مجله علمی- پژوهشی
«عمـران مـــدرس»
دوره دوازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۱

تحلیل لرزه‌ای مخازن ذخیره سیال مجهز به تیغه میراگر حلقوی با استفاده از روش المان مرزی

محمّد حسین عرب[۱]، ناصر خاجی[۲*]

۱- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرّس

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرّس

nkhaji@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۲۰

چکیده- اهمیت مخازن ذخیره سیال در زندگی امروزه به اندازه سیالاتی است که در زندگی شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعات گوناگونی بر روی این سازه‌های تأثیرگذار انجام شده است که از جمله این مطالعات تأثیر سیستم‌های کنترل بر پاسخ لرزه‌ای مخزن است. از میان سیستم‌های مزبور، تیغه‌های میراگر به عنوان یکی از ابزارهای کنترل غیرفعال با هدف کاهش تأثیر امواج تلاطمی بر پاسخ مخازن ذخیره سیال مطرح است. در این پژوهش، تأثیر تیغه‌های میراگر حلقوی‌شکل، که در ارتفاع معینی از کف مخازن زمینی استوانه‌ای نصب شده است، بررسی می‌شود. با در نظر گرفتن معادله لاپلاس به عنوان رابطه حاکم بر رفتار سیال و با استفاده از روش المان مرزی، آنالیز مخزن صلب در قلمرو فرکانس و زمان انجام شده است. سپس تأثیر تیغه میراگر بر فرکانس مود طبیعی (در قلمرو فرکانس) و برش پایه و لنگر واژگونی (در قلمرو زمان) تحت زلزله‌های ارزینکان و السنترو بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل از آنالیزهای مزبور، ملاحظه می‌شود که با قراردادن تیغه شاهد کاهش فرکانس مود طبیعی خواهیم بود. همچنین، تأثیر تیغه بر پاسخ تحریک ناشی از دو شتاب‌نگاشت یادشده به صورت افزایش ناچیز برش پایه و کاهش چشمگیر لنگر واژگونی بوده است.

واژگان کلیدی: مخزن استوانه‌ای، تیغه میراگر حلقوی، روش المان مرزی، تلاطم سطح آزاد، تحلیل لرزه‌ای

۱- مقدمه

آسیب‌دیدگی مخازن ذخیره سیال تحت تأثیر زلزله‌های اخیر مانند لوماپریتای امریکا، لوزان فیلیپین، هوکایدوی ژاپن، ارزینکان ترکیه، نورثریج امریکا، کوبه ژاپن، ایزمیت ترکیه، و هاییتی امریکا باعث شد تا محققان زیادی به مطالعه و بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیلی در این زمینه بپردازند. در زلزله سال ۱۹۹۳ هوکایدوی ژاپن ٦ مخزن آسیب جدی دیده‌اند؛ در زلزله ازمیت ترکیه هم ۲۳ مخزن مهم آتش گرفتند. امواج تلاطمی سطح آب در مخازن عامل قابل توجه و تأثیرگذار در پاسخ مخزن به تحریکات لرزه‌ای است. امواج تلاطمی، علاوه بر اینکه روی برش پایه و لنگر واژگونی تأثیر قابل توجه دارند، درتعیین اندازه ارتفاع آزاد و آسیب‌های ناشی از آن به‌ویژه خرابی مخازن سقف‌دار و متعاقب آن، آسیب‌های وارد بر جداره نیز تأثیرگذار است. تلاطم در مخازن بدون وجود ابزار کاهش اثر تلاطم، توسط تنش لزجت اتلاف می‌شود که تأثیر آن بسیار کم است [۱].

بنابراین، استفاده از روش‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای کاهش تأثیر امواج ثقلی می‌تواند باعث بهبود عملکرد مجموعه سازه و سیال و منجر به کاهش هزینه ساخت شود [۲]. یکی از این روش‌ها، استفاده از تیغه‌های میراگر با شکل‌ها و جانمایی‌های مختلف برای کاهش اثرات تحریک است. مکانیسم تیغه میراگر، به عنوان یک سیستم کنترل غیر فعال، ایجاد محلی برای اتلاف انرژی است.

