بررسی میدانی و تحلیلی رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی فولادی تحت اثر زلزله ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه (سیلاخور) ایران

ساسان عشقی، استادیار، پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
مهدی ادیبی، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

در زلزله‌های مختلف و حتی در یک زلزله، رفتارهای متفاوتی از چند مخزن ظاهراً مشابه در یک منطقه مشاهده می‌گردد که می‌تواند موجب بروز آسیبهای مختلف و مدهای شکست مختلف در آنها شود. از این رو علاوه بر مطالعات تحلیلی، انجام مطالعات میدانی پیرامون رفتار مخازن تحت اثر زلزله‌های مختلف، ضروری به نظر می‌رسد. در مقاله حاضر، مخازن هوایی فولادی موجود در منطقه‌ای که تحت اثر زلزله سال ۱۳۸۵ در دشت سیلاخور دچار آسیبهایی شده‌اند، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. برای بررسی مقدماتی رفتار لرزه‌ای این مخازن هوایی، از روش تحلیل استاتیکی معادل آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش سوم) ایران که اغلب مهندسان سازه با آن آشنا هستند، استفاده شده است. در این مطالعه عواملی همچون نوع تکیه‌گاه سازه، میزان حجم آب داخل مخزن در زمان زلزله و برخی از ایرادات موجود در اجرای سازه‌ها و اثرات آنها بر رفتار این سازه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. این رفتارها با آنچه که در زلزله رخ داده است، به طور کلی مقایسه می‌شود. علاوه بر آن رفتار اجزای این سازه‌ها، بر اساس آیین‌نامه طرح و اجرای ساختمانهای فولادی (مبحث دهم مقررات ملی ساختمانی ایران) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این اجزاء سازه‌ای در سه بخش ستونها، تیرها و مهاربندها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در این تحقیق مقدماتی می‌تواند در درک بهتر رفتار لرزه‌ای مخازن فولادی هوایی و نیز برای توسعه آیین‌نامه وِیژه لرزه‌ای برای آنها مفید واقع شود.

کلیدواژه‌ها: سازه‌های خاص، مخازن هوایی فولادی، روش طراحی بر اساس نیرو، رفتار لرزه‌ای، زلزله ۱۳۸۵ درب آستانه (سیلاخور)

۱– مقدمه

بر اساس گزارش پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، زمین‌لرزه با بزرگی M_L=۶/۱ در ساعت ۴:۴۷ بامداد روز ۸۵/۱/۱۱ در جنوب بروجرد، با رخداد چندین پیش‌لرزه به ویژه زلزله‌های ساعت ۱۹:۴۷ روز ۸۵/۱/۱۰ با بزرگای M_L= ۴/۶، ساعت ۲۳:۰۶ روز ۸۵/۱/۱۰ با بزرگای M_L= ۵/۱ و همچنین با پس‌لرزه ساعت ۵:۰۱ بامداد روز ۸۵/۱/۱۱ با بزرگای M_L= ۴/۹ همراه بود. در مجموع ۶۷ کشته و حدود ۱۲۴۶ نفر مجروح و آسیب به دهها روستا در منطقه دشت سیلاخور از توابع بروجرد و دورود گزارش شد [۱].

بر اساس بازدید انجام شده، در دشت سیلاخور به خصوص در منطقه چالان چولان که بیشتر آسیبهای زلزله نیز در آنجا متمرکز می‌شد، به علت خصوصیات توپوگرافی و مسطح بودن نسبی منطقه، در سرتاسر آن برای مصارف روستایی، شهری و صنعتی از تعداد زیادی از مخازن هوایی فولادی استفاده شده بود که بعضی از آنها نیز در این زلزله دچار آسیبهایی شدند. ارتفاع مخازن بستگی به نوع کاربرد از ۱۱ تا ۳۰ متر و حجم آنها از ۱۰ تا ۱۲۰ متر مکعب متغیر بودند. معمولاً برای طراحی این مخازن از روشهای آیین‌نامه‌ای مبتنی بر نیرو در طراحی لرزه‌ای استفاده شده است. از میان این مخازن، سه مخزن موجود در بیمارستان چمران، روستای باباپشمان و کارخانه خمیرمایه برای بررسی دقیقتر رفتارشان تحت اثر زلزله انتخاب شدند تا با بررسی آسیبهای وارده به آنها و روشهای آیین‌نامه‌ای مورد استفاده برای طراحی آنها، کفایت این روشها برای طراحی این مخازن تا حدی مشخص گردد. در این مقاله، ابتدا مروری بر رفتار هر یک از سازه‌های فوق تحت اثر زلزله یاد شده، صورت گرفته و سپس با در نظر گرفتن رفتار مایع تحت اثر زلزله، محاسبه بارهای لرزه‌ای

سازه و کنترل آن و پس از آن مقایسه با رفتار مخازن در زلزله انجام شده است.

۲- مرور کوتاهی بر ادبیات فنی

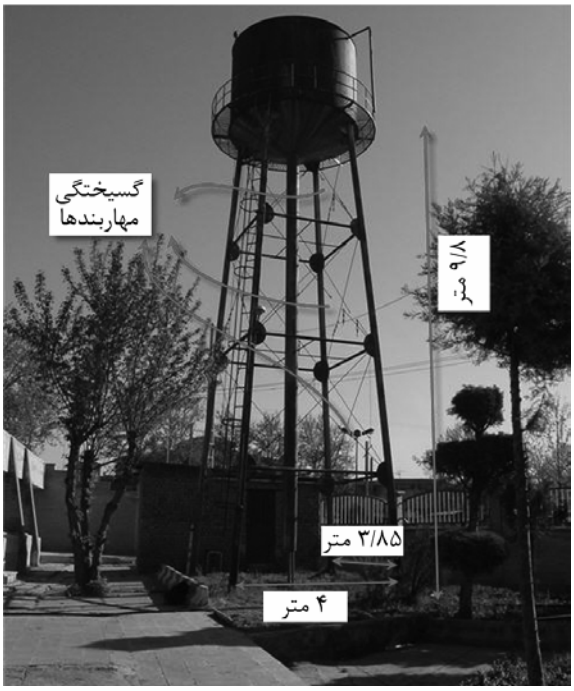
مخازن مایعات، همواره از جمله سازه‌هایی بوده‌اند که رفتارشان تحت اثر زلزله مورد توجه محققان قرار گرفته است [۲-۳]. اهمیت بسیار زیاد این سازه‌ها از یک طرف و پیچیدگی رفتار لرزه‌ای آنها به علت مسائلی همچون برهمکنش سازه و مایع داخل مخزن و فرم خاص سازه موضوع کارهای تحقیقاتی بسیاری شده است. محققانی بسیار نظیر هاوزنر، هارون و پریستلی هر یک به بررسی بعضی از مسائل مربوط به مخازن پرداخته‌اند [۴،۲]. اما اکثر کارهایی که در این زمینه انجام شده است، مربوط به مخازن زمینی می‌باشد و در مورد مخازن هوایی فولادی کارهای نسبتاً کمتری انجام شده است [۵-۶]. البته در موضوع بررسی اثرات دینامیکی ناشی از جرم مایع مواج داخل مخزن، در حال حاضر فرض می‌شود که بتوان از روابط موجود برای مخازن فولادی زمینی استفاده نمود؛ اما در مورد این موضوع و رفتار سازه نگهدارنده مخزن و رفتار کلی مجموعه مخزن و سازه نگهدارنده در برابر زلزله، تحقیقات بیشتری مورد نیاز است.

