

آسیب‌های سقف‌های شناور تک‌لایه مخازن ذخیره مایع تحت اثر زلزله و برآورد تنش‌های لرزه‌ای در آن‌ها

محمدعلی گودرزی، استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،

E-mail: m.a.goodarzi@iiees.ac.ir

چکیده: در این مقاله بررسی رفتار لرزه‌ای سقف شناور تک‌لایه (single deck floating roof storage tank) مخازن ذخیره مایع مد نظر قرار گرفته است. در ابتدا نحوه خرابی‌های احتمالی در این نوع سقف‌های شناور مرور و جمع‌بندی تجربیات زلزله‌های قبلی در این زمینه ارائه شده است. سپس اثرات کمی مدهای حرکتی سیال بر میزان تنش‌های لرزه‌ای مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در نهایت، روند طراحی این نوع سقف‌ها در مقابل بارهای لرزه‌ای ارائه شده است. در روند طراحی لرزه‌ای ارائه شده اثر مدهای حرکتی سیال به‌صورت جداگانه لحاظ شده و در نهایت با یکدیگر ترکیب می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: سقف شناور تک لایه، مخازن ذخیره مایع، زلزله، طراحی لرزه‌ای

1 - مقدمه

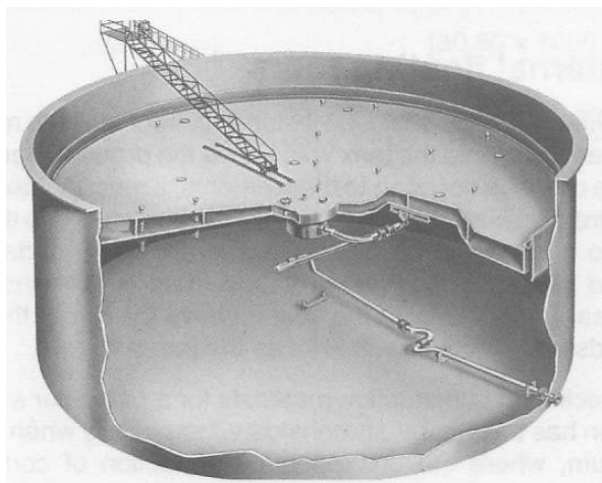
مخازن ذخیره مایع دارای سقف شناور مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این‌رو لازم است ابتدا توضیحاتی در خصوص سقف‌های شناور ارائه گردد. مخازن به لحاظ سیستم سقف مورد استفاده به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: (1) مخازن با سقف ثابت (fixed floating roof storage tank) و (2) مخازن با سقف شناور (floating roof storage tank).

وظیفه سقف ثابت، جلوگیری از اثرات جوی ناشی از باد و باران و اختلاط آن با مایع داخل مخزن است. مخازن با سقف ثابت برای ذخیره مایعات فرار مناسب نیستند. خروج مایع از طریق عمل تبخیر به لحاظ اقتصادی و محیط‌زیست مقرون‌به‌صرفه نیست. سقف شناور تا حد زیادی از تبخیر و خروج مایعات جلوگیری می‌کند. این نوع سقف که به‌صورت شناور بر روی سطح آزاد مایع قرار داده می‌شود، همواره با مایع در تماس بوده و به همراه آن بالا و پایین می‌رود و از این طریق از بخار شدن مایع جلوگیری به عمل می‌آورد.

سقف شناور مخازن با استفاده از نیروی شناوری می‌تواند بر روی مایع باقی بماند و با آن حرکت کند. معمولاً اندازه قطر

حفظ پایداری مخازن ذخیره مایع در هنگام اعمال بارهای لرزه‌ای و تأمین عملکرد مناسب این سازه‌ها پس از وقوع زلزله از جمله مسائل حیاتی در کاهش خطرات لرزه‌ای است. خرابی مخازن ذخیره مایع فولادی عموماً به شکل کمانش جداره مخزن، خرابی ناشی از نشست نامتقارن پی مخزن، خرابی اتصالات ورودی و خروجی مخزن در اثر لغزش افقی مخزن، بلند شدگی مخازن مهار نشده و خرابی‌های ناشی از امواج سطحی رخ می‌دهد. اگرچه نحوه خرابی‌های مذکور تا حد زیادی توسط محققین آشکار شده است ولیکن در برخی موارد نیز هنوز اجماع مشخصی بین محققین وجود ندارد و نیاز به تحقیقات بیشتری در این‌گونه موارد کاملاً مشهود است. به‌عنوان مثال، تبیین اثرات ناشی از حرکت‌های بزرگ سطح آزاد سیال در هنگام اعمال بارهای لرزه‌ای از جمله مسائلی است که به‌رغم اهمیت آن، هنوز نیاز به مطالعات تکمیلی فراوانی دارد. در این مقاله، موضوع حرکت سیال در ناحیه بالایی مخزن و اثرات ناشی از آن در

است. این تیغه‌ها فضای خالی داخلی در بین دو ورق ایجاد می‌کنند که این فضاهای خالی وظیفه اصلی شناوری سقف را به عهده دارند. این نوع سقف صلبیت بیشتری نسبت به سقف تک‌لایه داشته و به لحاظ مهندسی در مقابل بارهای وارده مطمئن‌تر است؛ اما درعین حال سنگین‌تر بوده و هزینه آن نیز بیش‌تر است.



