

رفتار دینامیکی مخازن ذخیره‌سازی مایعات با بهینه‌سازی ابعادی المان‌ها

محمود حسینی^۱
حمیدرضا وثوقی فر^۲
شایان ابی‌زاده^{۳*}

چکیده

مخازن ذخیره‌سازی مایعات، از شریان‌های بسیار مهم کشورها هستند. در این پژوهش ابتدا صحت‌سنجی الگوی اجزای محدود با نتایج به‌دست آمده از یک مخزن مقیاس‌شده آزمایشگاهی با اندازه المان‌های مختلف صورت گرفته و تحلیل‌های مودال و تاریخچه زمانی انجام یافته است و نتایج تلاطم سطح آزاد به‌دست آمده از هر نوع المان‌بندی به‌وسیله برنامه آماری SPSS 17 با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. سپس یک مخزن مستطیلی بتنی به حجم ۱۰۰۰ مترمکعب با المان‌بندی‌های مختلف بررسی و تحلیل‌های مودال و تاریخچه زمانی انجام شد. در نهایت رکورد زلزله «نورتریچ» به‌صورت دو مؤلفه‌ای افقی و سه مؤلفه‌ای به مخزن $1000 M^3$ به‌صورت تاریخچه زمانی وارد شده و نتایج تحلیل شده‌اند. نتایج صحت‌سنجی المان‌بندی‌ها به‌روش تحلیل‌های مودال و تحلیل‌های هارمونیک سینوسی تاریخچه زمانی نشان می‌دهد که اندازه المان‌بندی در پاسخ‌ها قابل تأمل بوده و فقط با تحلیل‌های مودال به راستی‌آزمایی مخزن مدل‌شده به‌روش اجزای محدود نمی‌توان پرداخت و اندازه المان‌های با ارتفاع به طول بزرگتر از ۱ نتایج مطلوبی را نمی‌دهد. همین‌طور نتایج دینامیکی تاریخچه زمانی نشان می‌دهد که اثر مؤلفه عمودی در تحلیل‌های سه مؤلفه‌ای تأثیری بر تلاطم سطح آزاد آب ندارد ولی باعث افزایش فشار هیدرودینامیکی در مقایسه با تحلیل دو مؤلفه افقی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

مخازن حاوی مایعات، فشار هیدرودینامیکی، اندرکنش بین سازه - مایع، تحلیل تاریخچه زمانی.

مقدمه

مخزن‌های حاوی مایعات به‌عنوان شریان‌های حیاتی و سازه‌های با اهمیت زیاد به‌صورت گسترده‌ای در شبکه‌های انتقال و توزیع آب، صنعت و هم‌چنین ذخیره‌سازی انواع مواد مایع؛ مانند: نفت، گاز طبیعی مایع (ال ان جی) نیروگاه‌های هسته‌ای و ذخیره مواد زاید شیمیایی و فاضلاب در شکل‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین باید استحکام و پایداری آنها در هنگام رخداد زمین لرزه و پس از آن برای سرویس‌دهی و مسائل بهداشتی و جلوگیری از نشت مواد زاید و شیمیایی و هم‌چنین توسعه پایدار در طراحی‌های دینامیکی مورد بررسی قرار گیرد. [۱]

پارامترهایی که در طراحی دینامیکی مخزن‌ها شرایط بحرانی را به‌وجود می‌آورد و باید محاسبه شود: فشار هیدرودینامیکی سیال، برش پایه، ممان پایه و بیشینه ارتفاع تلاطم موج (Maximum Sloshing Wave Height. MSWH) می‌باشد که اگر ارتفاع سطح آزاد مناسب پیش‌بینی نشود باعث ایجاد فشار به سقف مخزن شده و ایمنی سازه به خطر می‌افتد.

در سال ۱۹۶۳ شخصی به‌نام «هازنر» مدل تحلیلی «جرم گرهی» با دو درجه آزادی را برای تخمین آثار دینامیکی سیال در مخزن استوانه‌ای با دیواره‌های «صلب» تحت مؤلفه افقی زمین لرزه ارائه کرد. در این مدل از دو مؤلفه جداگانه به‌صورت مؤلفه ضربه‌ای و مؤلفه موج برای سیال استفاده شده است. وی سیال را تراکم‌ناپذیر و غیرلزج در نظر گرفت [۲] که در بیشتر آئین‌نامه‌ها با تغییرها و اصلاحاتی پذیرفته شد و استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۷۶ «یانگ» توزیع فشارهای هیدرودینامیکی سیال را روی مخزن‌هایی با دیواره‌های انعطاف‌پذیر به‌روش تحلیلی بررسی کرد. [۳] در سال ۱۹۸۴ «هارون» روش تحلیلی بسیار دقیقی از بارگذاری دینامیکی در مخزن‌های مستطیلی ارائه کرد. [۴] در سال ۱۹۸۶ «ولتسوس و همکارانش» مطالعه گسترده‌ای روی پاسخ دینامیکی مخزن‌های بتنی مدور تحت تحریک عمودی را برای دیواره‌های صلب و انعطاف‌پذیر مطالعه و درنهایت مدل «جرم - فنر» ساده‌شده‌ای را برای تخمین آثار ناشی از تحریک قائم مخزن‌ها پیشنهاد دادند. هم‌چنین آنان نشان دادند که اندرکنش خاک و سازه باعث کاهش حداکثر فشار

هیدرودینامیکی ناشی از تحریک زلزله می‌گردد. [۵] مطالعات و گزارش خسارت‌های وارده به مخزن‌ها در زلزله‌ها نشان داد که انعطاف‌پذیری دیواره‌ها و اثر مؤلفه قائم زمین لرزه نیز باید در طراحی مخزن‌ها مد نظر قرار گیرد.

