



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

نقدلی 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 نسبتها ارتفاع به قطر (H/D) مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و انواع مودهای آسیب شامل کمانش پافیلی، کمانش الماسی، آسیب دیدگی سقف در اثر نوسان سیال، لغزش، واژگونی، بلندشدن کف و نشت نامتقابران با تحلیل غیرخطی بررسی شده است. در این مطالعات، علاوه بر ارزیابی ضوابط آینینه‌های معترض از جمله ASCE و API650 و 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 آسیب‌پذیری سقف از بین می‌رود. همچنین مخازن با نسبت ارتفاع به قطر بزرگ‌تر و یا مساوی با یک (1/H/D) نایاب‌دار می‌باشند، سایر مودهای 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 ir.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 مالهوتر مقاله ای تحت عنوان «ارزیابی لرزه ای مخازن مهار نشده»، ارائه نمودند که در آن هفت مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع مختلف (H/R) تحت بررسی قرار گرفت. آنها چنین عنوان کردند که یک ارتباط تنگاتنگ بین نسبت (H/R) و بلند شدن 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 ارتفاع به قطر مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر کنترل ضوابط آیین نامه ای تحلیل های استاتیکی، مودال، طبقی و تاریخچه زمانی غیرخطی برای هریک از مخازن صورت پذیرفته است.

۲- مودهای آسیب مخازن

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

۱-۲- 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 $\frac{W_t}{M/[D^2(w_L+w_t)]}$ کنترل می گردد. در این رابطه M لنگر واژگونی مخزن بر حسب $(N.m)$ و w_L وزن محتویات مخزن در واحد طول محیط (m) و w_t وزن ورق جداره در واحد طول محیط مخزن بر حسب (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 روز میانی نفتی هستند که به شکل استوانه ای طراحی و اجرا می گردند. در واقع مخزن را وقتی روز میانی 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 می باشد 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 می شود. مخازن رو زمینی 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 هاوزر 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 مواج در بالای مخزن پدید می آید و فشار ضربانی در اثر حرکت قسمتی از سیال در پایین مخزن و هماهنگ 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



۲-۲- کمانش الماسی جداره

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].

۶- بلندشدن کف

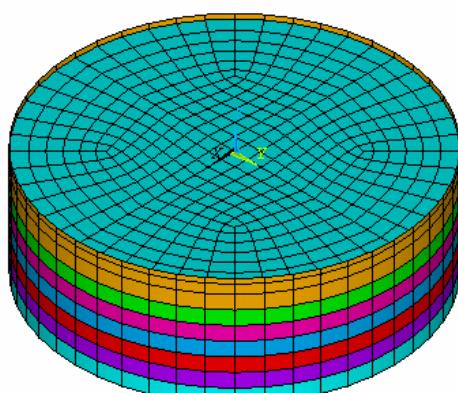
بلند شدن کف مخازن مهار نشده یکی از مودهای آسیب در زلزله‌های گذشته محسوب می‌شود. در صورتی که مقدار این بلند شدن کف از مقدار مجاز آن (30 سانتیمتر) بیشتر شود، ممکن است منجر به پارگی جداره مخزن و یا شکستگی لوله‌های متصل به آن گردد [۱].

۷- نشست نامتقارن بستر

نشهای ناشی از لنگر واژگونی و ضربه‌های ناشی از بلند شدن کف مخزن در هنگام زلزله موجب نشست نامتقارن در تراز پایه می‌گردد. در نتیجه امکان آسیب دیدگی و خسارت مخزن وجود دارد. حداقل نشست نامتقارن بستر طبق دستورالعمل‌های موجود به 5 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

۳-۲- کمانش پافیلی جداره

کمانش پافیلی (کمانش الاستوپلاستیک) معمولاً در مخازن بزرگ و در ارتفاع $1/5$ تا $2/5$ 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].

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 $1/5$ می‌باشد. برای محاسبه نیروی مقاوم در برابر لغزش، ضریب اصطکاک بین کف مخزن و پی برابر $0/4$ پیشنهاد شده است [۱].