۳- مخازن مورد بررسی

مخازنی که در این مطالعه موردی در نظر گرفته شده است به ترتیب زیر می‌باشد:

۳-۱- مخزن هوایی بیمارستان چمران

مخزن آب بیمارستان شهید چمران طبق گفته مسئولان بیمارستان، در زمان زلزله تقریباً پر بوده است. آسیب نسبتاً زیادی که از زلزله به آن وارد شده، سبب شد که بعد از زلزله، آن را تخلیه نمایند. در این زلزله اکثر مهاربندهای این سازه دچار گسیختگی شدند اما به خود مخزن آسیب جدی وارد نشد، تصاویر (۱) و (۲). مشخصات کلی این مخزن را می‌توان در جدول (۱) مشاهده کرد. همان گونه که از تصاویر دیده می‌شود در طبقه اول سازه نگهدارنده این مخزن، مهاربندهای لازم وجود نداشت که همین امر باعث تغییراتی در رفتار معمول این مخزن شد.



تصویر (۱): *نمایی از مخزن آب هوایی بیمارستان چمران.*

تصویر (۲): *گسیختگی مهاربندها از محل بستهای قورباغه‌ای در مخزن بیمارستان چمران.*

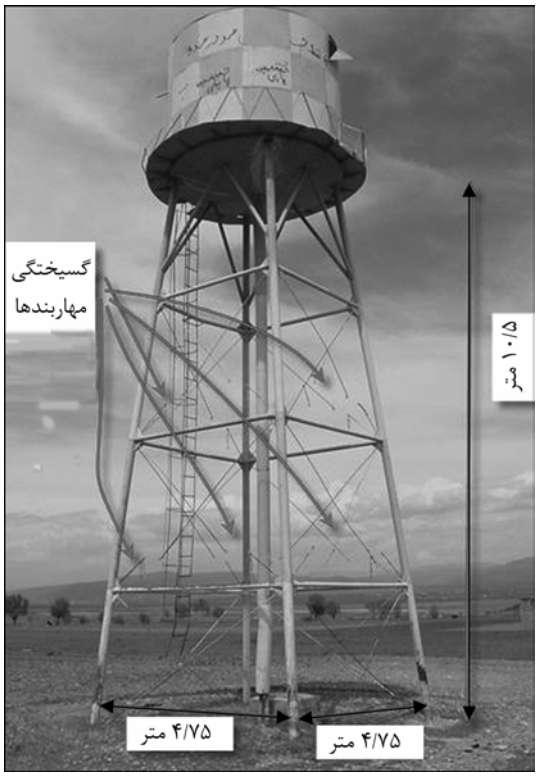
۳-۲- مخزن آب روستای باباپشمان

مخزن آب روستای باباپشمان در این زلزله دچار آسیبهای عمده‌ای شد، تصویر (۳). مشخصات کلی آن را نیز می‌توان در جدول (۱) مشاهده کرد.

مهاربندهای به کار رفته در سازه نگهدارنده مخزن در هر دو جهت دچار گسیختگی شدند. همچنین تغییرمکانهای زیاد و ناهمگون ناشی از زلزله در ستونهای سازه نگهدارنده این مخزن باعث پارگی کف مخزن در محل اتصال به ستونهای منتهی به مخزن گردید و سبب فرار آب از آن قسمت شد، تصویر (۴).

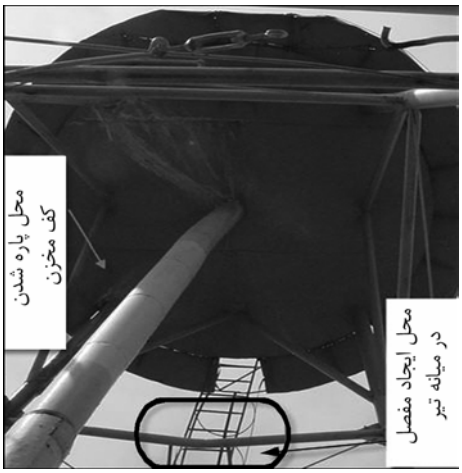
جدول (۱): مشخصات مخازن هوایی مورد بررسی در منطقه زلزله‌زده بروجرد.

مخزن هوایی	ارتفاع (تا زیر مخزن)	حجم مخزن (m^3)	حجم مایع (m^3) موجود در زمان زلزله	نوع مقاطع		
				ستون	تیر	مهاربند
بیمارستان چمران	۹/۸	۳۵	(تقریبی) ۳۰	قوطی	لوله	Φ۱۶
روستای باباپشمان	۱۰/۵	۲۰	نامشخص	لوله	لوله	Φ۱۶
کارخانه خمیرمایه	۳۰	۱۲۰	نامشخص	دوبل ناودانی	ناودانی	Φ۳۰



تصویر (۳): نمایی از مخزن آب روستای باباپشمان.

از موارد دیگر می‌توان به کمانش زودهنگام مهاربندهای به کار رفته در طبقه اول سازه نگهدارنده مخزن اشاره کرد که دلیل آن را نیز می‌توان عدم استفاده از بستهای قورباغه‌ای مناسب در این مهاربندها و عملکرد فشاری نامناسب آنها دانست، زیرا چنانچه از نتایج تئوری و آزمایشگاهی حاصل شده است، مهاربندهای با لاغری زیاد در عملکرد توأم کششی و فشاری، قابلیت جذب انرژی زیادی را نداشته و رفتار مناسبی را نشان نمی‌دهند و تحت بار فشاری حتی کم، به علت لاغری خیلی زیاد، سریعاً کمانش می‌کنند، تصویر (۵). مسأله مشاهده شده دیگر ایجاد مفصل پلاستیک در یکی از تیرها در بالاترین تراز سازه نگهدارنده مخزن می‌باشد که نشان از استفاده حداکثر ظرفیت این عضو دارد، تصویر (۴).



تصویر (۴): نمایی از آسیبهای وارده به مخزن و سازه نگهدارنده آن.

تصویر (۵): سازه نگهدارنده مخزن آب روستای باباپشمان.

۳-۳- مخزن هوایی کارخانه خمیرمایه

مخزن هوایی کارخانه خمیرمایه از نظر ارتفاع سازه نگهدارنده، بلندترین مخزن هوایی منطقه زلزله‌زده بود. این مخزن در زمان زلزله خالی نبوده است اما مقدار مایع موجود در آن دقیقاً مشخص نیست، تصویر (۶).