در سال‌های اخیر نیز مطالعه‌های عددی و تحلیلی به‌روش اجزای محدود انجام شده است. در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ «چن» و «کیانوش» یک روش تحلیلی موسوم به «روش تکراری» برای بررسی پاسخ دینامیکی مخزن‌های بتنی ارائه دادند. در این روش، آنان سیال داخل مخزن را به‌صورت چندگره‌ی مدل کردند. این روش در واقع از روش «انتگرال‌گیری» مرحله‌به‌مرحله با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری جداره‌ها تحت مؤلفه‌های افقی و عمودی استفاده شده است. [۶ و ۷]

در سال ۲۰۰۹ «سویدان» از یک روش مکانیکی معادل برای مدل کردن رفتار دینامیکی مخزن‌های هوایی استفاده کرد. در بررسی‌ها اثر مؤلفه قائم زلزله بر فشار هیدرودینامیکی غیرقابل چشم‌پوشی است. [۸] در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ «قائم مقامی» و «کیانوش» [۹ و ۱۰] رفتار دینامیکی مخازن بتنی زمینی مستطیلی را با روش اجزای محدود به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی بررسی کردند. در این پژوهش، تحلیل دینامیکی مخازن بتنی آب به‌روش اجزای محدود با تحلیل‌های «مودال» (Modal Analysis) و تاریخچه زمانی (Time history Analysis) انجام گرفت و تأثیر المان‌بندی‌های مختلف در پاسخ‌های دینامیکی بررسی شده است.

مدل سازی

مدل اجزای محدود

(Finite Element Model FEM)

برای مدل کردن مخزن به‌روش اجزای محدود و در نظر گرفتن اندرکنش سازه و مایع از روش «لاگرانژی - لاگرانژی» استفاده شده است که مجهول تغییر مکان گرهی در محیط سازه و سیال بوده و به سرگذشت یک ذره در طول زمان پرداخته و دستگاه «معادلات مختصاتی» متقارن تشکیل می‌دهد. به‌همین منظور از برنامه اجزای محدود ANSYS استفاده شده است. [۱۱] برای سیال از یک المان ۸‌گره‌ی سه‌بعدی با ۲۴ درجه آزادی (۳ درجه آزادی تغییر مکان در هر گره) استفاده شده است. برای این المان

آزمایشگاهی ۶۲/۳ میلی‌متر و مدهای فرکانسی اول تا سوم طبیعی سیال از رابطه تحلیلی ۳ به ترتیب ۰/۸۸۶ Hz، ۱/۵۶۲ و ۲/۰۱۷ به دست می‌آید. برای مش‌بندی بهینه در روش اجزای محدود از ۱۲ نوع المان‌بندی با اندازه المان‌های مختلف استفاده شد که در جدول (۱) تعداد المان‌ها و نتایج به دست آمده از روش اجزای محدود خلاصه شده است و در شکل (۱) مخزن با دو نوع المان‌بندی نشان داده شده است.

در شکل (۲) نیز نتایج تاریخچه زمانی برخی از المان‌بندی‌ها در روش المان محدود در مقایسه با نتایج تاریخچه زمانی تلاطم سطح آزاد مایع روش آزمایشگاهی نشان داده شده است.

$$X_{-}(t) = D \sin(\omega t) \quad (۲)$$

$$(۳)$$

$$\omega_n^2 = \pi(2n - 1)(g/L) \tanh[(2n - 1)(h/L)]$$

در رابطه شماره ۲، (D) حداکثر جابه‌جایی افقی مخزن می‌باشد که برابر ۰/۰۰۵ متر در نظر گرفته شده است. در رابطه شماره ۳، (n) شماره «مد نوسانی» و (L) «طول مخزن» است.

نتایج تحلیل مودال نشان می‌دهد؛ مدهای نوسانی (به خصوص مد اول) تفاوت چندانی با هم ندارند و با کوچک‌تر کردن المان به یک عدد، هم‌گرا می‌شوند. در صورتی که با تحلیل تاریخچه زمانی، بیشینه تلاطم تفاوت کند؛ بنابراین، برای صحت‌سنجی رفتار المان مدهای بالاتر را نیز باید در نظر گرفت.

اندازه المان‌های بزرگ‌تر، مدهای بالاتر - که در زلزله می‌تواند تأثیرپذیر باشد - را نمی‌تواند محاسبه کند (جدول ۱- تیپ‌های ۱ تا ۴).