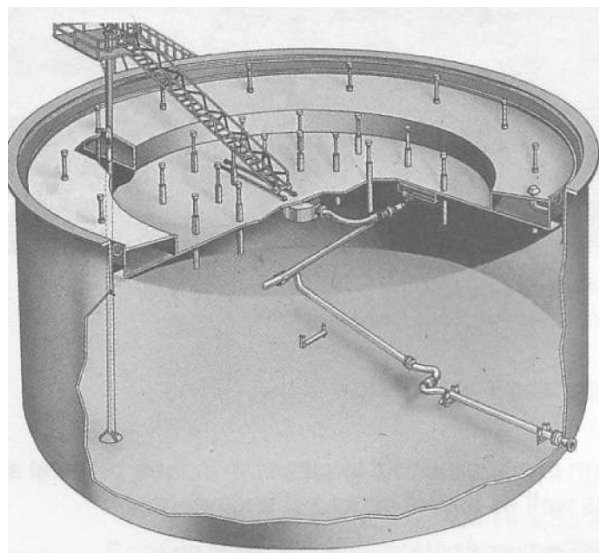
شکل (2): نوع دولایه سقف شناور خارجی.

2 - آسیب‌های لرزه‌ای سقف شناور در هنگام زلزله

سقف شناور مخازن غالباً در اثر حرکت‌های سطح سیال دچار آسیب لرزه‌ای می‌شوند. حرکت رفت و برگشتی قسمت بالایی سیال داخل مخزن سرمنشأ تشکیل امواج سطحی و حرکت سقف شناور است. این بخش از سیال با پیرودی به مراتب بزرگ‌تر از پیرودی طبیعی سازه‌های معمول ارتعاش می‌کند؛ بنابراین زلزله‌هایی که شامل پالاس‌های با پیرودی طولانی حرکت زمین هستند، دارای تأثیر بسزایی در تحریک سقف‌های شناور می‌باشند. نمونه‌ای از این زلزله‌ها، زلزله مکزیکوسیتی، زلزله چی-چی در تایوان، زلزله کوکالی در ترکیه و زلزله توکاشی-اوکی در ژاپن است. در دو زلزله آخر به دلیل وجود مراکز صنعتی در منطقه، آسیب‌های جدی به مخازن ذخیره مایع وارد گردید. در این دو زلزله، مخازن ذخیره مایع با سقف شناور دچار آسیب‌های جدی شدند. در ژاپن تجربه خرابی مخازن ذخیره مایع با سقف شناور در زلزله‌های نیگاتا (1964) و

سقف شناور حدود 40 سانتیمتر کم‌تر از مقدار قطر مخزن در نظر گرفته می‌شود تا سقف شناور بتواند به‌طور آزادانه در جهت افقی حرکت کند. فضای خالی بین دیواره مخزن و سقف شناور به وسیله نوعی سیستم آب‌بندی خاص پر می‌شود. این سیستم انعطاف‌پذیر وظیفه نگه‌داشتن سقف شناور در مرکز مخزن را نیز به عهده دارد. علی‌رغم وجود تنوع در سقف‌های شناور، سقف شناور تک‌لایه در شکل (1) و سقف شناور دولایه (double deck floating roof storage tank) که در شکل (2) نشان داده شده، مهم‌ترین سقف‌های شناور مورد استفاده‌اند.

سقف شناور تک‌لایه متشکل از یک لایه شعاعی جعبه‌ای شکل در محیط سقف (موسوم به پانتون) و یک ورق فلزی در ناحیه مرکزی تشکیل شده است. محوطه پانتون کناری به‌صورت یک فضای بسته، وظیفه شناوری سقف را به عهده دارد؛ درحالی‌که ضخامت ورق میانی در حدود 4 تا 6 میلی‌متر است و انعطاف‌پذیری قابل‌توجهی از خود نشان می‌دهد. این نوع سقف معمولاً برای مخازن تا قطر 65 متر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (1): نوع تک‌لایه سقف شناور خارجی.