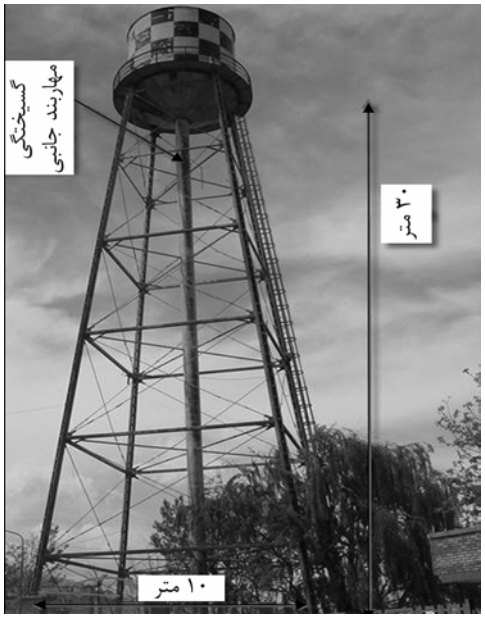
در زمان زلزله این مخزن دچار دو آسیب عمده شد:

۱. مهاربندهای بالاترین طبقه آن در یکی از جهات اصلی گسیخته شد.

۲. به علت تغییرمکان بیش از حد مخزن و به تبع آن لوله‌های آبرسانی مخزن که از داخل شافت میانی آن عبور می‌کردند و نیز به خاطر نداشتن آزادی کافی

حرکتی در لوله‌های متصل به انتهای شافت، جوشهای اتصالی آن گسیخته شدند و تمام آب مخزن از محل درز ایجاد شده، خارج شد.

برای جلوگیری از مشکلاتی نظیر آن می‌توان از اتصالات انعطاف‌پذیر و یا از لوله‌هایی به شکل S در محل اتصال استفاده کرد. همچنین بایستی تغییرمکان رأس را در این سازه‌ها محدود نمود. مشخصات سازه‌ای این مخزن را نیز در جدول (۱) می‌توان مشاهده کرد.



تصویر (۶): *نمایی از مخزن هوایی کارخانه خمیرمایه.*

۴- مدلسازی

۴-۱- مدل تحلیلی سازه

اکثر مخازن هوایی فولادی در قسمت سازه نگهدارنده از نظر پیکربندی، سازه‌هایی منظم محسوب می‌شوند. توزیع سختی در ارتفاع این سازه‌ها نسبتاً یکنواخت می‌باشد. همچنین با توجه به ثابت بودن مقطع ستونها در ارتفاع، مقاومت جانبی آنها نیز مشابه می‌باشد، ولی درصد بسیار بالایی از جرم سازه نیز در حالات پر و نیمه پر بودن مخازن در بالای آن قرار دارد و از نظر توزیع جرم سیستم حالت پاندول وارونه را به خود می‌گیرد.

تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است که مخازن هوایی فولادی معمولاً از ناحیه خود مخزن کمتر دچار مشکل می‌شوند و این امر می‌تواند به خاطر ضخامت مناسب پوسته دیواره و کف آنها برای تحمل فشارهای وارده از جانب مایع درون مخزن در حالات بارگذاری ثقلی و لرزه‌ای باشد. با توجه به این تجربه و نیز عوامل دیگری همچون پیچیدگی مدل در صورت نمایش جرم مایع به دو صورت ضربه‌ای و انتقالی و وارد کردن المانهای فنر مورد نیاز برای نشان دادن اثرات جرم انتقالی، نهایتاً باعث شد برای ساختن مدل این مخازن به اجزای سازه‌های نگهدارنده آنها اکتفا شود و اثرات ناشی از وزن خود مخزن و مایع درون آن و اثرات مد تلاطمی آن تحت نیروهای زلزله، در مدلهای ساخته شده محاسبه شده و در بارگذاری در نظر گرفته شود. همچنین سعی شد تا حد امکان مواردی همچون یکسان نگه داشتن تغییرمکان و دوَرانهای انتهای ستونهای سازه به علت عملکرد صلب دیافراگم کف مخزن، بر روی سازه اعمال شوند. با توجه به نبود نقشه‌های اجرایی و طراحی این سازه‌ها برای محاسبه مقدار جرم ضربه‌ای و انتقالی مایع و محل اثر آنها در مخازن از روابط زیر برای سیستم دو درجه آزادی معادل مخزن و مایع درون آن استفاده می‌شود، شکل (۱). در این روابط M_c و K_c مربوط به مد انتقالی می‌باشد. M جرم کلی مایع، h ارتفاع مایع درون مخزن، R شعاع مخزن می‌باشد [۲].

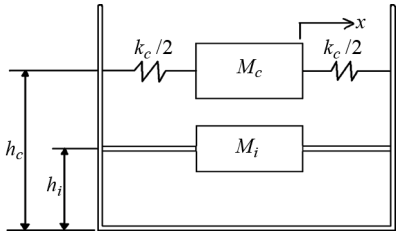
$$M_c = M(0.71)\frac{\tanh(1.8h/R)}{1.8h/R} \qquad (۱)$$

$$M_i = M\frac{\tanh(1.7R/h)}{1.7R/h} \qquad (۲)$$

$$h_i = \frac{3}{8}h\left[1+\frac{4}{3}\left[\frac{M}{M_i}-1\right]\right] \qquad (۳)$$

$$K_c = 4.75\frac{M_c^2}{M}\frac{gh}{R^2} \qquad (۴)$$

$$h_c = h\left[1-0.21\left(\frac{M}{M_c}\right)\left(\frac{R}{h}\right)^2 + 1.1\frac{R}{h}\sqrt{0.15\left(\frac{MR}{M_c h}\right)^2-1}\right] \qquad (۵)$$



شکل (۱): *سیستم دو درجه آزادی معادل مخزن و مایع درون آن.*

۴-۲- بارگذاری لرزه‌ای سازه

با توجه به این فرض که محاسبه بارهای لرزه‌ای مخازن موجود در زمان طراحی با استفاده از آیین‌نامه زلزله ایران انجام شده است، در این تحقیق نیز پس از محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی مخزن برای محاسبه بار جانبی زلزله مطابق با روش تحلیل استاتیکی معادل آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم محاسبات صورت می‌گیرد. طبق این روش نیروی برشی پایه در هر یک از امتدادهای سازه با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$V=CW \qquad (۶)$$

در این رابطه W وزن کل سازه شامل بار مرده و درصدی از بار زنده و یا بار برف آن است (برای مخازن ۱۰۰ درصد این بار) و ضریب برش پایه C نیز از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$C = ABI/R \qquad (۷)$$

A نسبت شتاب طرح (شتاب زلزله به شتاب ثقل) می‌باشد که با توجه به میزان لرزه‌خیزی منطقه بروجرد که در ناحیه خطر خیلی زیاد قرار می‌گیرد و ضریب ۰/۳۵ به این منطقه تعلق می‌گیرد. I نیز ضریب اهمیت سازه می‌باشد که مطابق با آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم، این ضریب برای مخازن هوایی برابر با ۱/۴ در نظر گرفته می‌شود. R ضریب رفتار سازه است که برای این مخازن در آیین‌نامه برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. همچنین B ضریب بازتاب سازه است که با استفاده از طیف بازتاب موجود در همین آیین‌نامه به دست می‌آید.