«سیال مدول الاستیسیته» مطابق مدول بالک سیال گرفته شد و رابطه تنش کرنش به صورت زیر تعریف شده است:

$$P = E \cdot \varepsilon_{bulk} \quad (۱)$$

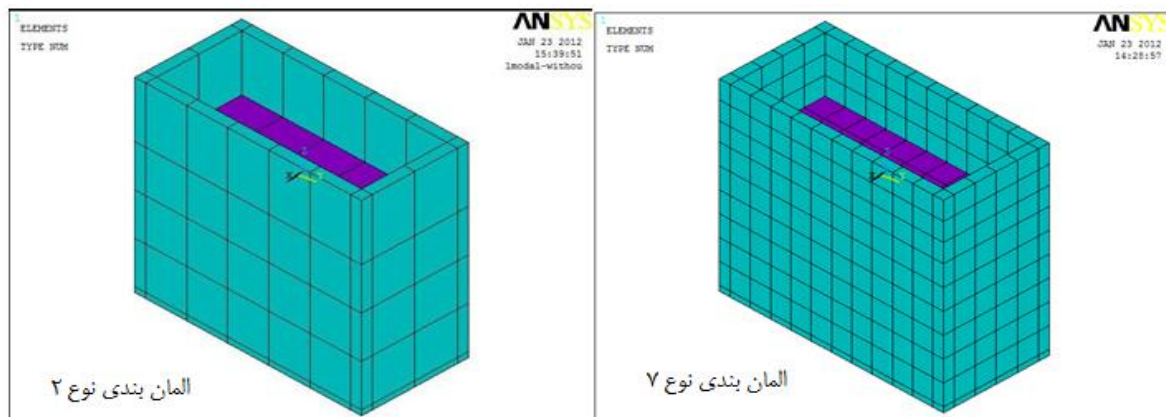
که در آن P: فشار و ε_{bulk} : کرنش المان است. سیال تراکم ناپذیر $E = 2.1e^{+6} (kpa)$ و چگالی برابر $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شده است. برای دیواره‌های مخزن از یک المان سازه‌ای ۸ گرهی سه بعدی با ۲۴ درجه آزادی (۳ درجه آزادی تغییر مکان در هر گره) استفاده شده و $E = 22.69 (Gpa)$ و چگالی برابر $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شده است. تغییر مکان گرهی سازه و سیال در محیط سازه و سیال در جهت عمود بر سطح به هم متصل شده است؛ به عبارت دیگر سیال و سازه نمی‌تواند از یکدیگر جدا شود؛ بلکه در جهت عمود بر سطح با هم جابه‌جا می‌شوند که مفروض‌های هازنر - که در مدل مکانیکی ساده شده خود در نظر گرفته بود - را برآورده می‌کند. هم‌چنین برای ایجاد سیستم یکپارچه و جلوگیری از حرکت دیوارها به صورت مستقل، درجه‌های آزادی تغییر مکان گرهی در بالای دیوار به هم متصل شده است. برای بررسی پاسخ لرزه‌ای مخزن در طول زمان از روش «نیومارک» استفاده می‌شود.

صحت‌سنجی با نتایج آزمایشگاهی

از یک مدل آزمایشگاهی که توسط «گودرزی و همکارانش» [۱۲] در سال ۲۰۰۹ در دانشگاه اشتوتگارت آلمان انجام شده است، برای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود استفاده و نتایج مقایسه شده است. این مدل آزمایشگاهی یک مخزن مستطیلی به ابعاد $0.4 \times 0.96 \text{ m}^3$ (طول \times عرض \times ارتفاع) با ارتفاع آب داخل مخزن برابر ۱/۶۲۴ متر بر روی میز لرزان به ابعاد 1×2 متر است که تحت ارتعاش «سینوسی هارمونیک» به دست آمده از رابطه ۲ با فرکانس زاویه‌ای بزرگ‌تر از اولین فرکانس طبیعی سیال به دست آمده از رابطه ۳ با نسبت $\frac{\omega L}{\omega_n} = 1/12$ قرار گرفته است. حداکثر ارتفاع تلاطمی سیال در مدل

جدول (۱): مشخصه‌های انواع المان‌بندی مخزن آزمایشگاهی با ابعاد مختلف و خلاصه نتایج به‌دست آمده از روش اجزای محدود