سقف شناور دولایه از دو لایه ورق فولادی تشکیل شده که در فاصله مشخصی از یکدیگر قرار گرفته‌اند. فاصله بین ورق بالایی و پایینی به وسیله یک سری تیغه‌های قائم فلزی که به‌صورت محیطی و شعاعی قرار گرفته‌اند، پوشیده شده

مکانیسم خرابی سقف مخازن شناور تا حدی مشخص شده است. سقف شناور تک‌لایه بیشتر در معرض خرابی‌های لرزه‌ای قرار دارند. در این نوع سقف‌ها، تنش‌های خمشی بزرگی ناشی از حرکت‌های بزرگ سیال در صفحه عمود بر حرکت زلزله ایجاد می‌شود. در اثر این تنش‌ها، کمانش‌های موضعی در سقف شناور رخ می‌دهد. نمونه‌های زیادی از این نوع خرابی در زلزله توکاشی - اوکی مشاهده شده است، شکل (5).



شکل (5): مخازن با سقف شناور که در اثر حرکت امواج سطحی و تنش‌های خمشی به وجود آمده دچار کمانش موضعی در ناحیه پیرامونی شده‌اند [4].

در برخی دیگر از سقف‌های شناور، تنش‌های خمشی ناشی از حرکت‌های سقف و سیال، باعث پاره شدن اتصالات جوشی و سوراخ شدن نواحی محیطی سقف شناور می‌شود، شکل (6). این خرابی‌های موضعی در برخی موارد باعث خروج نفت از مخزن و نفوذ آن بر روی سقف شناور می‌شود، شکل (7). در برخی موارد نیز سقف شناور مخازن به‌طور کامل در داخل مایع غرق می‌شود، شکل (8). دلیل غرق شدن سقف‌ها، می‌تواند وقوع خرابی‌های موضعی در داخل سقف و یا نفوذ مایع از سیستم‌های آب‌بندی کناری باشد که در اثر حرکت ناشی از امواج سطحی با ارتفاع بزرگ و عدم کفایت این سیستم‌ها رخ می‌دهد. با توجه به موارد فوق‌الذکر می‌توان عنوان کرد که خسارات لرزه‌ای وارد به مخازن با سقف شناور به لحاظ اقتصادی بسیار قابل‌توجه بوده و در برخی موارد غیرقابل جبران است.

نیهونکایی - چوبا (1983) نیز وجود داشت که در هر دو مورد منجر به آتش‌سوزی‌های خطرناک در بالای مخازن ذخیره با سقف شناور گردید؛ اما در زلزله توکاشی - اوکی (2003) این خسارات بسیار سنگین‌تر از قبل بود. در این زلزله، خرابی در بیش از 190 مخزن ذخیره در قسمت جنوبی ایالت هوکایدو مشاهده شد. در اطراف شهر توماکومایی در همین ایالت نیز 170 مخزن آسیب دیدند که این مخازن معادل 58 درصد از کل مخازن موجود بودند. در بین مخازن مذکور، 9 مخزن با سقف شناور به‌طور بسیار جدی مورد آسیب قرار گرفته بود که در دو مخزن از 9 مخزن آسیب‌دیده، آتش‌سوزی بسیار بزرگی به وقوع پیوست، شکل (3). در هفت مخزن باقیمانده نیز، سقف مخازن شناور در مایع غرق شدند، شکل (4).



شکل (3): آتش‌سوزی در مخزن واقع در پالایشگاه هوکایدو در شهر توکاشی ژاپن [4].



شکل (4): نوع دو لایه سقف شناور خارجی [4].

در آیین نامه آمریکا (API 650) مقرراتی برای بارهای وارد به سقف شناور مخزن عنوان شده است که بیشتر دربرگیرنده شرایط کلی شناوری سقف و میزان بارهای متمرکز وارد بر آن در هنگام بهره‌برداری است؛ اما در خصوص تحلیل لرزه‌ای سقف مخازن شناور و میزان بارهای وارده به آن ضوابط خاصی ارائه نشده است؛ زیرا تحقیقات انجام شده در این خصوص بسیار اندک بوده و استخراج نتیجه کلی برای استفاده در همه مخازن، نیاز به مطالعات وسیع‌تری دارد.

مشخص کردن پارامترهای اثرگذار بر رفتار دینامیکی سقف‌های شناور و همچنین باز توزیع تنش‌های ایجاد شده در آن‌ها و به‌طور کلی وجود اثرات ناشی از وجود سقف شناور در باز توزیع نیروهای سیال، از جمله مواردی است که باید مورد مطالعه بیشتر قرار گیرد. اثرات غیرخطی حرکت سیال نیز از جمله مواردی است که باید در برآورد ارتفاع آزاد مایع مورد توجه قرار گیرد. در ادامه، برخی از تحقیقات موجود در این زمینه به‌طور مختصر تشریح می‌گردد.