برای تعیین نوع خاک زیر هر یک از سازه‌های مخازن هوایی اطلاعات کافی در دسترس نبود. در نتیجه با توجه به اینکه در منطقه شهری بروجرد، خاک بستر در اکثر نقاط به صورت نیمه‌متراکم در نظر گرفته شد، در مناطق روستایی پس از گذشتن از یک لایه نسبتاً نرم و رسی به لایه‌ای نیمه‌متراکم در بستر برخورد کرد و تصمیم بر آن شد تا ضریب بازتاب برای دو تیپ محتمل‌تر خاک موجود در آیین‌نامه (نوع زمین II و III) محاسبه شود و بیشترین مقدار آن برای محاسبات نیروی زلزله استفاده شود تا به این وسیله ضریب اطمینان مناسب نیز در محاسبات اعمال شود.

پس از محاسبه ضریب زلزله، نیروی جانبی حاصل از آن برای هر دو مد ضربه‌ای و انتقالی مخزن به دست آورده شد. برای محاسبه نیروی جانبی ناشی از جرم مد انتقالی نیز مطابق با یکی از آیین‌نامه‌های مربوط به مخازن یعنی آیین‌نامه زلاندنو [۲] از همان ضریب نیروی زلزله مربوط به کل سازه استفاده شده است. با توجه به نتایج تجربی که نشان‌گر نزدیک بودن نیروی جانبی حاصل از ترکیب جذر مربعات نیروهای مدهای ضربه‌ای و انتقالی به شرایط واقعی می‌باشد، این نیروها با این روش ترکیب می‌شود. همچنین با توجه به عدم مدلسازی خود مخزن، ترکیب این نیروها به صورت چهار نیروی جانبی در چهار سر ستون مخازن وارد شده و اثر لنگر حاصل از اعمال این بارها در محل اثرشان نیز به صورت نیروهای قائم فشاری و کششی در ستونهای سازه اعمال می‌شود.

سازه‌های نگهدارنده مخازن مورد بررسی دارای چهار ستون مشترک در محل تقاطع دو سیستم باربر جانبی در جهات مختلف بودند. از این رو باید اثر همزمان مؤلفه‌های زلزله در نظر گرفته شود. برای منظور کردن این اثر با توجه به خطی بودن شیوه تحلیل، اثر زلزله در هر جهت با ۳۰ درصد اثر زلزله در جهت عمود بر آن ترکیب شده است.

طبق آیین‌نامه فولاد ایران در سازه‌هایی که اعضای جانبی باربر آنها مانند قاب مهاربندی شده تا روی شالوده ادامه پیدا نمی‌کند، ستونهای متصل به مهاربندی باید دارای مقاومتی حداقل برابر با بارهای به دست آمده از ترکیبهای زیر باشند:

$$COMB_1 = D + 0.8\,L + 2.8E$$

$$COMB_2 = 0.85\,D + 2.8E$$

که در آن D، L و E به ترتیب بارهای مرده، زنده و زلزله می‌باشند. مقاومت ذکر شده در این حالت مقاومت نهایی برای ستونها می‌باشد. در ستونهایی که طراحی آنها باید بر اساس تنشهای مجاز باشد، این مقاومت ۱/۷ برابر مقاومت مجاز ستون در نظر گرفته شد. در مخزن بیمارستان شهید چمران این مشکل دیده می‌شود و مهاربندهای سازه در طبقه اول آن اجرا نشدند. اما ستونهای آن در شرایط معمول و حتی بدون در نظر گرفتن اثر فوق در حالت پر و نیمه‌پر بودن مخزن دچار مشکل بودند.

۵- تحلیل لرزه‌ای مخازن هوایی مورد بررسی

همان طور که در بخشهای قبل توضیح داده شد، برای بارگذاری سازه‌های مخازن هوایی سعی شد اثر هر دو مد نوسانی و ضربه‌ای لحاظ شود و برای نتایج نهایی از ترکیبات جذر مجموع مربعات آنها استفاده شد. این در حالی است که در گذشته و حتی اکنون در بیشتر طراحی‌های مربوط به این مخازن اثر این دو مد را به طور مجزا در نظر نمی‌گیرند و کل جرم مایع را به طور متمرکز در بالای آن فرض می‌کنند.

با توجه به اتصالات مفصلی میان اجزای سازه‌ای سازه‌های نگهدارنده و عملکرد محوری تیرها و مهاربندها، این سؤال مطرح بود که با توجه به یکپارچگی ستونها در این سازه‌ها و امکان انتقال لنگر در آنها، رفتار کلی سازه به چه شکل می‌باشد و تا چه اندازه به سیستم‌های خرپایی شباهت دارد و میزان لنگری که در ستونها با توجه به گیرداری اتصالات بالای ستونها به مخزن و یا اتصالات پایینی آنها به زمین به وجود می‌آید تا چه اندازه در رفتار آنها تأثیرگذار می‌باشد؟

در مقادیر نیروهای موجود در مهاربند و تیرها، تلاشهای کششی و فشاری کنترل کننده می‌باشند و خمش بسیار کمی ناشی از وزن خود عضو در آنها به وجود می‌آید. از میان سازه‌های نگهدارنده مخازن، سازه مخزن بیمارستان شهید چمران چنانچه از شکلهای مربوط به آن در بخش توضیحات کیفی می‌توان دید در طبقه اول خود دارای هیچ مهاربندی نمی‌باشد و همین امر باعث می‌شود نیروی جانبی وارد به سازه که در این تراز باید از طریق کشش ایجاد شده در این مهاربندها منتقل شود. این نیروها به علت عدم وجود مهاربندها در مسیر انتقال بار به صورت خمش در ستونها منتقل می‌شود، به طوری که در کنترلهای انجام شده اثر این خمش را می‌توان دید.

همچنین در ستونهای این سازه و سایر سازه‌ها به خاطر گیرداری اتصال بالایی آنها به مخزن و نیز یکپارچگی ستونها مقداری لنگر در آنها می‌افتد که مقدار آن برای ستونهای تراز بالایی و پایینی سازه نسبت به سایر ستونهای آن بیشتر می‌باشد. نکته جالبی که در این میان وجود دارد کم اثر بودن گیرداری و یا مفصلی بودن اتصال انتهایی سازه به زمین در نتیجه ارتعاش آزاد می‌باشد و این مطلب را می‌توان با مقایسه پریودهای اصلی سازه‌های نگهدارنده مخازن کارخانه خمیرمایه و روستای باباپشمان- که در اجرای آنها مشکلات حادی مانند عدم اجرای مهاربندها در بعضی طبقات سازه دیده نمی‌شود- و نیز نوع تغییرشکل و مقایسه تلاشهای موجود در اجزای سازه (در نمودارهای آتی) در حالتهای پر و نیمه‌پر نشان داد. چنانچه دیده می‌شود این پریودها برای حالتهای مشابه و با اتصالات گیردار و مفصلی تکیه‌گاه تقریباً یکسان می‌باشند، جدول (۲).

در میان سازه‌های فوق، تنها پریود اصلی سازه نگهدارنده مخزن بیمارستان شهید چمران در حالات تکیه‌گاه گیردار و مفصلی تفاوت می‌کند که این موضوع اثر خود را به صورت تغییراتی در نیروهای وارد به سازه در حالات مخزن پر و نیمه‌پر نیز نشان داده است. در شکل (۲) نیز نمایی از سازه‌های نگهدارنده مخازن مورد بررسی که در آن شماره‌گذاری اجزاء این سازه‌ها نشان داده شده است.