۵- آسیب دیدگی سقف

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

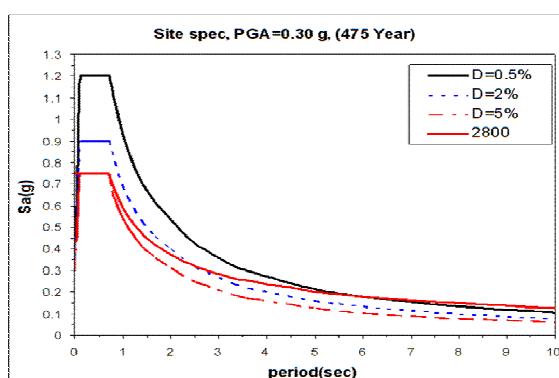
جدول (۱) : مشخصات مخازن بررسی شده

شماره مخزن	ارتفاع H (m)	قطر D (m)	چگالی سیال (kg/cm ²)	تش 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 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 ۱۰۰، ۳۰ و ۳۰ استفاده شده است. نوع خاک محل تیپ 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 و ۰/۲ و ۰/۵ 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 خمثی - غشائی است که قابلیت تحلیل نیروهای درون صفحه و عمود بر صفحه را دارد می‌باشد. به علاوه، این المان قابلیت سخت‌شدگی کرنش و تغییر مکان‌های بزرگ را دارد می‌باشد. برای مدل‌سازی سیال از المان Fluid80 استفاده شده است. این المان برای مدل کردن سیال بدون جریان مناسب است و برای محاسبه فشارهیدرولاستاتیک و اندرکنش سیال و سازه کاربرد دارد. همچنین برای مدل کردن بلند شدگی کف مخزن از المان (Link10) استفاده شده است. این المان یک فنر فشاری است که سختی آن در هنگام کشش صفر می‌گردد.

۱-۳- تحلیل استاتیکی

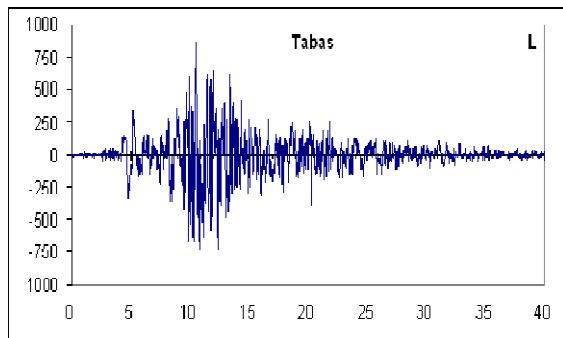
به عنوان اولین گام در تحلیل کمی، مخازن تحت اثر وزن جداره و فشار هیدرولاستاتیک سیال تحلیل شده‌اند. نتایج این تحلیل بیانگر تنش‌های کششی حلقوی ایجاد شده در جداره مخزن تحت اثر فشار هیدرولاستاتیک می‌باشد. همچنین، نتایج این تحلیل در ترکیبات بارگذاری مربوط به بارهای ثقلی و زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳- 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، طبس و السترو که بیشترین تطابق را با شرایط ساختگاه داشته‌اند استفاده شده است. این رکوردها به صورت سه مؤلفه‌ای در جهات متعامد با نسبت‌های ۱۰۰، ۳۰ و ۳۰ درصد به مخازن اعمال گردیده‌اند [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 آسیب‌پذیری مورد بررسی با بهره‌گیری از نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی هریک از مخازن مورد نظر، معیارهای آسیب‌پذیری مربوطه کنترل گردیده است که در ادامه بررسی می‌شوند.

۴- کنترل واژگونی

با بهره‌گیری از ضوابط آیین‌نامه 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 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].

۴-۳- تحلیل تاریخچه زمانی

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

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

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. (t) نیز بیانگر شتاب زمین است. این روابط به صورت غیر خطی تحلیل می‌شوند و برای برآورده میزان بلندشدن 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.