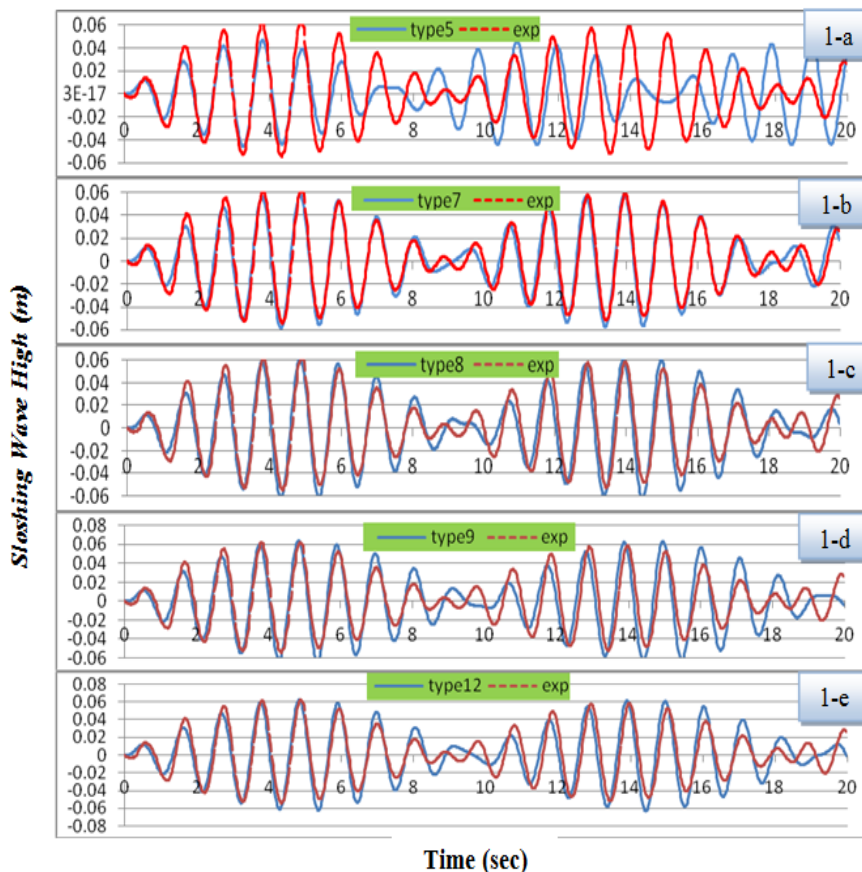
درصد کل روند تلاطم با SPSS	MSWH (mm)	مدهای به‌دست آمده از FEM (HZ)			تعداد المان سیال	تعداد المان			نوع المان بندی
		مد سوم	مد دوم	مد اول		در عرض	در طول	در ارتفاع	
٪۳۸	۳۷/۷	-	۱/۰۸۹	۰/۸۳۲	۲۰	۲	۵	۲	۱
٪۶۲	۴۸/۳	-	۱/۳۰۶	۰/۸۵۹	۳۰	۲	۵	۳	۲
٪۷۱	۵۶/۸	-	۱/۴۴۷	۰/۸۷۱	۴۰	۲	۵	۴	۳
٪۵۱	۶۴/۳	-	۱/۶۱۳	۰/۸۷۹	۶۰	۲	۵	۶	۴
٪۵۶	۴۶/۲	۱/۳۱۷	۱/۲۳	۰/۸۴۹	۱۲۰	۴	۱۰	۳	۵
٪۶۸	۵۱/۷	۱/۵۰۳	۱/۳۴	۰/۸۶۰	۱۶۰	۴	۱۰	۴	۶
٪۷۸	۵۸/۳	۱/۷۵۰	۱/۴۵۲	۰/۸۶۸	۲۴۰	۴	۱۰	۶	۷
٪۷۶	۶۰/۳	۱/۹۰۰	۱/۵۰۲	۰/۸۷۱	۳۲۰	۴	۱۰	۸	۸
٪۶۵	۶۳/۷	۲/۰۴۹	۱/۵۴۳	۰/۸۷۳	۴۸۰	۴	۱۰	۱۲	۹
٪۷۲	۶۰/۹	۱/۷۹۱	۱/۴۶۵	۰/۸۶۸	۱۲۸۰	۸	۲۰	۸	۱۰
٪۷۵	۶۰/۳	۱/۹۰۷	۱/۵۰۳	۰/۸۷۰	۱۹۲۰	۸	۲۰	۱۲	۱۱
٪۷۳	۶۲/۳۵	۱/۹۵۱	۱/۵۱۵	۰/۸۷۰	۱۵۲۰۰	۱۶	۳۸	۲۵	۱۲



شکل (۱): مدل‌سازی مخزن آزمایشگاهی به‌روش اجزاء محدود

کوچک‌تر کردن زیاد نسبت ارتفاع به عرض و یا کوچک‌تر کردن بیشتر تمامی ابعاد المان، روند تلاطم در طول زمان از نتایج آزمایشگاهی متمایز می‌شود و به‌دلیل روش خطی اجزای محدود حداقل تلاطم سطح سیال، تفاوت بیشتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی می‌دهد (شکل‌های ۲-d و ۲-e) و با برنامه آماری «SPSS17» نتایج به‌دست‌آمده از المان‌های مختلف و نتایج آزمایشگاهی با آزمون «من ویتنی» مقایسه شده است که نتایج یادشده در بالا را تأیید می‌کند.