3 - تحقیقات لرزه‌ای انجام شده در رابطه با سقف‌های شناور

معمولاً آیین‌نامه‌ها سقف شناور را به‌عنوان یک المان غیرسازه‌ای در نظر می‌گیرند؛ اما با توجه به خرابی‌های اشاره شده در قسمت قبل، باید توجه کرد که برآورد تنش‌ها در داخل سقف شناور و اطمینان از مقاومت کافی مخازن از جمله موارد مهم و ضروری در کنترل خرابی‌های لرزه‌ای این مخازن است. برای برآورد تنش‌های به وجود آمده در داخل سقف شناور، لازم است که اندرکنش سقف انعطاف‌پذیر و سیال موجود در داخل مخزن در نظر گرفته شود.

تحقیقات اولیه در زمینه بررسی تئوریک پدیده حرکت امواج در تماس با سقف شناور در ژاپن انجام شده است [1، 2]. این تحقیقات پس از وقوع زلزله نیگاتا (1964) و وقوع گسترده خرابی مخازن ذخیره مایع با سقف شناور انجام شد. در این تحقیقات، سقف شناور به‌صورت یک صفحه صلب در نظر گرفته شد و از تئوری پتانسیل خطی برای محیط سیال استفاده شد.



شکل (6): پاره شدن اتصالات ورق‌های پایینی و ورق لبه‌ای سقف خزینه در اثر تنش‌های وارد به سقف شناور [4].



شکل (7): پخش شدن مایع و نفوذ آن بر روی سقف شناور مخزن نفت [4].



شکل (8): غرق شدن سقف شناور و فرو رفتن آن بعد از زلزله توکاشی-اوکی [4].

بود که توسط تعدادی سیلندر هوای بزرگ مقیاس و با اعمال فشار بر روی سقف شناور انجام گرفت.

پارهای از آزمایش‌های دیگری که توسط این گروه انجام شد بر روی مدل‌های با مقیاس آزمایشگاهی بود که این مطالعات نشان داد که فرمول‌های تجربی پیشنهاد شده برای برآورد اثرات غیرخطی حرکت سیال، به طرز مناسبی با نتایج آزمایش‌ها همخوانی دارد. محققین دیگری که به مطالعه در خصوص رفتار دینامیکی سقف‌های شناور پرداخته‌اند، به سرپرستی یوشیدا در مرکز مدیریت ریسک و ایمنی (Center for Risk Management and Safety Sciences) کشور ژاپن است. این گروه بر مبنای تخصص خود، بیشتر بر توسعه تحلیل‌های تئوریک و بررسی و تحلیل تنش‌ها در داخل سقف‌های شناور تمرکز یافتند. این گروه، بیشتر کمانش خود سقف شناور را به‌عنوان عضو سازه‌ای جداگانه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در خصوص رفتار کمانشی سقف‌های شناور با استفاده از روش کاهش سختی به مطالعه پرداختند. یکی از فرضیه‌های قابل قبول برای غرق شدن سقف‌های شناور این بود که سقف شناور به دلیل ایجاد تنش‌های ناشی از حرکت سیال، کمانش کرده و پس از کمانش ایجاد شده در محل اتصال ورق میانی سقف و جعبه پیرامونی آن، مایع بر روی سقف نفوذ کرده و باعث غرق شدن سقف شده است. لذا، یوشیدا و همکاران [16-20] با استفاده از المان‌های متقارن پوسته‌ای در قالب روش اجزای محدود به بررسی رفتار کمانشی سقف‌های شناور پرداختند. علاوه بر ژاپنی‌ها، اروپایی‌ها نیز تحقیقاتی در خصوص تحلیل لرزه‌ای مخازن ذخیره مایع با سقف شناور انجام دادند. در ایتالیا یکی از تحقیقات اخیر که در سال گذشته در این زمینه انتشار یافته، مطالعات آزمایشگاهی است که بر روی سقف‌های شناور مخازن مجهز به سیستم جداساز لرزه‌ای انجام گرفته است [21].

4 - رفتار سقف شناور تک لایه در مد اول حرکت سیال (first sloshing mode)

بر اساس تئوری خطی، سقف شناور در مد اول سیال

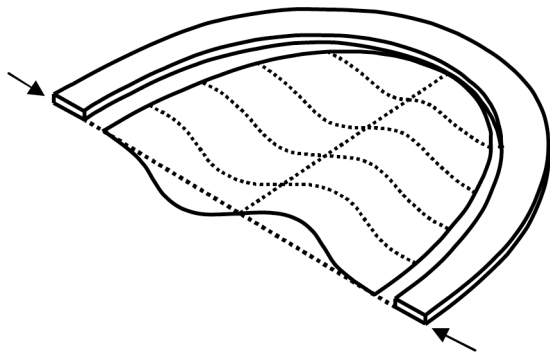
در تحقیقات بعدی، سقف شناور به صورت الاستیک در نظر گرفته شد و جرم آن نیز در محاسبات لحاظ گردید [3]. برای محاسبه پریودهای اصلی سیستم از روش اجزای محدود استفاده و آزمایش‌هایی نیز برای کالیبره کردن روش عددی مذکور انجام شد. از مدل مذکور برای بررسی دلایل خرابی سقف شناور تک‌لایه در زلزله توکاشی - اوکی بهره‌گیری شد [4، 5]. دستاوردهای اخیر در رابطه با پیشرفت روش‌های عددی موجود، باعث شده که پدیده اندرکنش سیال با سقف مخزن به‌طور دقیق‌تری مدل‌سازی شود [6، 7].