شروع مطالعات بر روی تیغه‌های میراگر به مطالعات سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا در دهه شصت میلادی برمی‌گردد. از آن دوران به بعد، مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی در زمینه تیغه‌های میراگر ادامه پیدا کرد که در این میان می‌توان به مطالعات میلز [۳]، سیلوریا و همکاران [٤]، ولت و مودی [٥] و ملکی و ضیایی‌فر [٦] اشاره کرد. پیشرفت‌های اخیر در زمینه روش‌های عددی و کاربرد آن در مسائل مربوط به مکانیک سیالات و جامدات باعث استفاده از این روش‌ها در زمینه مدل‌کردن رفتار مخزن شده است. از میان روش‌های عددی، روش المان محدود و روش المان مرزی در مدل‌کردن مخازن بیشترین استفاده را داشته‌اند. در سال ۱۹۹۹، گدیکلی و ارگوون مدل المان مرزی مخزن صلب را تحت بار لرزه‌ای هارمونیک و همچنین تحت زلزله واقعی مطالعه کردند و تأثیر تیغه بر برش پایه، لنگر واژگونی و فرکانس مود طبیعی سیال را ارزیابی کردند [۷]. در سال ۲۰۰۲، چو و همکاران، با استفاده از روش المان محدود، تأثیر تیغه میراگر را بر فرکانس مود طبیعی مخزن انعطاف‌پذیر برای سیال تراکم‌پذیر بررسی کردند [۸]. در سال ۲۰۰٤، چو و لی یک مدل المان محدود دوبعدی با رویکرد شبه‌لاگرانژی و شرایط سطح آزاد غیرخطی ارائه دادند و تأثیر تیغه را بر برش پایه و لنگر واژگونی تحت تحریک هارمونیک بررسی کردند [۹]. در سال ۲۰۰۵، چو و همکاران یک مدل المان محدود دوبعدی ارائه کردند که در شرط مرزی سطح‌آزاد، عبارت میرایی ساختگی گنجانده شده بود و تأثیر تعداد، ارتفاع، بازشدگی تیغه و میرایی سطح آزاد بر فرکانس مود طبیعی سیال و ارتفاع سطح آزاد آب مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. در سال ۲۰۰۸، فیروزآبادی و همکاران یک مدل المان مرزی برای سیال داخل مخزن ارائه دادند که توانایی مدل‌کردن مخازن با هندسه‌های مختلف و حالت‌های مختلف تیغه را داشته و تأثیر تیغه بر روی فرکانس مود طبیعی سیال مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۱].

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر تیغه میراگر حلقوی‌شکل بر پاسخ سیال، در مخازن صلب استوانه‌ای زمینی، تحت تحریک هارمونیک و زلزله واقعی است. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد روش المان مرزی، مانند دقت و سرعت بالای آن به دلیل تعداد المان کمتر، نسبت به سایر روش‌های عددی، از این روش برای مدل‌کردن سیال داخل مخزن استفاده می‌شود. شایان ذکر است که در زمینه بررسی اثرات تیغه‌های میراگر بر رفتار لرزه‌ای مخازن، در مطالعات قبلی نیز که به کمک روش المان مرزی انجام شده، مخازن موردنظر به‌صورت صلب منظور شده‌اند. از سوی دیگر، انعطاف‌پذیری این مخازن (به‌ویژه تیغه میراگر) و درنظر گرفتن اثرات اندرکنش سیال و سازه، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها داشته باشد. بنابراین، لازم است که فرمول‌بندی جدیدی برای بررسی تأثیر تیغه میراگر بر پاسخ سیال، با درنظرگرفتن انعطاف-پذیری سازه (یعنی حل مسئله اندرکنش سیال و سازه) ارائه شود. این مسئله برای نخستین‌بار به کمک روش المان مرزی در مرجع [۱۲] بررسی و تحلیل شد. آن‌چه در این مقاله ارائه می‌شود بخش اول فرمول‌بندی مزبور برای مخازن صلب است، چرا که، لازم است در ابتدا صحت فرمول‌بندی مزبور برای این نوع مخازن (که توسط محققان

قبلی تحلیل شده‌اند) به اثبات برسد. ناگفته نماند که با توجه به مفصل‌بودن فرمول‌بندی پیشنهادی برای مخازن انعطاف‌پذیر، تحلیل این نوع مخازن مجال دیگری می‌طلبد و در مقاله حاضر ارائه نشده است.