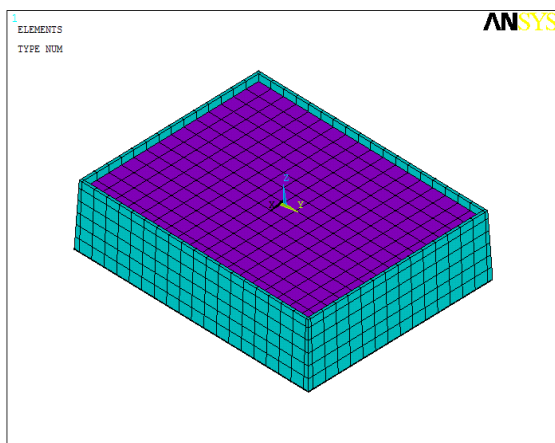
جدول (۱) گویای این مهم است که با کاهش ارتفاع المان با ابعاد طول و عرض ثابت (تیپ‌های ۱ الی ۵، ۴ الی ۹، ۱۰ و ۱۱) مدهای نوسان و بیشینه ارتفاع تلاطم سیال افزایش می‌یابد (شکل‌های ۲a الی ۲d) و المان‌های با نسبت ارتفاع به عرض بزرگ‌تر از ۱، بیشینه تلاطم کمتر و تغییر فاز را نشان می‌دهد و در نتیجه روند تلاطم سطح آزاد سیال در طول زمان نسبت به نتایج آزمایشگاهی به‌طور کامل متفاوت بوده (شکل ۲a) و المان‌بندی‌های مکعب مربعی و نسبت ارتفاع به عرض کمتر از ۱، نتایج بهتر و بیشینه تلاطم نزدیک‌تر به نتایج آزمایشگاهی می‌دهد؛ ولی با



شکل (۲): شکل‌های شماره (۱-ا و ۱-ع) مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی با روش اجزای محدود با اندازه المان‌های مختلف برای ارتفاع تلاطم در طول زمان

تأثیر المان‌بندی در تحلیل دینامیکی مخازن المان‌بندی

برای تحلیل‌های دینامیکی یک مخزن به ابعاد $14 \times 18 \times 5$ متر با ارتفاع آب ۴ متر به حجم ۱۰۰۰ مترمکعب در نظر گرفته شده است و طبق روشی که در بخش ۲ توضیح داده شد مدل گردیده است. (شکل ۳) با توجه به نتایج المان‌بندی بخش قبل، مبنی بر اینکه المان‌های با نسبت ارتفاع به عرض بزرگ‌تر از ۱ و خیلی کوچک‌تر از ۱ باعث تغییر فاز در نتایج و ماکزیمم تلاطم می‌شود. برای آنالیز حساسیت مخزن واقعی برای در نظر گرفتن المان‌بندی بهینه از ۸ نوع المان‌بندی با المان‌های مکعب مربعی و المان‌هایی که نسبت ارتفاع به عرض آن‌ها حدود 0.75 می‌باشد استفاده شده و تحلیل مودال برای آن‌ها انجام شده است. که نتایج آن‌ها و مدهای تلاطمی سیال به دست آمده از رابطه تحلیلی شماره ۳ در جدول (۲) آمده است.



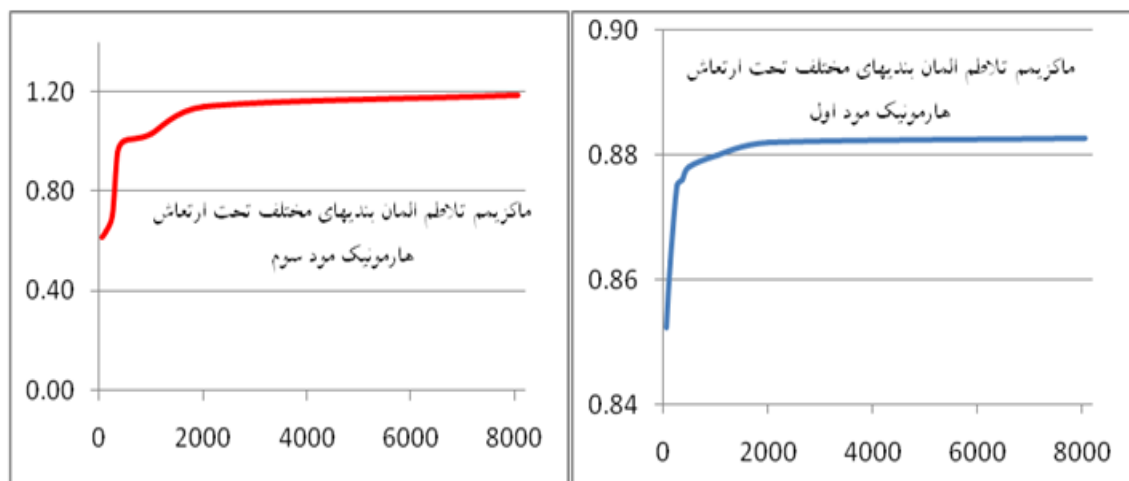
شکل (۳): المان‌بندی نوع ۷ با ابعاد $1 \times 1 \times 0.8$ متر

جدول (۲): مشخصه‌های انواع المان‌بندی مخزن ۱۰۰۰ مترمکعبی با ابعاد مختلف المان‌ها و مدهای تلاطمی به‌دست‌آمده از این المان‌ها