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

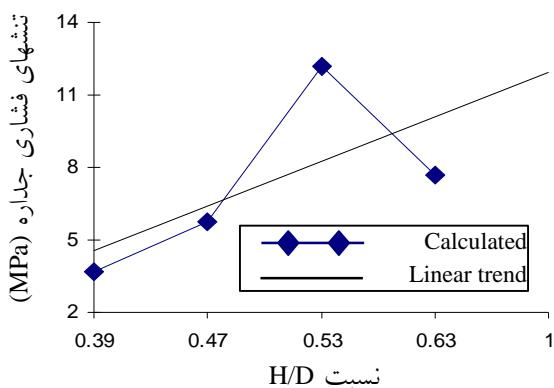
که در آن $[CF_i]$ ماتریس میرایی المان i ام سیال ویسکوز و m تعداد المان‌های سیال می‌باشد. ضرایب α و β از رابطه (۲) حاصل می‌شوند.

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

در رابطه فوق ω_i و ω_j فرکانس‌های دو مود اصلی مخزن و ζ_i و ζ_j میرایی‌های مربوط به آنها می‌باشند. ضرایب α و β در این رابطه معرفی شوند.

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

شماره مخزن	پارامتر مورد بررسی	مقدار بسته آمده (MPa)	مقدار مجاز (MPa)	وضعیت آسیب پذیری
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	-	-	-



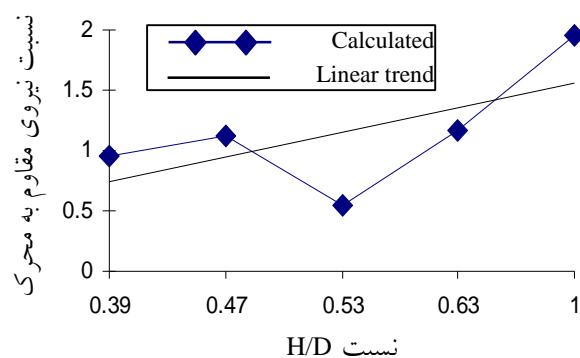
شکل (۵) : تنش های فشاری جداره بر حسب نسبت H/D

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 حاکمی 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 ۶-۱۶ نشان داده شده است. ظرفیت مجاز تنش های 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.

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

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



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

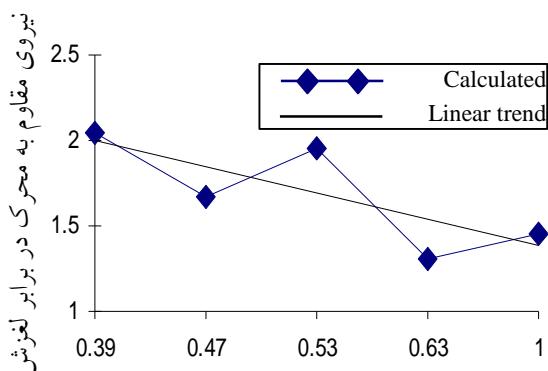
۴-۲- کنترل کمانش الاستیک الماسی در جداره

پس از محاسبه نسبت $[M/D^2(w_L+w_t)]$ می توان حداقل 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 (t_b) با نشان مجاز مربوطه مقایسه شده است (t_b 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 (۵) : نتایج کنترل لغزش در مخازن

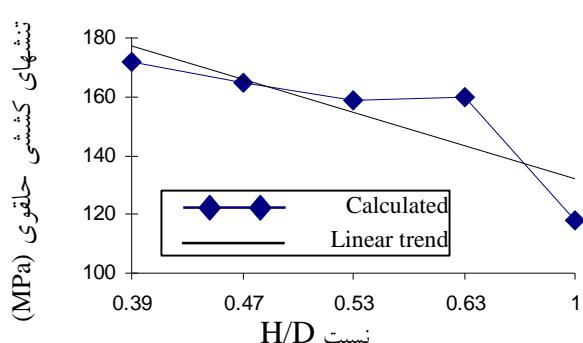
شماره مخزن	نیروی محرک (MN)	نیروی مقاوم (MN)	نیروی مقاوم به محرک	وضعیت آسیب‌پذیری
۱	۲۳/۱۴	۴۵/۷۸	۲/۰۵	مناسب
۲	۱۵/۶۳	۳۱/۹۷	۱/۶۷	مناسب
۳	۸/۴۵	۱۸/۰۳	۱/۹۶	مناسب
۴	۷/۴۱	۹/۶۹	۱/۳۱	مناسب
۵	۴/۸۹	۷/۱۵	۱/۴۶	مناسب



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

جدول (۴) : تنש‌های 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

۴-۵- کنترل نوسانات سیال (Sloshing) و آسیب سقف
ارتفاع مخزن سیال 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 است. 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.

