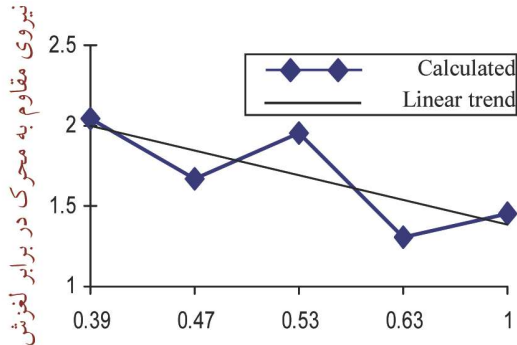
شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار بدست آمده (Mpa)	مقدار مجاز (Mpa)	وضعیت آسیب‌پذیری
۱	تنش کششی	۱۷۲	۲۲۶	مناسب
۲	تنش کششی	۱۶۵	۲۲۶	مناسب
۳	تنش کششی	۱۵۹	۲۲۶	مناسب
۴	تنش کششی	۱۶۰	۲۲۶	مناسب
۵	تنش کششی	۱۱۸	۲۲۶	مناسب



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

جدول (۵): نتایج کنترل لغزش در مخازن

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



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

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

ارتعاش مخزن وسیال درون آن در اثر لرزشهای ناشی از زلزله سبب پدیدار شدن امواجی در سطح سیال درون آن می‌شود. اگر پیش‌بینی‌های لازم در این مورد به عمل نیاید، این امواج سبب وارد آمدن آسیب‌هایی به سقف مخازن می‌گردد. 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 تحلیل‌های دینامیکی در جدول (۶) و منحنی تغییرات آن در شکل (۹) ارائه گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ارتفاع آزاد موجود (Free Board) در مخازن کافی نبوده و لذا آسیب‌پذیر هستند. یک راه حل برای جلوگیری از آسیب دیدگی سقف مخازن افزایش ارتفاع آزاد و راه حل دوم تقویت سقف مخازن می‌باشد. بر اساس API650 ارتفاع آزاد مورد نیاز معادل ۷۰ درصد ارتفاع موج می‌باشد.

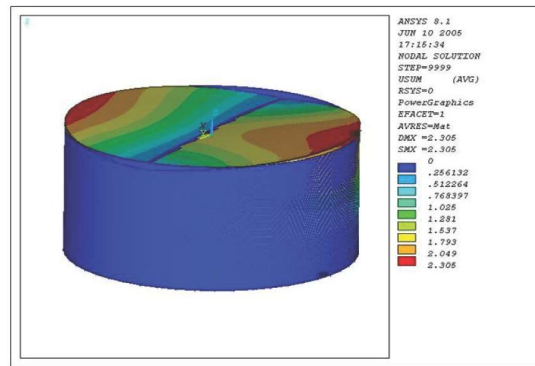
۴-۴- کنترل لغزش

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 می‌آید. مطابق آیین‌نامه 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 می‌باشد. 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 می‌شود 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.



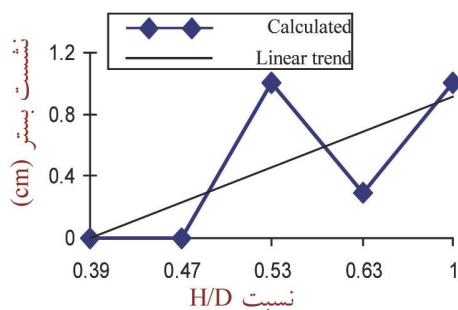
شکل (۸): حداکثر ارتفاع سیال در مخزن شماره ۲ (m)

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

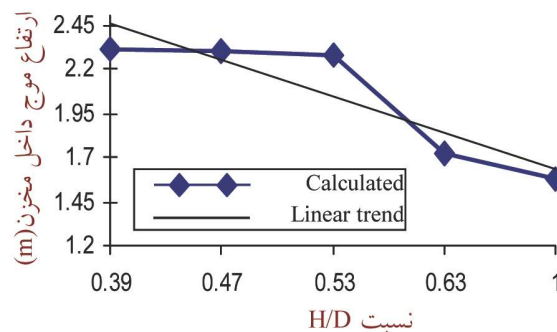
شماره مخزن	میزان نشست (cm)	حد مجاز (cm)	میزان بلندشدگی (cm)	حد مجاز (cm)	وضعیت آسیب پذیری
۱	۰	۵	۱/۴	۳۰	مناسب
۲	۰	۵	۲/۴	۳۰	مناسب
۳	۱/۰	۵	۱۹/۰	۳۰	مناسب
۴	۰/۳	۵	۶/۵	۳۰	مناسب
۵	۱/۰	۵	۲۴/۰	۳۰	مناسب