اندازه المان (طول×عرض× ارتفاع)		نوع المان بندی							
۳×۳	۲×	۱×۱×۱	۱/۵×۱/۴	۱/۵×۱/۴	۱×۲×۲	۲×۲×۲	۱×۱×۱	۱×۱×۱	۱/۵×۱/۵×۱/۵
نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳	نوع ۴	نوع ۵	نوع ۶	نوع ۷	نوع ۸	نوع ۹	نوع ۱۰
مدهای تحلیلی	م	د	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۰/۱۶۱۷	۰/۱۶۳۱	۰/۱۶۱۴	۰/۱۶۲۴	۰/۱۶۱۵	۰/۱۶۱۸	۰/۱۶۱۵	۰/۱۶۱۴	۰/۱۶۱۵	۰/۱۶۱۴
۰/۳۵۵۲	۰/۳۶۰۳	۰/۳۴۱۱	۰/۳۵۹۹	۰/۳۴۷۱	۰/۳۵۲۰	۰/۳۴۷۱	۰/۳۴۶۷	۰/۳۴۸۱	۰/۳۴۸۱
۰/۴۶۵۱	۰/۴۴۶۰	۰/۴۰۶۱	۰/۴۸۴۱	۰/۴۳۸۷	۰/۴۵۹۴	۰/۴۳۸۷	۰/۴۴۴۵	۰/۴۵۴۶	۰/۴۵۴۶
۰/۵۵۰۹	۰/۴۴۳۶	۰/۶۰۳۳	۰/۴۹۵۶	۰/۵۴۰۶	۰/۵۰۴۹	۰/۵۴۰۶	۰/۵۰۴۹	۰/۵۲۵۵	۰/۵۲۷۰

نظر قرار داد. هم‌چنین مخزن یادشده تحت ارتعاش هارمونیک موده‌های اول و سوم قرار گرفت که در شکل (۴) نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود مدهای به‌دست‌آمده از المان‌بندی‌های مختلف (به خصوص در مد اول) تفاوت چندانی با هم ندارند و باید برای مشخص شدن محدوده اندازه المان‌بندی بهینه، مدهای بالاتر را نیز مد



شکل (۴): بیشینه تلاطم المان‌بندی‌های مختلف تحت ارتعاش هارمونیک موده‌های اول و سوم

۱۰۰۰ مترمکعب از المان‌بندی بهینه‌شده نوع ۷ استفاده شده است (شکل ۳). همان‌گونه که در شکل (۳) دیده می‌شود دیواره‌های مخزن به‌صورت باریک شونده با ضخامت ۰/۴ متر در کف دیوار و ۰/۲ متر در بالای دیوار - که در عمل اجرا می‌شود - در نظر گرفته شده است.

وزن مخصوص بتن 2400 kg/m^3 و ضریب پواسون آن $0/15$ و مدول الاستیسیته بتن $22/69 \text{ Gpa}$ در نظر گرفته شده است و از چگالی 1000 kg/m^3 و ویسکوزیته $10^{-3} \text{ N.sec/m}^2$ و مدول الاستیسیته حجمی $2/1 \text{ Gpa}$ برای سیال داخل مخزن تعیین گردیده و در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در تحلیل‌ها از

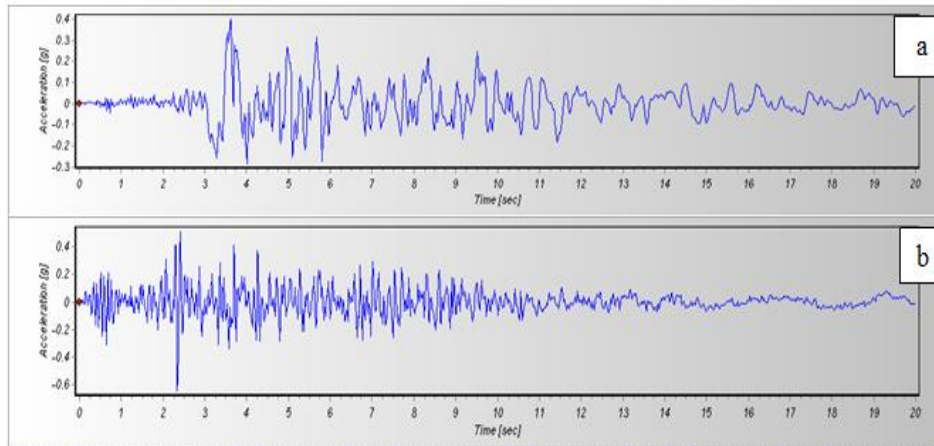
تحلیل مودال و تحلیل هارمونیک نشان می‌دهد که المان‌های با نسبت ارتفاع به عرض حدود $0/75$ بیشینه تلاطم بیشتری را نسبت به المان‌های مکعبی نتیجه می‌دهد و به نتایج المان مکعبی با اندازه کوچک‌تر نزدیک‌تر می‌شود و برای کاهش المان‌ها و کاهش حجم عملیات از المان‌های با نسبت ارتفاع به عرض کمتر استفاده کرد و همان‌گونه که گفته شد این نسبت نباید خیلی کوچک شود.