در رابطه با مطالعات تحلیلی صورت گرفته در خصوص رفتار لرزه‌ای سقف شناور مخازن، تحقیقاتی که توسط ماتسویی انجام شد، یک جمع‌بندی نسبتاً جامع را برای حل تئوریک اندرکنش مخزن و سیال ارائه کرده است. او ابتدا حل تحلیلی اندرکنش سیال خطی و سقف انعطاف‌پذیر را ارائه کرد. در این مطالعه، سیال به صورت غیر ویسکوز، تراکم ناپذیر و غیر چرخشی فرض شد [8]. ماتسویی سپس جزئیات سقف شناور تک لایه متشکل از ورق میانی و پانتون کناری را نیز در مدل تحلیلی خود وارد کرد [9]. او حل تحلیلی خود را با روشی عددی مبتنی بر اجزای محدود ترکیب کرد تا بتواند آن را برای سقف‌های شناور با ضخامت متفاوت و دارای سختی دو جهته نیز توسعه دهد [10]. پس از آن، آزمایش‌های میز لرزه‌ای نیز برای تعیین میزان صحت نتایج حاصل از این آزمایش انجام شد [11].

محققان موسسه تحقیقاتی آتش و بلایای طبیعی (National Research Institute of Fire and Disaster) کشور ژاپن نیز، بعد از زلزله توکاشی - اوکی بر روی بحث مخازن ذخیره با سقف شناور تحقیقات نسبتاً جامعی را شروع کردند. این گروه، تحقیقات متعددی را بر روی رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره انجام داده‌اند که بیشتر آن‌ها به صورت آزمایشگاهی انجام شده است [12-15].

این گروه بر روی مخازن ذخیره مایع مجهز به سقف شناور در مقیاس واقعی نیز به انجام آزمایش لرزه‌ای پرداخته‌اند. روش به کار گرفته شده توسط این گروه برای تحریک لرزه‌ای سقف شناور مخازن واقعی، روشی مبتکرانه

کناری می‌شود. به عبارت دیگر، ورق میانی با حرکت قائم خود، باعث جمع شدن سقف شناور در راستای افقی می‌گردد. جمع‌شدگی پانتون در اثر حرکت قائم ورق میانی در شکل (9) نشان داده شده است. این جمع‌شدگی باعث ایجاد تنش‌های دینامیکی در آن می‌شود که لازم است نسبت به برآورد آن‌ها اقدام نمود. به این منظور، باید تخمین مناسبی از میزان جمع‌شدگی پانتون کناری و میزان افت حرکت قائم سقف در اثر وجود سقف شناور داشته باشیم.



شکل (9): مکانیسم اندرکنشی ورق و پانتون کناری سقف شناور تک‌لایه در مد دوم تغییر شکل سیال.

5-1- برآورد جمع‌شدگی افقی پانتون در مد دوم

برآورد مقدار جمع‌شدگی پانتون کناری در اثر حرکت قائم ورق میانی موضوعی پیچیده است که به اندرکنش بین سقف شناور و پانتون مرتبط می‌شود. محققین ژاپنی آزمایش‌هایی را برای برآورد میزان این جمع‌شدگی انجام دادند و روابطی را در این زمینه به صورت فرمول تجربی پیشنهاد کردند؛ اما نویسنده مقاله حاضر روند جدیدی برای برآورد این پارامتر به صورت حل تحلیلی ارائه کرده است. معادلات مربوط به نحوه برآورد این پارامتر در مقاله‌های جداگانه انتشار یافته است [23].

نتیجه نهایی حل تئوریک ارائه‌شده در مقاله مذکور، بیانگر تخمین میزان جمع‌شدگی سقف شناور است که به صورت رابطه (4) ارائه شده است.

$$DU_x = R.A_{CO} \quad (4)$$

ضریب A_{CO} از رابطه (5) برآورد می‌شود:

$$A_{CO} = 0.625 - \sqrt{1 + 0.375^2 - 2\sqrt{0.375^2 + m}} \quad (5)$$

به صورت حرکت صلب در مد سخت خود ارتعاش می‌کند. در این حالت هیچ‌گونه حرکت خارج از صفحه‌ای در سقف شناور مشاهده نمی‌شود؛ اما اگر حرکت غیرخطی سطح آزاد مایع در حرکت آن لحاظ گردد، سقف شناور دارای انحنای خارج از صفحه خواهد شد. به عبارت دیگر اثرات غیرخطی حرکت سیال منشأ پیدایش تنش‌های جدیدی در داخل سقف شناور است که این سقف را در مد اول حرکت سیال آسیب‌پذیر می‌کند.