۴-۶- 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 آینه نامه ASCE ضریب اطمینان در برابر لغزش مخازن بایستی ۱/۵ در نظر گرفته شود. همچنین ضریب اصطکاک کف مخزن و بستر نیز برابر ۴/۰ در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب برای کنترل لغزش مخازن رابطه (۴) بررسی شده است [۱].

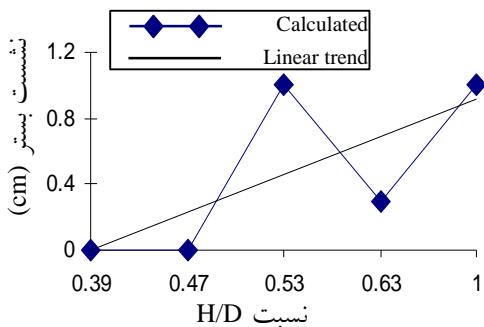
$$(4) \quad 0.4W \geq 1.5V$$

که در این رابطه W وزن مخزن 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.

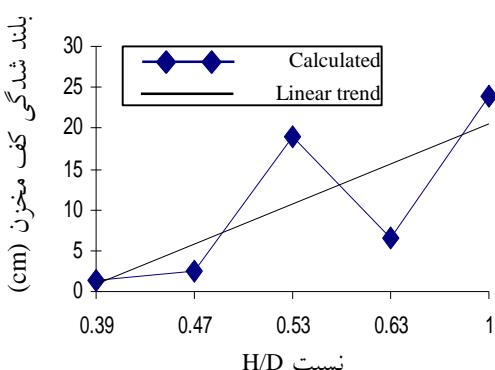
کف مخزن تحت رکوردهای فوق بررسی و حداکثر مقادیر آنها استخراج شده است. نتایج تحلیل در جدول (۷) آمده است. همچنین نتایج نشست نامتقارن بستر در شکل (۱۰) و نتایج بلندشدگی کف مخزن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود میزان بلند شدگی کف و همچنین میزان نشست بستر در تمام مخازن در محدوده مجاز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

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

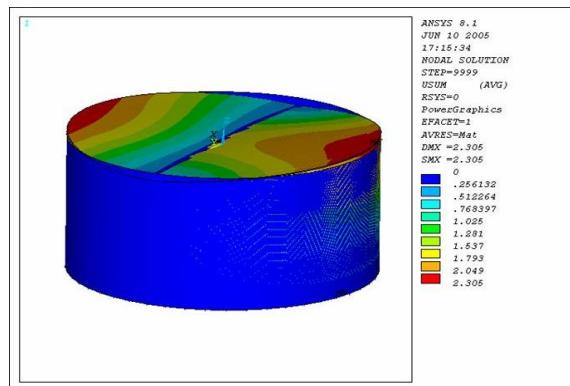
شماره مخزن	میزان نشست (cm)	حد مجاز (cm)	میزان بلندشدگی (cm)	حد مجاز (cm)	وضعیت آسیب‌پذیری
۱	۰	۵	۱/۴	۳۰	مناسب
۲	۰	۵	۲/۴	۳۰	مناسب
۳	۱/۰	۵	۱۹/۰	۳۰	مناسب
۴	۰/۳	۵	۶/۵	۳۰	مناسب
۵	۱/۰	۵	۲۴/۰	۳۰	مناسب



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



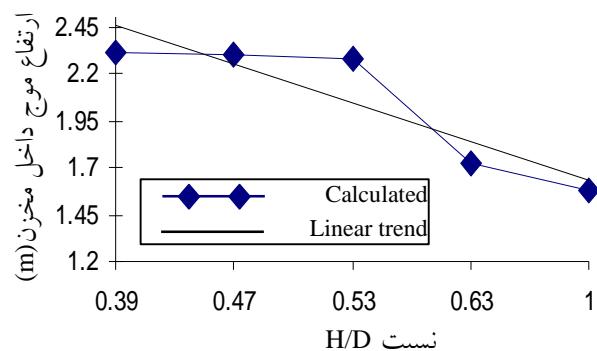
شکل (۱۱): میزان بلندشدگی مخازن بر حسب نسبت H/D