***جدول (۲)**: مقادیر پریود مخازن مورد بررسی در حالات مختلف بر حسب ثانیه.*

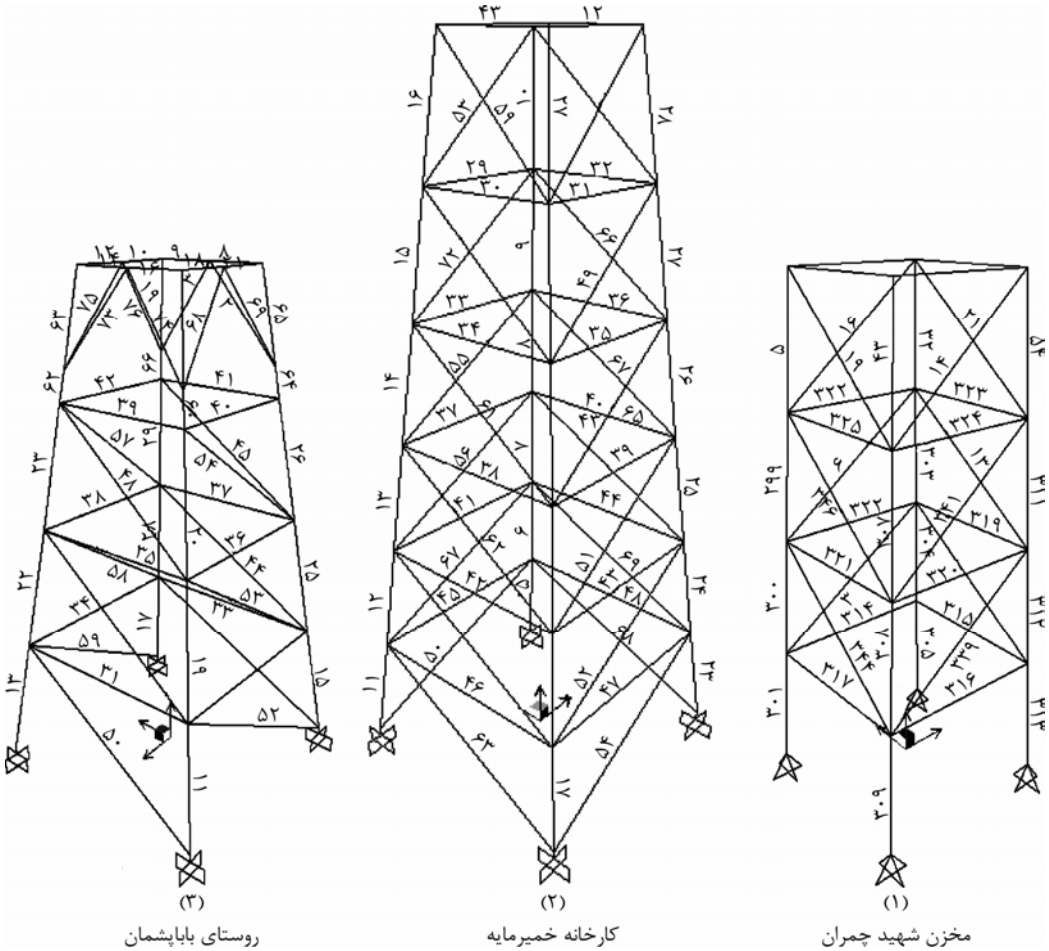
مخزن هوایی	تکیه‌گاه مفصلی			تکیه‌گاه گیردار		
	خالی	نیمه‌پر	پر	خالی	نیمه‌پر	پر
بیمارستان چمران	۰/۵۸	۱/۲۳	۱/۶	۰/۳۳	۰/۷۸	۱/۰۱
روستای باباپشمان	۰/۲	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۲	۰/۳۷	۰/۴۸
کارخانه خمیرمایه	۰/۴	۰/۸۶	۱/۱۹	۰/۴	۰/۸۶	۱/۱۹

۶- بررسی نتایج

در این قسمت به ارائه و بررسی نتایج حاصل از کنترل سازه‌های نگهدارنده مخازن اشاره شده در جدول (۱) در حالات پر و نیمه پر با روش تنش مجاز پرداخته شده است. قابل ذکر است این بررسی به صورت مجزا برای هر یک از اجزای اصلی باربر سازه صورت گرفته است.

۶-۱- کنترل رفتار مهاربندها

در مهاربندهای این سازه‌ها همگی از میلگردهای فولادی استفاده شده که به علت لاغری بسیار زیاد هیچ گونه مقاومتی در برابر نیروهای فشاری از آنها مورد انتظار نیست و به سرعت دچار کمانش شدند و تنها در کشش رفتار مناسبی دارند.



شکل (۲): *شماره‌گذاری اعضای سازه‌های نگهدارنده مخازن شهید چمران، کارخانه خمیرمایه و روستای باباپشمان.*

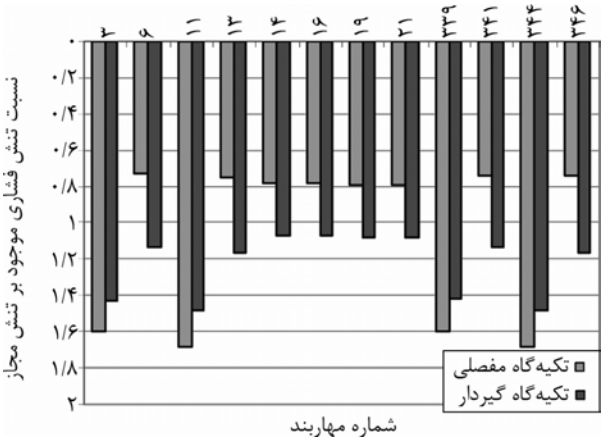
مهاربندهای ضربدری در صورتی رفتار مناسبی در بارهای سیکلی و بار زلزله خواهند داشت که هم در کشش دچار تسلیم شوند و هم در عملکرد فشاری خود دچار کمانش غیرارتجاعی شده و رفتاری غیرخطی از خود نشان دهند و این مطلب در مهاربندهای نسبتاً لاغر ($۱۱۰ > \lambda > ۸۰$ که در آن λ ضریب لاغری می‌باشد) اتفاق می‌افتد. متأسفانه مهاربندهای خیلی لاغر همان‌گونه که از منحنی هیسترزیس آنها پیداست در فشار دچار رفتار غیرخطی نمی‌شوند و استهلاک انرژی مناسبی در مقابل بارهای وارده ندارند.