برآورد این تنش‌ها از طریق روابط تحلیلی کاری پیچیده است و معمولاً نتایج آزمایشگاهی مبنای برآورد قرار می‌گیرد؛ اما نگارنده مقاله حاضر، در تحقیقات قبلی مقدار حداکثر لنگر خمشی ایجادشده در داخل پانتون سقف شناور تک‌لایه را بر مبنای روابط تحلیلی پیشنهاد داده است [22]. بر اساس تحلیل‌های مذکور، مقدار ممان خمشی ناشی از فشارهای اضافی اثرات غیرخطی به صورت زیر در داخل پانتون ارائه شده است:

$$M_{1\theta} = 3.4\xi \frac{EI_{\theta}}{R^2} D\eta_{\max} \quad (1)$$

$$\xi = K / \left(16 \frac{EI_{\theta}}{R^4} + K \right) \quad (2)$$

که در این روابط:

E بیانگر مدول الاستیسیته،

I_{θ} بیانگر ممان اینرسی پانتون خارجی، و

K مقدار ثابت فنر معادل بویانسی سیال است

مقدار ماکزیمم ارتفاع آزاد مایع $D\eta_{\max}$ در کنار دیواره را نیز می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$D\eta_{\max} = n\eta_{\max}^{F1} \quad (3)$$

$$n = 0.8(\eta_{\max}^{F1} / R)$$

5- اثرات ناشی از مد دوم حرکت (second sloshing)

(mode سیال بر رفتار دینامیکی سقف شناور

در قسمت قبل بیان شد که حرکت خطی سیال در مد اول، تنش در داخل سقف شناور ایجاد نمی‌کند و اثرات غیرخطی مهم هستند؛ اما زمانی که سیال در مد دوم خود ارتعاش می‌کند، ورق میانی سیال در جهت قائم حرکت می‌کند که باعث به وجود آمدن نیروهای کششی در پانتون

$$D_{\max}^{R2} = 2.041\alpha\eta_{\max}^{F2} \quad (9)$$

در رابطه با برآورد ضریب کاهنده α نویسنده مقاله حاضر، مقدار ضریب مذکور را با استفاده از حل تحلیلی ارائه کرده است [23]. در اینجا، از نتیجه نهایی این تحقیق به‌صورت رابطه‌ای که برای برآورد ضریب مذکور مورداستفاده قرار می‌گیرد، استفاده خواهد شد. این ضریب از رابطه (10) قابل محاسبه است.

$$\frac{(1-\alpha)}{\alpha B_{CO}} = \frac{60E}{\rho g} \left(\frac{16}{\pi} \frac{1}{R^5} + \frac{\pi}{4} \frac{S}{R^3} \right) \quad (10)$$

پارامترهای رابطه فوق قبلاً تعریف شد و S نیز بیانگر مساحت سطح مقطع پانتون است. علاوه بر این، در رابطه فوق مقدار B_{CO} به‌وسیله رابطه (11) محاسبه می‌شود.

$$B_{CO} = 0.625 - SQRT \times \left[1 + 0.375^2 - 2 \times SQRT \left(0.375^2 + \frac{(2.041\alpha\eta_{\max}^{F2})^2}{R^2} \right) \right] \quad (11)$$

5-3- نیروهای لرزه‌ای ناشی از حرکت سیال در مد دوم

با داشتن مقدار جمع‌شدگی افقی پانتون و با فرض اینکه پانتون کناری به‌صورت یک المان حلقوی تحت این تغییر شکل ناشی از جمع‌شدگی قرار گرفته است، می‌توان مقدار نیروهای خمشی و محوری ایجادشده در داخل پانتون را از روابط زیر به دست آورد:

$$M_{2x} = \left(\frac{3EI}{2R^2} \right) (DU_x) \quad (12)$$

$$N_{2\theta} = \left(\frac{ES}{2R} \right) (DU_x) \quad (13)$$

R برابر با شعاع مخزن، I برابر با ممان اینرسی پانتون، S سطح مقطع پانتون و E مدول الاستیسیته فولاد است. DU_x نیز همان جمع‌شدگی پانتون است که در قسمت‌های قبلی محاسبه شد.

درنهایت، نیروهای واردشده به مقطع پانتون در شکل (10) نشان داده شده است. اثرات مد اول ارتعاش سیال و M_{2x} ، $N_{2\theta}$ اثرات ناشی از مد دوم حرکت سیال است.

مقدار پارامتر m نیز برابر $m = (D_{\max}^{R2} / R)^2$ است.