۲- روابط حاکم بر رفتار سیال

برای سیال غیرقابل تراکم و غیرلزج درون مخزن محدود، معادله حاکم بر رفتار سیال مخزن معادله لاپلاس است که به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$\nabla^2\varphi(x,y,z,t)=0. \qquad (۱)$$

با توجه به این که در مخازن محدود امواج سطحی تأثیر قابل توجهی بر پاسخ سیستم مخزن و سازه دارند، با در نظر گرفتن اثرات تلاطمی و فرض غیرقابل تراکم بودن، شرط مرزی سطح آزاد به صورت زیر بیان می‌شود. عوامل مؤثر در شرایط سطح آزاد دو مؤلفه ثقل و کشش سطحی است، که به علت کم‌بودن تأثیر کشش سطحی نسبت به اثرات ثقل از این عبارت صرف‌نظر کرده و تنها تأثیر ثقل بررسی می‌شود:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}+g\frac{\partial\varphi}{\partial z}=0 \qquad (۲)$$

در سطح تماس سیال و سازه (محل تماس با مرزهای شتابدار جامد) شرط مرزی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n}=v_n(t) \qquad (۳)$$

از آنجا که آنالیز دینامیکی با فرض بارگذاری در برای افقی انجام می شود، در کف مخزن سرعت قائم صفر بوده و شرط مرزی آن صفر است. در روابط بالا، φ پتانسیل سرعت، ρ جرم واحد حجم سیال و $v_n(t)$ سرعت سیال در برای عمود بر دیواره مخزن است. پس از تحلیل رابطه پتانسیل سرعت، می‌توان فشار دینامیکی را در نقاط مورد نظر از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$P=-\rho\frac{\partial\varphi}{\partial t} \qquad (٤)$$

پس از محاسبه فشار دینامیکی در نقاط مختلف مخزن، با استفاده از مقادیر مذکور در سطح آزاد سیال می توان تغییر مکان نقاط مختلف آن‌را به‌دست آورد:

$$P=\rho g\eta(x,y,t) \qquad (٥)$$

که در آن، $\eta(x,y,t)$ تغییر مکان نقاط مختلف سطح آزاد سیال را نشان می‌دهد [۱۳]. با استفاده از روش المان مرزی می‌توان مقادیر مختلف تابع پتانسیل سرعت را به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$[H]\{\varphi\}=[G]\{q\} \qquad (٦)$$

که در آن، $[H]$ و $[G]$ ماتریسهای ضرایب روش المان مرزی، و $\{\varphi\}$ و $\{q\}$ به‌ترتیب بردارهای پتانسیل سرعت و شار است [۱٤]. رابطه اخیر را می‌توان به فرم مبسوط زیر نیز نوشت:

$$\sum_{j=1}^{N}H^{ij}\varphi^j=\sum_{j=1}^{N}G^{ij}q^j\ . \qquad (۷)$$

برای هر مخزن دارای تیغه‌های میراگر، آنالیز المان مرزی به صورت معمولی باعث ازبین رفتن بهره‌وری و دورشدن مدل از واقعیت مسئله می‌شود و در واقع مدل تبدیل به یک مدل نادرست می‌شود. علت این است که در المان‌های واقع در روی تیغه میراگر، به علت ضخامت کم تیغه، المان‌ها به هم نزدیک می‌شوند و این مشکل زمانی نمود پیدا می‌کند که برای به‌دست آوردن تأثیر یک گره بر گره‌های دیگر از مقدار حل اساسی انتگرال می‌گیریم که این مقدار با نزدیک‌شدن

المان‌ها به یکدیگر باعث ایجاد خطا به علت تکینه‌گی می‌شود؛ به بیان دیگر، در قطر اصلی ماتریس ضرایب و ماتریس مجهولات دچار خطاهای قابل ملاحظه‌ای می‌شویم. برای رفع این مشکل، مخزن به نواحی مجزایی تقسیم می‌شود؛ به قسمی که در آن هیچ تیغه‌ای وجود ندارد و اثر تیغه‌ها تنها در شرایط مرزی مشاهده می‌شود، و هر ناحیه یک مدل المان مرزی کامل است. در این صورت، برای هر ناحیه بایستی فرایند المان مرزی مستقل از ناحیه دیگر درنظر گرفت. سپس معادلات نهایی برای کل فضا، از طریق ترکیب معادلات ناحیه‌ها بر اساس سازگاری شارها و پتانسیل‌های بین مرز مشترک، تعیین می‌شود.

اگر با توجه به شکل ۱ ناحیه سیال را به دو ناحیه بالا و پایین تیغه میراگر تقسیم کنیم و برای هر ناحیه معادلات المان مرزی به صورت مجزا نوشته شود، آنگاه ماتریس کلی به دو زیرماتریس برای دو ناحیه، مطابق رابطه (۸)، تقسیم می‌شود:

$$\begin{bmatrix} [H]_{r1r1} & [H]_{r1c1} & & & & \\ [H]_{c1r1} & [H]_{c1c1} & & & & \\ & & [H]_{c2c2} & [H]_{c2r2} & [H]_{c2f2} & \\ & & [H]_{r2c2} & [H]_{r2r2} & [H]_{r2f2} & \\ & & [H]_{f2c2} & [H]_{f2r2} & [H]_{f2f2} & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varphi\}_{r1} \\ \{\varphi\}_{c1} \\ \{\varphi\}_{c2} \\ \{\varphi\}_{r2} \\ \{\varphi\}_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [G]_{r1r1} & [G]_{r1c1} & & & & \\ [G]_{c1r1} & [G]_{c1c1} & & & & \\ & & [G]_{c2c2} & [G]_{c2r2} & [G]_{c2f2} & \\ & & [G]_{r2c2} & [G]_{r2r2} & [G]_{r2f2} & \\ & & [G]_{f2c2} & [G]_{f2r2} & [G]_{f2f2} & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\}_{r1} \\ \{q\}_{c1} \\ \{q\}_{c2} \\ \{q\}_{r2} \\ \{q\}_{f2} \end{Bmatrix} \quad (۸)$$

که در آن، $[H]_{...}$ و $[G]_{...}$ زیرماتریس‌های ضرایب المان مرزی است و اندیس‌های r، f و c به‌ترتیب معرف مرز جداره صلب، مرز سطح آزاد، و مرز سطح مشترک دو ناحیه در محل بازشوی تیغه میراگر است.

دو زیرماتریس رابطه (۸) به‌وسیله شرایط پیوستگی مرز مشترک بین دو ناحیه با هم درگیر می‌شوند.

با بیان شرایط سطح مشترک به صورت تساوی پتانسیل سرعت ($\{\varphi\}_{c1} = \{\varphi\}_{c2}$) و بقای شار ($\{q\}_{c1} = -\{q\}_{c2}$) روی مرز مشترک، پس از انجام محاسبات ماتریسی کوتاهی، رابطه درگیر دو زیرناحیه به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} [H]_{r1r1} & [H]_{r1c1} & & & \\ [H]_{c1r1} & [H]_{c1c1} & & & \\ & [H]_{c2c2} & [H]_{c2r2} & [H]_{c2f2} & \\ & [H]_{r2c2} & [H]_{r2r2} & [H]_{r2f2} & \\ & [H]_{f2c2} & [H]_{f2r2} & [H]_{f2f2} & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varphi\}_{r1} \\ \{\varphi\}_{c1} \\ \{\varphi\}_{r2} \\ \{\varphi\}_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [G]_{r1r1} & [G]_{r1c1} & & & \\ [G]_{c1r1} & [G]_{c1c1} & & & \\ & -[G]_{c2c2} & [G]_{c2r2} & [G]_{c2f2} & \\ & -[G]_{r2c2} & [G]_{r2r2} & [G]_{r2f2} & \\ & -[G]_{f2c2} & [G]_{f2r2} & [G]_{f2f2} & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\}_{r1} \\ \{q\}_{c1} \\ \{q\}_{r2} \\ \{q\}_{f2} \end{Bmatrix} \quad (۹)$$

با درنظر گرفتن حرکت هارمونیک در حوزه فرکانس و حل رابطه بالا، می‌توان فشار هیدرودینامیکی نقاط مختلف مخزن را به کمک رابطه (۱۰) به‌دست آورد. شایان ذکر است که تمام پارامترهای مورد نیاز در رابطه (۱۰) در روابط (۱۱) تا (۱۶) تعریف شده‌اند.

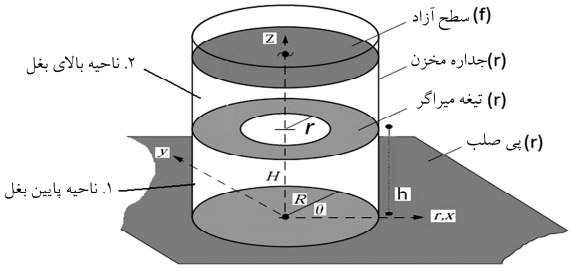
$$\begin{bmatrix} [F]_{r1r1} & [F]_{r1r2} & [F]_{r1f2} \\ [F]_{r2r1} & [F]_{r2r2} & [F]_{r2f2} \\ [F]_{f2r1} & [F]_{f2r2} & [F]_{f2f2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varphi\}_{r1} \\ \{\varphi\}_{r2} \\ \{\varphi\}_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{L\}_{r1} \\ \{L\}_{r2} \\ \{L\}_{f2} \end{Bmatrix} \quad (۱۰)$$