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

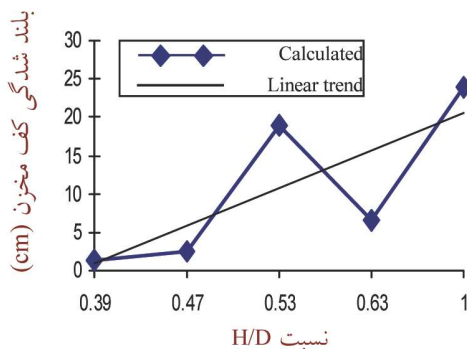
شماره مخزن	ارتفاع موج (m)	ارتفاع آزاد موجود (m)	ارتفاع آزاد مورد نیاز (m)	وضعیت آسیب پذیری
۱	۲/۳۱۵	۰/۶۴	۱/۶۲	نامناسب
۲	۲/۳۰۵	۰/۶۴	۱/۶۱	نامناسب
۳	۲/۲۷۹	۰/۵۵	۱/۶۰	نامناسب
۴	۱/۷۲۰	۰/۵۵	۱/۲۰	نامناسب
۵	۱/۵۸۰	۰/۶۴	۱/۱۱	نامناسب



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 طیس، گلبافت و السترو که با شرایط ساختمانی سازگاری بیشتری دارند، انتخاب شده اند. پس از آنالیز تاریخیچه زمانی، تغییر مکان قائم گره های

۵- راهکارهای مقاوم سازی

با توجه به محدودیت های موجود در شناخت میزان دقیق خطر لرزه ای یک ساختگاه برای طراحی یا مقاوم سازی، و کاستی های موجود در مدل سازی های تحلیلی نتایج قطعی قابل ارائه نمی باشد، بنابراین همواره پذیرش سطوحی از خطر اجتناب ناپذیر است. در نتیجه، افزودن حاشیه اطمینان و تامین ضوابط طراحی و مقاوم سازی و همچنین بررسی جزئیات با دقت بیشتر می تواند به عملکرد مطمئن و رفتار مناسب مخازن تحت زلزله های محتمل در آینده منجر شود. لذا هدف اصلی در یک پروژه طراحی و یا مقاوم سازی، کاهش خطر و حداقل نمودن آن با در نظر گرفتن امکانات و منابع موجود می باشد.

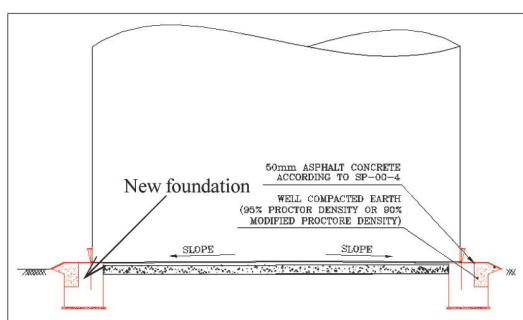
در تمام مخازن بررسی شده، سطح سیال درونی در وضعیت بحرانی قرار گرفته است. بدین ترتیب در ادامه راهکارهایی برای مقاوم سازی این مخازن ارائه گردیده است.

به منظور جلوگیری از آسیب های وارده به سقف در اثر پدیده نوسان سیال (Sloshing) که در تمام مخازن مورد بررسی به وجود می آید، کاهش ارتفاع سیال درون مخازن تا سطوح بیان شده در جدول (۶) کم هزینه ترین راه حل محسوب می شود. 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، مقاوم سازی 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 می باشد، در مورد این مخزن پس از بررسی راه حل های پیشنهادی آیین نامه 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

مهارهای لازم در فواصل مساوی طوری طراحی می شوند که تحمل تنشها و نیروهای کششی ناشی از لنگر واژگونی را داشته باشند. باید توجه نمود که بر طبق ضوابط آیین نامه 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 مقاوم سازی نشان می دهد که تنشهای کششی جداره برابر با ۱۲/۳۴ مگاپاسکال می باشد که کمتر از مقدار مجاز (۴۳/۵۸ مگاپاسکال) بوده و لذا قابل قبول می باشد.



شکل (۱۲): نمایی از رینگ بتنی برای مقاوم سازی

مخزن شماره ۵

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ۵ مخزن فولادی استوانه ای روزمینی موجود در یک مجتمع نفتی مورد ارزیابی لرزه ای قرار گرفته است. مخازن مورد بررسی در یک ناحیه لرزه خیز قرار دارند که حداکثر شتاب زلزله طرح ساختگاه معادل 0.3g بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران می باشد. مهمترین یافته های حاصل از مطالعات تحلیلی و ارزیابی ضوابط آیین نامه ای به شرح زیر می باشند:

- 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 آیین نامه های موجود به ۰/۶ محدود شده است.
- ۲- با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H/D)، خطر کماتش الاستیک الماسی در جداره نیز افزایش می یابد.

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", 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seattle, July 16-18, 2003.
- 3- 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.
- 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 (1st 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 کمانش الاستوپلاستیک کاهش می‌یابد. همچنین، در مخازن با قطر بزرگتر، خطر کمانش الاستوپلاستیک پافیلی بیشتر است.
- ۴- در مخازن مورد مطالعه پدیده لغزش بستر اتفاق نمی‌افتد. تجربه زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که تاکنون در مخازن با قطر بزرگتر از ۹ متر لغزش قابل ملاحظه‌ای دیده نشده است.
- ۵- با افزایش قطر مخازن دامنه نوسان سیال داخل آنها (Sloshing) نیز افزایش می‌یابد، لیکن با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H/D)، این دامنه کاهش می‌یابد. 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 همین‌طور میزان نشست کف نیز افزایش می‌یابد. در مخازن بررسی شده که نسبت‌های ارتفاع به قطر کوچکتر از یک بوده است ($H/D \leq 1$) میزان بلندشدگی و نشست بستر کمتر از مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای می‌باشد.