بنابراین اگر میزان حرکت قائم ورق میانی سقف شناور در دست باشد، می‌توان نسبت به محاسبه مقدار جمع‌شدگی سقف شناور اقدام نمود. لذا در این مرحله باید مقدار حرکت قائم ورق میانی را برآورد نمود. منظور از حرکت قائم ورق میانی درواقع حرکت قائم نسبی سقف شناور نسبت به محور مبنای اولیه یا خط مربوط به حرکت صلب سقف شناور است. این مقدار در قسمت بعدی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

5-2- برآورد جابه‌جایی قائم ورق میانی

در ابتدا، سیال را به‌صورت سطح آزاد و بدون در نظر گرفتن وجود سقف شناور مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. برای این حالت، وقتی که مخزن تحت بارهای جانبی قرار می‌گیرد، از تئوری پتانسیل خطی می‌توان سرعت سیال را به‌صورت زیر برآورد نمود:

$$D^{F2}(r, \theta) = \eta_{\max}^{F2} \left(\frac{J_1\left(\lambda_2 \frac{r}{R}\right)}{J_1(\lambda_2)} - \frac{r}{R} \right) \cos \theta \quad (6)$$

در این رابطه R همان شعاع مخزن، J_1 تابع بسل نوع اول، λ_2 ضریب ثابت و برابر با $5/33$ است. مقدار η_{\max}^{F2} برابر با ماکزیمم ارتفاع سیال به شمار می‌رود و در زاویه صفر در کنار جداره، مقدار آن برابر است با:

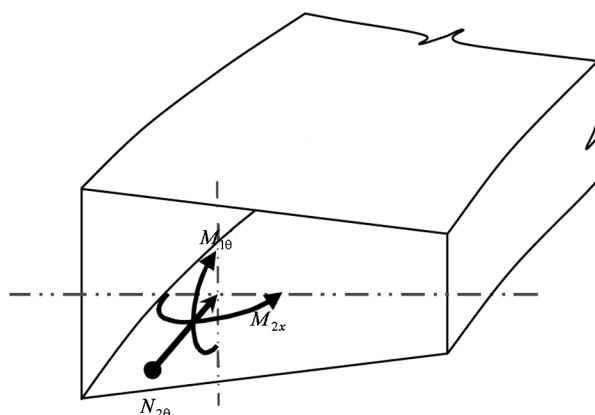
$$D_{\max}^{F2} = 2.041\eta_{\max}^{F2} \quad (7)$$

در رابطه با حرکت قائم سقف شناور تک لایه، مقدار افت قائم سطح سیال را می‌توان از رابطه (8) به دست آورد:

$$D_{(r,\theta)}^{R2} = \alpha\eta_{\max}^{F2} \left(\frac{J_1\left(\lambda_2 \frac{r}{R}\right)}{J_1(\lambda_2)} - \frac{r}{R} \right) \cos \theta \quad (8)$$

ضریب α ضریب کاهنده ارتفاع آزاد مایع در اثر وجود سقف شناور است و باید به‌صورت جداگانه برآورد شود. این ضریب در حقیقت با اندرکنش سقف و سیال نیز مرتبط است. پس می‌توان مقدار ماکزیمم تغییر مکان قائم سقف را از رابطه (9) به دست آورد:

3. Sakai, F., Nishimura, M., and Ogawa, H. (1984) Sloshing behavior of floating-roof oil storage tanks. *Computer and Structures*, **19**(1-2), 183-192.
4. Sakai, F. (2004) On the damages of floating-roof oil storage tanks during the 2003 Tokachi-Oki earthquake. *JSSC Bulletin* (in Japanese), **52**, 20-25.
5. Sakai, F., Inoue, R., and Hayashi, S. (2006) Fluid-elastic analysis and design of sloshing in floating-roof tanks subjected to earthquake motions. *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference* (Vancouver), PVP2006-ICPVT11-93622, 1-10.
6. Nishiguchi, H., Ito, M., Honobe, H., and Kanoh, T. (2005) Sloshing action analysis and safety evaluation of the oil tank by the long period earthquake motion. *The Thermal and Nuclear Power* (in Japanese), **56**(581), 89-94.
7. Yamauchi, Y., Kamei, A., Zama, S., and Uchida, Y. (2006) Seismic design of floating roof of oil storage tanks under liquid sloshing. *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference* (Vancouver), PVP2006-ICPVT11-93280, 1-9.
8. Matsui, T. (2006) Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a floating roof under seismic excitation. *Proceeding of the ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference* (Vancouver), PVP2006-ICPVT11-93531, 23-27.
9. Matsui, T. (2007) Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a single-deck type floating roof under seismic excitation. *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference* (San Antonio, Texas, U.S.A), PVP2007-26249, 22-26.
10. Matsui, T. (2007) Sloshing and dynamic interaction between liquid and floating roof in a cylindrical liquid storage tank subjected to seismic excitation. *Proceeding of ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, (Rethymno, Crete, Greece), 13-16.