تحلیل دینامیکی

در این پژوهش برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به‌روش اجزای محدود مخزن مستطیلی بتنی به‌حجم

شکل (۵) تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی یکبار به صورت دو مؤلفه‌ای و یکبار با در نظر گرفتن مؤلفه قائم به صورت ۳ مؤلفه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، بیشینه شتاب افقی در جهت y برابر $0.4g$ و بیشینه شتاب عمودی به $0.64g$ مقیاس شده است.

استهلاک «رایلی» با نسبت میرایی 0.5 درصد برای سیال و 5 درصد برای سازه برای تعیین α و β استفاده شده است. همچنین برای تحلیل از رکورد زلزله Northridge ۱۹۹۴ در ایستگاه Arleta استفاده شده و بیشینه شتاب آن در جهت y به $0.4g$ مقیاس شده است.

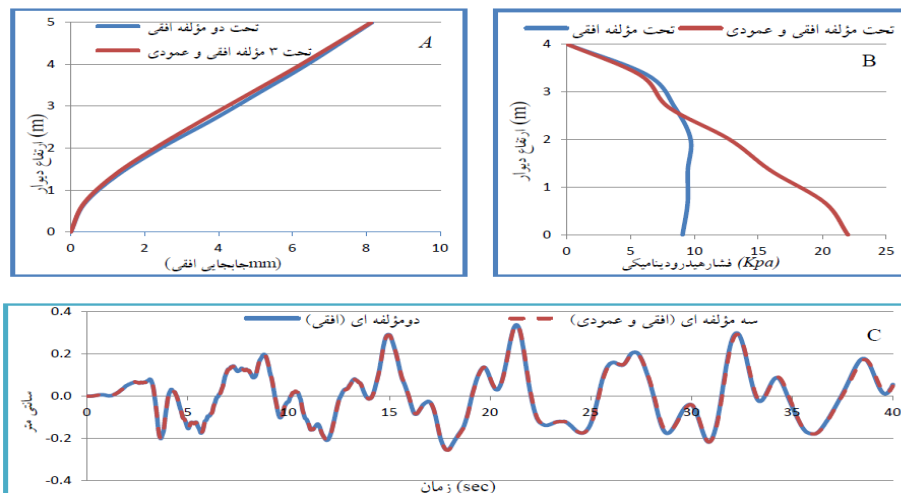


شکل (۵): مؤلفه‌های مقیاس شده زلزله نورث ریج (a) مؤلفه افقی در جهت y و (b) مؤلفه عمودی

آزاد مایع $33/64$ سانتی‌متر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد؛ مؤلفه عمودی زمین لرزه تأثیری بر تلاطم سیال ندارد که با نتایج هارون (Haroun) در سال ۱۹۸۴ (۱۴)، مطابقت دارد. در شکل (۶) نتایج به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی تحت ارتعاش دو مؤلفه‌ای و سه مؤلفه‌ای نشان داده شده است.

نتایج عددی تحلیل دینامیکی

در تحلیل دینامیکی مخزن مورد مطالعه تحت رکوردهای زلزله Northridge سال ۱۹۹۴ حداکثر تغییر مکان افقی دیوار مخزن در امتداد محور y تحت تحریک دو مؤلفه‌ای افقی و سه مؤلفه‌ای (افقی و عمودی) به ترتیب $8/12$ و $8/16$ میلی‌متر است و حداکثر ارتفاع امواج سطح



شکل (۶): برخی نتایج تحلیل‌های دینامیکی؛ A: حداکثر تغییر مکان افقی دیواره مخزن؛

B: حداکثر فشار هیدرو دینامیکی در پای دیوار؛ C: بیشینه تلاطم سطح آزاد سیال، تحت مؤلفه‌های افقی و مؤلفه‌های افقی و عمودی

است که نشان می‌دهد؛ مؤلفه قائم زلزله در حداکثر فشار هیدرودینامیکی پای دیوار تأثیر زیادی دارد. در شکل (۶- b) (حداکثر فشار هیدرودینامیکی در ارتفاع دیوار برای هر دو تحریک نشان داده شده است.

رکورد زلزله نورتریج به صورت دو مؤلفه‌ای و سه مؤلفه‌ای نشان داد؛ مؤلفه قائم بر حداکثر تلاطم سطح آب و حداکثر جابه‌جایی افقی دیواره مخزن و برش پایه کل مخزن تأثیر چندانی ندارد؛

۵. مقدار فشار هیدرودینامیکی حداکثر در پای دیوار در تحلیل دو مؤلفه‌ای و سه مؤلفه‌ای با در نظر گرفتن مؤلفه قائم زلزله به ترتیب (kpa) ۹/۸ و (kpa) ۲۲/۱ است که نشان می‌دهد؛ مؤلفه قائم در مقدار حداکثر فشار هیدرودینامیکی تأثیر زیادی داشته است و در تحلیل‌های دینامیکی باید در نظر گرفته شود.