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

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

شماره مخزن	ارتفاع موج (m)	ارتفاع آزاد موجود (m)	ارتفاع آزاد موردنیاز (m)	وضعیت آسیب‌پذیری
۱	۲/۳۱۵	۰/۶۴	۱/۶۲	نامناسب
۲	۲/۳۰۵	۰/۶۴	۱/۶۱	نامناسب
۳	۲/۲۷۹	۰/۰۵	۱/۶۰	نامناسب
۴	۱/۷۲۰	۰/۰۵	۱/۲۰	نامناسب
۵	۱/۵۸۰	۰/۶۴	۱/۱۱	نامناسب



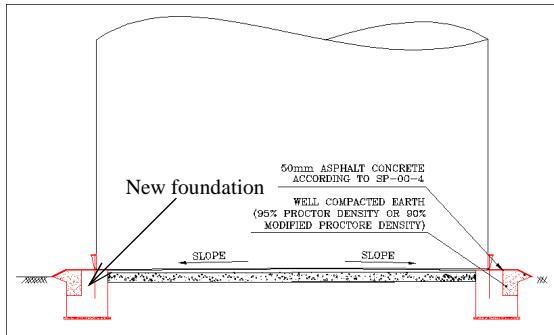
شکل (۹): دامنه نوسانات سیال مخازن بر حسب نسبت H/D

۶-۶- کنترل بلندشدگی و نشست نامتقارن بستر

پدیده بلند شدگی و نشست نامتقارن مخازن یک پدیده غیرخطی هندسی می‌باشد. لذا برای بررسی میزان بلندشدگی کف و نشست ناشی از ضربه این بلندشدگی‌ها، آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی مخازن صورت گرفته است. رکورد زلزله‌های طبس، گلیافت و استر و که با شرایط ساختگاهی سازگاری بیشتری دارند، انتخاب شده‌اند. پس از آنالیز تاریخچه زمانی، تغییر مکان قائم گره‌های

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 آئین 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 می‌دهد که تنشهای کششی جداره برابر با ۱۲/۳۴ مگاپاسکال می‌باشد که کمتر از مقدار مجاز ($43/58$ مگاپاسکال) بوده و لذا قابل قبول می‌باشد.



شکل (۱۲) : نمایی از رینگ بتنی برای مقاوم سازی
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 آئین نامه‌ای به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- به منظور جلوگیری از پدیده واژگونی مخازن مهار نشده، بایستی نسبت ارتفاع به قطر (H/D) آنها از $7/0$ کمتر باشد. این نسبت در آئین نامه‌های موجود به $0/6$ محدود شده است.
- ۲- با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H/D)، خطر کمانش الستیک الماسی در جداره نیز افزایش می‌یابد.

۵- راهکارهای مقاوم سازی

با توجه به محدودیت‌های موجود در شناخت میزان دقیق خطر لرزه‌ای یک ساختگاه برای طراحی یا مقاوم سازی، 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 مقاوم سازی 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 مقاوم سازی، 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 درادامه راهکارهایی برای مقاوم سازی این مخازن ارائه گردیده است.

به منظور جلوگیری از آسیب‌های واردہ 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 13 درصد 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 می‌باشد، در مورد این مخزن پس از بررسی راه حل‌های پیشنهادی آئین نامه API650، راه حل افزودن یک رینگ بتنی مسلح در پیامون 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", 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, November1998, Adendum1, March2000.
- ٦- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، «آین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله-استاندارد ۸۴-۲۸۰۰-۱۳۸۴ 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 بلندشدنگی کف و همین طور میزان نشست کف نیز افزایش می‌یابد. در مخازن بررسی شده که نسبت‌های ارتفاع به قطر کوچکتر از یک بوده است (H/D<1) میزان بلندشدنگی و نشست بستر کمتر از مقادیر مجاز آین نامه‌ای می‌باشد.