شکل (10): نیروهای لرزهای اعمال شده به مقطع پانتون در اثر اعمال بارهای لرزهای.

6 - جمع بندی

بر اساس مطالب ارائه شده در این مقاله، پدیده‌های تشکیل دهنده مکانیسم تولید تنش در داخل سقف شناور به صورت مجزا قابل کمینه شدن هستند. بر این اساس اثرات مد اول و دوم سیال در ایجاد تنش‌های لرزهای نقش اساسی داشته و از اثر مدهای بالاتر صرف نظر می شود.

اثرات مد اول ارتعاش سیال، به صورت یک لنگر خمشی وارد شده به سقف شناور قابل محاسبه است ($M_{1\theta}$). اثرات ناشی از مد دوم حرکت سیال نیز نهایتاً در قالب یک لنگر خمشی و یک نیروی محوری قابل بیان است ($M_{2x}, N_{2\theta}$).

بعد از محاسبه این نیروها، می توان نسبت به محاسبه تنش‌های لرزهای وارد به سقف شناور تک لایه اقدام نمود. بر این اساس، تنش‌های نهایی ناشی از مد اول و دوم حرکت سیال، از طریق یکی از روش‌های معمول (مثلاً روش جمع مجذور مربعات) با یکدیگر ترکیب می شوند.

مراجع

1. Nakagawa, K. (1955) *On the vibration of an elevated water tank II*. Tech. Rep. of Osaka Univ., **5**(170), 317-336.
2. Yamamoto, Y. (1965) The liquid sloshing and the impulsive pressures of oil storage tanks due to earthquakes. *Journal of High Pressure Institute of Japan* (in Japanese), **3**(1), 2-8.

- of Single Deck Floating Roofs subjected to Circumferential Compressive Load. *Journal of High Pressure institute of Japan*, **46**(3), 126-173.
20. Yoshida, S., Sekine, K., and Mitsuta, I. (2008) Axisymmetric finite element analysis for sloshing response of floating roofs in cylindrical storage tanks. *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers*, **74**(740), 814-822.
 21. Angelis, M., Giannini, R., and Paolacci F. (2009) Experimental investigation on the seismic response of a steel liquid storage tank equipped with floating roof by shaking table tests. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **39**(4), 377-396.
 22. Goudarzi, M.A. (2013) Seismic behavior of a single deck floating roof due to second sloshing mode. *Journal of Pressure Vessel Technology* (ASME), (135) 011801-1.
 23. Goudarzi, M.A. (2013) Analytical method for evaluating attenuation effects of single deck floating roof storage. *Journal of Pressure Vessel Technology* (ASME), DOI: 10.1115/1.4007291.
 11. Matsui, T. (2009) *Model Tests on Sloshing of a Floating Roof in Cylindrical Tanks under Seismic Excitation*. Research reports of national fire and disaster institute.
 12. Nishi, H., Yamada, M., Zama, S., Hirokawa, Y., Sekiie, K., Minowa, C., and Mikoshiba, I. (2007) Experimental study on sloshing behavior of floating roofs by using small-scale cylindrical tank. *Journal of High Pressure Institute of Japan*, **45**(3), 118-126.
 13. Nishi, H., Yamada, M., Zama, S., Hatayama, K., Sekine, K., Mikoshiba, T., and Minowa, C. (2007) Experimental study on sloshing behavior of floating roofs by using small-scale cylindrical tank- effect of the second order sloshing mode. *Journal of High Pressure Institute of Japan*, **45**(6), 357-363.
 14. Nishi, H., Yamada, M., Zama, S., Hatayama, K., Sekine, K. (2008) Experimental study on the sloshing behavior of the floating roof using a real tank. *Journal of High Pressure Institute of Japan*, **46**(1), 4-17.
 15. Zama, S., Nishi, H., Yoshihiro Hir Okawa, Yamada, M., and Hatayama, K. (2004) Attenuation factors of liquid sloshing of oil storage tanks, *Report of National Research Institute of Fire and Disaster*, **98**, 66-73
 16. Yoshida, S. (2009) Application of reduced stiffness method to lower bound elastic buckling load of pontoons of single deck floating roofs. *Journal of High Pressure Institute of Japan*, **47**(1), 18-28
 17. Yoshida, S. and Kitamura, K. (2007) Elastic buckling of pontoons of single deck floating roofs subjected to circumferential bending load. *Journal of High Pressure institute of Japan*, **45**(3), 144-153.
 18. Yoshida, S. and Kitamura, K. (2008) Elastic buckling of pontoons of single deck floating roofs subjected to bending load in two directions. *Journal of High Pressure institute of Japan*, **46**(2), 59-70.
 19. Yoshida, S. (2008) Elastic Buckling of Pontoons