همان‌گونه که در شکلهای (۳) تا (۵) دیده می‌شود، نتایج حاصل از کنترل تنش مجاز مهاربندهای سازه‌های نگهدارنده مخازن فوق را به ترتیب زیر می‌توان بیان نمود:

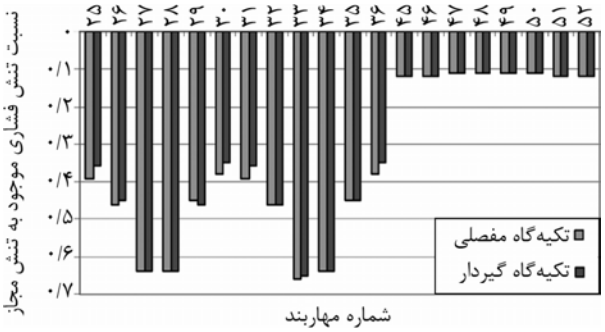
۶-۱-۱- مخزن بیمارستان شهید چمران

- هیچ یک از مهاربندهای مخزن بیمارستان شهید چمران در حالت نیمه‌پر و با اکتساب تکیه‌گاه گیردار شرایط مناسب و ظرفیت مقاومت کششی لازم را نداشتند. خرابیهای ایجاد شده در سازه نگهدارنده این مخزن نیز مؤید این مطلب بود، شکل (۳).
- در شرایط تکیه‌گاه مفصلی و بارگذاری معادل حالت گیرداری نیز هیچ یک از مهاربندها نسبت تنش مجاز مناسب را ارضاء نمی‌کردند. اما در حالت تکیه‌گاه مفصلی با توجه به کاهش نیروهای جانبی سازه، که ناشی از افزایش پریود سازه و کم شدن ضریب بازتاب سازه در این حالت بود، به جز مهاربندهای تراز پایینی سازه بقیه آنها شرایط مناسبی پیدا کردند، شکل (۳).
- نیرو در مهاربندهای تراز دوم سازه در حالت تکیه‌گاه مفصلی نسبت به حالت گیردار، افزایش بسیار زیادی پیدا کرد که ناشی از عدم وجود مهاربندهای تراز اول آن بود. از مقایسه این حالات می‌توان دریافت که در شرایط تکیه‌گاه مفصلی عدم گذاردن مهاربندها در تراز پایینی آن، شرایط بحرانی‌تری را نسبت به حالتی که

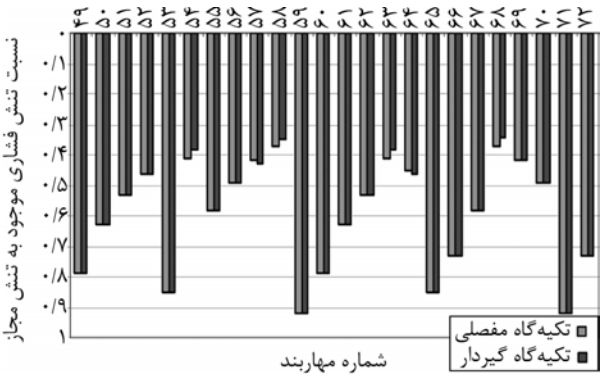
تکیه‌گاههای سازه گیردار می‌باشند، ایجاد می‌کند، که این امر می‌تواند به علت بیشتر بودن نقش خمش ستونها در باربری سازه در حالت تکیه‌گاه گیردار باشد، شکل (۳).



شکل (۳): *نسبتهای تنش فشاری موجود به تنش مجاز حاصل از کنترل مهاربندهای مخزن بیمارستان شهید چمران در حالت نیمه‌پر.*



شکل (۴): *نسبتهای تنش فشاری موجود به تنش مجاز حاصل از کنترل مهاربندهای مخزن روستای باباپشیمان در حالت نیمه‌پر.*



شکل (۵): *نسبتهای تنش فشاری موجود به تنش مجاز حاصل از کنترل مهاربندهای مخزن کارخانه خمیرمایه در حالت نیمه‌پر.*

- در حالت مخزن پر نیز نتایج تحلیل به ما نشان داد که وضعیت دقیقاً مشابه حالت نیمه‌پر می‌باشد و فقط میزان نسبت تنش مجاز اعضاء افزایش می‌یابد و هیچ یک از آنها جوابگوی میزان مقاومت مناسب نبودند.

۶-۱-۲- مخزن روستای باباپشمان

- در مخزن روستای باباپشمان مهاربندهای آن، در دو حالت تکیه‌گاه مفصلی و گیردار، وضعیت مناسبی را از حیث مقاومت داشتند و یکی از مشکلات آنها از مهاربندی نامتعارف بالاترین دهانه لاغری بسیار زیادشان بود، شکل (۴).
- در این مخزن به دلیل وجود شیب در ارتفاع سازه در ترازهای پایینی سازه شیب مهاربندهای آن نسبت به افق کمتر می‌شود و همین امر می‌تواند دلیل کاهش نیروی مهاربندهای این سازه در ترازهای پایینی باشد که تقریباً با رشد ثابتی انجام گرفته و در جای خود در طراحی این اعضاء قابل اهمیت است، شکل (۴).
- در این سازه در بالاترین دهانه از مهاربندهای واگرا با مقاطع لوله‌ای استفاده شده بود که هیچ تناسبی با مهاربندهای دیگر سازه نداشته و پیکربندی عجیب آن می‌توانست مشکلات زیادی برای سازه مخزن خصوصاً ستونهای آن در بالاترین دهانه ایجاد نماید.
- در حالت مخزن پر نیز شرایط به گونه‌ای مشابه بود و تنها سطح تنشهای ایجاد شده در اعضاء تقریباً به یک نسبت ثابت افزایش می‌یافت. این امر باعث شد مهاربندهای تراز دوم از بالای سازه وضعیت نامناسبی پیدا کنند.

۶-۱-۳- مخزن کارخانه خمیرمایه

- در مخزن کارخانه خمیرمایه نیز چنانچه در شکل (۵) دیده می‌شود، وضعیت مهاربندها در حالت نیمه‌پر مناسب بود و میزان تنشهای موجود در مهاربندها از ۹۰ درصد ظرفیت مجاز در تراز بالایی شروع می‌شد و با آهنگی نسبتاً ثابت کاهش می‌یافت. علت این امر نیز به دلیل کم شدن شیب مهاربندها در ارتفاع سازه با رفتن به سمت ترازهای پایینی بود.

• در حالت مخزن پر نیز با افزایش نیروها، مهاربندهای سازه در سه تراز بالایی شرایط بحرانی پیدا می‌کردند. این امر می‌توانست مؤید آسیب وارده به این مهاربندها و گسیختگی آنها در این زلزله باشد. میزان کاهش نیرو در مهاربندها نیز مشابه حالت قبل بود.

۶-۲- کنترل رفتار تیرها

همان گونه که در شکلهای (۶) تا (۸) دیده می‌شود، نتایج حاصل از کنترل تنش مجاز تیرهای سازه‌های نگهدارنده مخازن فوق را می‌توان به ترتیب زیر بیان نمود:

۶-۲-۱- مخزن بیمارستان شهید چمران

• در این مخزن، مقاطعی که برای تیرها انتخاب شده بود با در نظر گرفتن طول آنها، همگی از نظر پایداری، لاغر محسوب می‌شدند، اما از نظر وضعیت تنش در حالت نیمه‌پر در وضعیت مناسبی قرار داشتند و چه در حالت مفصلی و چه در حالتهای گیردار، مقاطع آنها برای فشار مورد نظر کفایت می‌کرد، شکل (۶).