مراجع

۱. ابی زاده، ش. (۱۳۸۹). اثر مؤلفه قائم زمین لرزه بر مخازن ذخیره‌سازی مایعات، سمینار کارشناسی ارشد، به‌راهنمایی دکتر حسینی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده تحصیلات تکمیلی تهران، ایران.
2. Housner, G.W. (1963). The dynamic behavior of water tanks, Bulletin of the Seismological Society of American, 53(2).
3. Yang JY. (1976). Dynamic behavior of fluid-tank systems. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Houston : Rice University;
4. Haroun, M.A. (1984). Stress analysis of rectangular walls under seismically induce hydrodynamic loads. Bulletin of the Seismological Society of America, 74(3): 1031-1041.
5. Veletsos AS, Tang Y. (1986). Dynamics of vertically excited liquid storage tanks. ASCE J Struct Eng; 112(6):1228-46.
6. Chen JZ, Kianoush MR. (2005). Seismic

از تحلیل‌های تاریخچه زمانی بیشینه فشار هیدرودینامیکی در پای دیوار در امتداد محور y تحت تحریک مؤلفه افقی زمین لرزه در زمان ۳/۸ ثانیه، (kpa) ۹/۸ و تحت تحریک سه مؤلفه‌ای زمین لرزه (افقی و عمودی) در زمان ۲/۴ ثانیه، (kpa) ۲۲/۱ به دست آمده

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مخزن به مقیاس آزمایشگاهی با المان‌بندی‌های مختلف مدل شد و تحلیل‌های مودال و تاریخچه زمانی با تحریک هارمونیک انجام گرفت و نتایج آنها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. هم‌چنین برای تحلیل دینامیکی، یک مخزن با ابعاد واقعی به حجم ۱۰۰۰ مترمکعب مدل شده و تحلیل‌های مودال و تاریخچه زمانی با تحریک هارمونیک براساس مودهای اول و سوم مخزن ۱۰۰۰ مترمکعبی انجام گرفت که از تحلیل‌های صورت گرفته نتایج زیر به دست آمده است:

۱. نتایج تحلیل‌های صحت‌سنجی نشان داد؛ المان‌بندی‌های با نسبت ارتفاع به عرض بزرگ‌تر باعث تغییر فاز و کمتر شدن حداکثر تلاطم سطح آزاد سیال نسبت به نتایج آزمایشگاهی می‌شود و با کاهش نسبت ارتفاع به عرض المان حداکثر تلاطم سطح آزاد سیال بیشتر شده و به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌شود؛ اما با کوچک‌تر کردن بیشتر ارتفاع به عرض به دلیل انجام تحلیل‌ها به صورت خطی باعث افزایش پائین رفتن سیال نسبت به نتایج آزمایشگاهی شده و روند تلاطم سیال در طول زمان با نتایج آزمایشگاهی متفاوت می‌شود؛
۲. همین‌طور نتایج تلاطم سطح آزاد سیال با المان‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی به‌وسیله برنامه آماری «SPSS17» نیز مقایسه شد که نشان می‌دهد با کوچک‌تر شدن زیاد المان و یا کمتر شدن بیشتر نسبت ارتفاع به عرض روند تلاطم با روند تلاطم آزمایشگاهی متفاوت می‌شود؛
۳. نتایج به دست آمده از تحلیل مودال برای مخزن آزمایشگاهی و مخزن ۱۰۰۰ مترمکعبی حاکی از آن است که با تحلیل مودال و مقایسه آن با مودهای به دست آمده از روش تحلیلی نمی‌توان به صحت‌سنجی المان در نظر گرفته شده پرداخت؛
۴. نتایج تحلیل دینامیکی مخزن ۱۰۰۰ مترمکعبی با

- behavior of concrete rectangular liquid tanks using the finite element method incorporating soil-structure interaction". Eng structure.
11. Theory manual of ANSYS, a general purpose finite element package (Version 12).
 12. Goudarzi M.R. (2009). " Seismic Analysis of Hydrodynamic Sloshing Force on Storage Tanks Roofs " Earthquake Spectra , , Earthquake Engineering Research Institute.
 13. PEER Strong Motion Database. University of Colifornia
 14. <http://peer.berkeley.edu/>. Haroun MA, Tayel MA, (1985). Response of tanks to vertical seismic excitations. Earthquake Engineering and Structural Dynamic. 583-95
 - response of concrete rectangular tanks for liquid containing structures. Canad J Civ Eng; 32:739.
 7. Kianoush MR, Chen JZ. (2006). Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. Eng Struct; 28(5):704-15.
 8. Sweedan, A.M.I. (2009) " Equivalent mechanical model for seismic forces in combined tanks subjected to vertical earthquake excitation" Thin - Walled Structures, 47, 942-52.
 9. Ghaemmaghami AR, Kianoush MR. (2010). "Effect of wall flexibility on dynamic response of concrete rectangular tanks under horizontal and vertical ground motions." ASCE J Struct Eng; 136 (4):441-51.
 10. Kianoush MR, Ghaemmaghami AR. (2010). "The effect of earthquake frequency content on the seismic