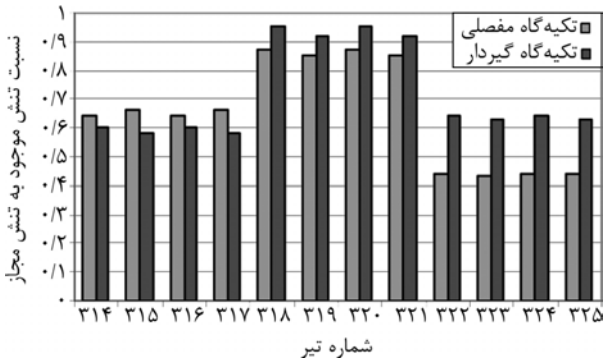
• در حالت پر، به استثناء تیرهای تراز بالای سازه، بقیه تیرها شرایط بحرانی داشتند.

• در حالت سازه تکیه‌گاه مفصلی و بارگذاری به دست آمده از شرایط تکیه‌گاه گیردار، طبیعتاً شرایط نامناسبی در تیرها حاکم گردید. در حالت مخزن پر نیز هیچ یک از تیرهای سازه وضعیت مناسبی نداشتند و در حالت نیمه‌پر، تیرهای تراز میانی سازه وضعیت نامناسبی پیدا کردند.

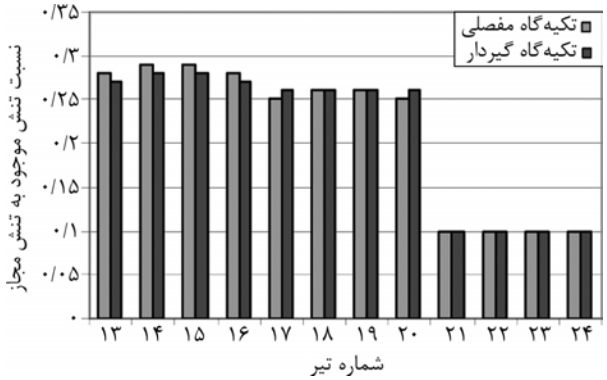
۶-۲-۲- مخزن روستای باباپشمان

• در این مخزن، وضعیت تیرها چه در حالت پر و چه در حالت نیمه‌پر مناسب بود و میزان نسبت تنش موجود به تنش مجاز آنها، تنها در حالت پر و در طبقات میانی سازه از ۰/۵ تجاوز می‌کرد، شکل (۷).

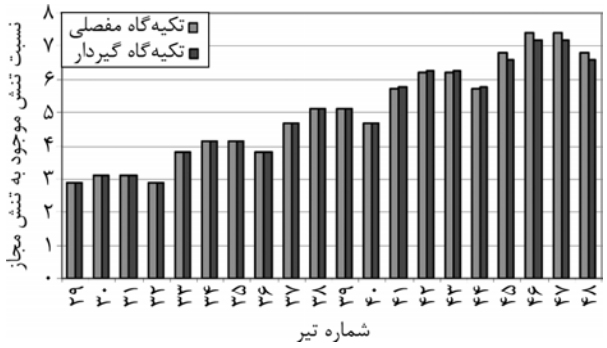
• با توجه به شیب موجود در سازه، طول تیرهای هر تراز به مرور با کاهش ارتفاع مربوطه در سازه افزایش می‌یابد که این امر باعث می‌شود تیرهای تراز پایینی در این مخزن از نظر پایداری لاغر محسوب شوند، شکل (۷).



شکل (۶): *نسبتهای تنش موجود به تنش مجاز حاصل از کنترل تیرهای مخزن بیمارستان شهید چمران در حالت نیمه‌پر.*



شکل (۷): *نسبتهای تنش موجود به تنش مجاز حاصل از کنترل تیرهای مخزن روستای باباپشمان در حالت نیمه‌پر.*



شکل (۸): *نسبتهای تنش موجود به تنش مجاز حاصل از کنترل تیرهای مخزن کارخانه خمیرمایه در حالت نیمه‌پر.*

۶-۲-۳- مخزن کارخانه خمیرمایه

• در تیرهای سازه نگهدارنده مخزن کارخانه خمیر مایه به علت استفاده از مقطع ناودانی تک برای آنها (*UNP18*) که از نظر ظرفیت مناسب نیرو تناسبی با سایر اجزای سازه نداشت، تمام تیرهای آن در حالت نیمه پر و پر بودن مخزن علاوه بر جوابگو نبودن مقادیر ضریب لاغری، دارای مقاومت مناسب نیز نبودند، شکل (۸).

۶-۳- کنترل رفتار ستونها

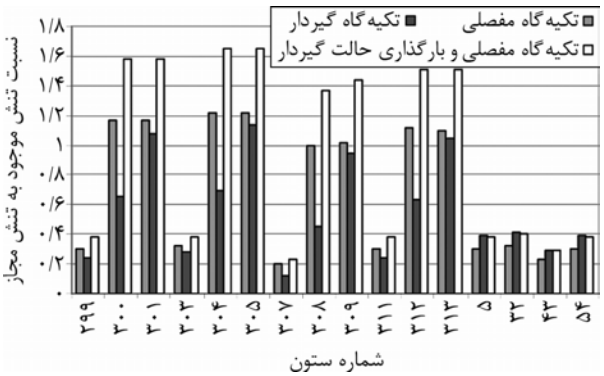
همان گونه که در شکلهای (۹) تا (۱۱) دیده می‌شود، نتایج حاصل از کنترل تنش مجاز ستونهای سازه‌های نگهدارنده مخازن فوق را به ترتیب زیر می‌توان بیان نمود:

۶-۳-۱- مخزن بیمارستان شهید چمران

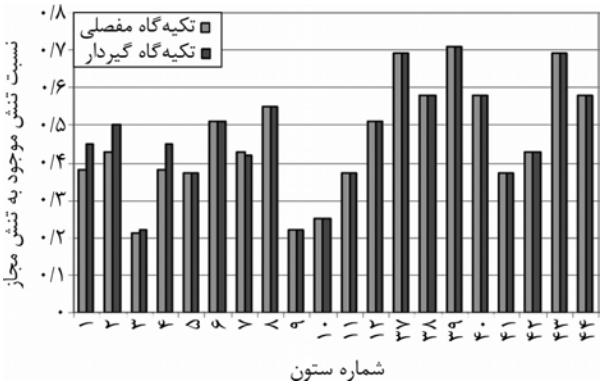
- در سازه مخزن بیمارستان شهید چمران به علت عدم وجود مهاربندها در تراز پایینی سازه، مقدار لنگر ایجاد شده در ستونهای طبقه اول سازه نسبت به حالت معمول بیشتر بود. آیین‌نامه ایران نیز برای یک چنین حالتی تمهیداتی را برای قویتر کردن ستونهای این طبقه در نظر گرفته که در این سازه رعایت نشده بود.
- در حالتی که سازه با تکیه‌گاه گیردار فرض شد ستونهای طبقه اول سازه در حالت مخزن نیمه‌پر، جوابگوی میزان مقاومت مورد نیاز نبود. سهم لنگر در بحرانی شدن این ستونها به حدود ۸۰ درصد رسید و عملاً این ستونها برای بار فشاری خالص مشکل خاصی نداشت. سهم لنگر برای سایر ستونها متغیر بود، شکل (۹).
- در حالتی که سازه با تکیه‌گاه مفصلی در نظر گرفته شد، وضعیت بحرانی‌تر از حالت قبل بود. در این حالت ستونهای طبقات اول و دوم بحرانی گردیدند و سهم لنگر در رسیدن این ستونها به تنش مجاز به بیش از ۸۵ درصد رسید که با توجه به عدم وجود مهاربندها در طبقه اول و نقش بیشتر عملکرد خمشی سازه نسبت به حالت گیرداری آن، می‌توان نتیجه گرفت که با مفصلی شدن تکیه‌گاههای گیردار در این سازه، ظرفیت باربری سازه افت کرده و ستونها زودتر به حد بحرانی رسیدند و این امر با در خمش افتادن بیشتر ستونهای سازه در این حالت صورت گرفته بود.
- در حالت مخزن پر نیز وضعیت مشابه بود و فقط نسبت تنش اعضاء افزایش می‌یافت. ضمناً به غیر از ستونهای طبقه اول سازه در حالت تکیه‌گاه گیردار، بقیه ستونها دچار حالت بحرانی نگردیدند.
- از این شرایط می‌توان نتیجه گرفت که عدم وجود مهاربندها در پایین‌ترین دهانه سازه، وضعیت را برای ستونهای طبقه اول و دوم به شدت بحرانی کرده و توازن تنشهای موجود در اعضاء را به هم زد.

۶-۳-۲- مخزن روستای باباپشمان

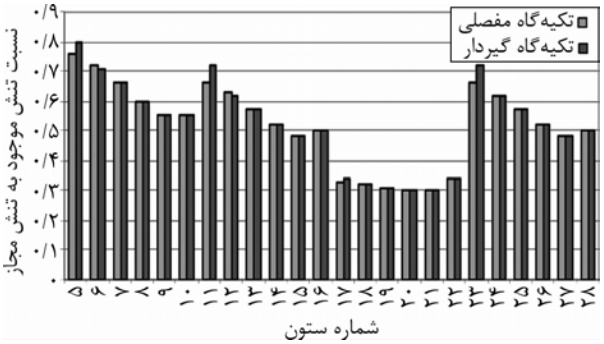
- در سازه نگهدارنده مخزن روستای باباپشمان وضعیت ستونها در حالت نیمه‌پر خوب بودند و عملکرد مناسبی داشتند، اما در حالت مخزن پر ستونهای تراز بالایی سازه به حالت بحرانی رسیدند و ستونهای زیرین آنها نیز به حد بحرانی نزدیک شدند. علت این امر را می‌توان در شکل غیرعادی مهاربندی‌های تراز بالایی سازه دانست، شکل (۱۰).



شکل (۹): *نسبتهای تنش موجود به تنش مجاز حاصل از کنترل ستونهای مخزن بیمارستان شهید چمران در حالت نیمه‌پر.*



شکل (۱۰): *نسبتهای تنش موجود به تنش مجاز حاصل از کنترل ستونهای مخزن روستای باباپشمان در حالت نیمه‌پر.*



شکل (۱۱): *نسبتهای تنش موجود به تنش مجاز حاصل از کنترل ستونهای مخزن کارخانه خمیرمایه در حالت نیمه‌پر.*

۶-۳-۳- مخزن کارخانه خمیرمایه

- ستونهای مخزن کارخانه خمیرمایه نیز در حالت مخزن نیمه‌پر دارای وضعیت مناسبی بودند اما در حالت پر بودن مخزن، ستونهای دو تراز پایینی مخزن همگی حالت بحرانی پیدا کردند، شکل (۱۱).
- نقش لنگر در عملکرد ستونهای این سازه البته به جز ستونهای تراز بالایی آن کم بود، که می‌تواند نشان‌گر عملکرد خرپایی آن باشد.

۷- نتیجه‌گیری

نتایجی که از این تحقیق مقدماتی حاصل شد، نشان داد:

- نتایج حاصل از بررسی سازه‌های مخازن هوایی موجود در زلزله درب آستانه سیلاخور حتی با روشهای طراحی معمول آیین‌نامه‌ای، بسیاری از آسیبهای وارده به مخازن را در زلزله تأیید می‌کند. گسیختگی تعدادی از مهاربندهای مخزن بیمارستان چمران و نیز گسیختگی مهاربند بالاترین تراز مخزن کارخانه خمیرمایه از این نمونه‌ها هستند. البته این امر به هیچ وجه به مفهوم نفی روشهای دقیق تحلیل لرزه‌ای همچون روش تحلیل سه بعدی لرزه‌ای با مدلهای پیشرفته غیرخطی نمی‌باشد، بلکه تأکید بر این مطلب است که در صورت طراحی و اجرای دقیق این سازه‌ها حتی با استفاده از روشهای ساده و مقدماتی مبتنی بر نیرو بسیاری از این آسیبها رخ نمی‌داد. در هر حال با توجه به لزوم عملکرد بدون وقفه این مخازن بعد از وقوع زلزله، استفاده از آیین‌نامه‌های ویژه برای این سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد.
- در مهاربندهای این سازه‌ها اکثراً از میلگرد استفاده شده که به علت لاغری بسیار زیاد ظرفیت فشاری زیادی از آنها مورد انتظار نیست. آنها به سرعت دچار کمانش شده، عملاً مقاومت فشاری بسیار ناچیزی داشته و تنها در کشش رفتار مناسبی دارند. مهاربندهای ضربدری در صورتی رفتار مناسبی در بارهای سیکلی و بار زلزله خواهند داشت که هم در کشش و هم در فشار رفتار خوبی از خود نشان دهند.
- مشکلات اجرایی موجود و همین‌طور عدم نگهداری مناسب این سازه‌ها باعث تغییر در رفتار مورد انتظار از سازه و ایجاد تلاشهای غیر قابل پیش‌بینی در اعضاء می‌شود. این مطلب چنانچه در مخزن بیمارستان چمران دیده می‌شود به علت عدم وجود مهاربند در پایین‌ترین دهانه سازه، نگهدارنده مخزن سبب بحرانی شدن رفتار ستونهای پایینی گردید.

۸- مراجع

۱. سروقدمقدم، عبدالرضا و همکاران (۱۳۸۵). *گزارش شناسایی زلزله ۸۵/۱/۱۱ دشت درب آستانه سیلاخور*، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

2. Priestley, M.J.N. et al (1986). Seismic design of storage tanks, Recommendations of a Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering.

3. Eshghi, S. and Razzaghi, M.S. (2007). Performance of cylindrical liquid storage tanks in Silakhor, Iran Earthquake of March 31, 2006, NZ Society of Earthquake Engineering Bulletin, **40**(4), 173-182.

4. Jaiswall, O.R. et al (2001). Review of Code Provisions on Seismic Design Forces for Liquid Storage Tanks, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur.

۵. ادیبی، مهدی و عشقی، ساسان (۱۳۸۵). پیشنهاد ضریب رفتار برای مخازن هوایی فولادی بر اساس عملکرد آنها در زلزله ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ سیلاخور، *پنجمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله*، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۶. عشقی، ساسان و ادیبی، مهدی (۱۳۸۷). بررسی عملکرد بستهای قورباغه‌ای در رفتار مخازن هوایی فولادی در برابر زلزله، *مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز*، (۳)**۳۸**، ۵۱-۵۶.