$$[F]_{ij} = [J]_{ij} + [K]_{ic2}[K]^{-1}_{c1c1}[J]_{c2j} \quad (۱۱)$$

$$[J]_{ij} = \begin{cases} [\overline{H}]_{ij} + [\overline{H}]_{ij}[\overline{H}]^{-1}_{c1c1}[\overline{H}]_{c1j} & , j = r1 \\ [\overline{H}]_{ij} & , j \neq r1 \end{cases} \quad (۱۲)$$

$$[K]_{ij} = \begin{cases} [\overline{H}]_{ij}[\overline{H}]^{-1}_{jj}[G]_{jj} - [G]_{ij} & , i = r1 \\ [\overline{H}]_{ij}[\overline{H}]^{-1}_{jj}[G]_{jj} + [G]_{ij} & , i \neq r1 \end{cases} \quad (۱۳)$$

$$[L]_j = [R]_j + ([K]_{jc2}[K]^{-1}_{c1c1}[\overline{H}]_{c2c2} - [\overline{H}]_{jc1}) \cdot [\overline{H}]^{-1}_{c1c1}[R]_{c1} + [K]_{jc1}[K]^{-1}_{c1c1}[R]_{c2} \quad (۱۴)$$



شکل (۱) مخزن دارای تیغه میراگر حلقوی‌شکل

$$[\overline{H}]_{ij} = \begin{cases} [H]_{ij} - \dfrac{\omega^2}{g}[G]_{ij} & , j = f2 \\ [H]_{ij} & , j \neq f2 \end{cases} \qquad (۱۵)$$

$$\{R\}_j = \sum_{j=1}^{N} [G]_{ji}\{q\}_i \qquad (۱۶)$$

با به‌دست آوردن پتانسیل سرعت، می‌توان فشار هیدرودینامیکی روی المان‌ها را به ازای فرکانس و دامنه مشخص به‌دست آورد. برای تحلیل قلمرو زمان، شتابنگاشت اعمالی با استفاده از روش تبدیل فوریه به قلمرو فرکانس انتقال داده می‌شود و پس از تحلیل در قلمرو فرکانس، نتایج با استفاده از تبدیل فوریه معکوس به قلمرو زمان برگردانده می‌شود.

۳- شرح مطالعات عددی

در این پژوهش، برای مطالعه دقیق رفتار سیال داخل مخزن دارای تیغه میراگر از روش المان مرزی کمک گرفته شده و یک برنامه رایانه‌ای بر اساس فرمول‌بندی توسعه داده شده در این مقاله، نوشته شده است. برای کنترل نتایج خروجی برنامه تهیه‌شده، فرکانس مود طبیعی تلاطم سیال، ω_n، در حالت‌های مختلف مخزن بدون تیغه با نتایج به‌دست آمده توسط رابطه تحلیلی ولتسوس، رابطه (۱۷)، مقایسه شده است [۱۵]:

$$\omega_n \sqrt{\frac{R}{g}} = \sqrt{\lambda_j \left(\tanh(\lambda_j \frac{H}{R}) \right)} \qquad (۱۷)$$

که در آن، λ_j برای مودهای اول و دوم به‌ترتیب برابر ۱/۸۴۱۲ و ۵/۳۳۱۴ است.

برای آنالیز دینامیکی، از شتاب‌نگاشت‌های زلزله سال ۱۹۹۲ ارزینکان ترکیه (با شتاب بیشینه ۰/۳۸ برابر شتاب ثقل) و زلزله سال ۱۹۴۰ ال‌سنترو (با شتاب بیشینه ۰/۳۵ برابر شتاب ثقل) استفاده شده است. این دو شتاب‌نگاشت، در مطالعات قبلی در زمینه بررسی رفتار مخازن ذخیره سیال در برابر زلزله، مورد استفاده سایر پژوهشگران (مثلاً [۷]) نیز بوده‌اند. تحریک اعمال‌شده در برای محور x درنظر گرفته شده است. سیال درنظر گرفته شده در این پژوهش آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

۴- صحت‌سنجی برنامه برای آنالیز مخزن صلب

فرکانس مود طبیعی مخزن به هندسه مخزن وابسته است. در واقع با تغییر نسبت ارتفاع به شعاع مخزن تأثیر تلاطم سطح آزاد سیال در پاسخ لرزه‌ای سیال متفاوت خواهد بود. برای صحت‌سنجی برنامه نگارش‌شده، فرکانس مود طبیعی اول و دوم مخازن با نسبت ارتفاع به شعاع مختلف با نتایج به‌دست آمده توسط رابطه ولتسوس مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین نتایج به‌دست آمده و حل ولتسوس [۱۵] وجود دارد.

جدول (۱) فرکانس مودهای طبیعی مخزن (هرتز)

	مود اول			مود دوم		
H/R	ولتسوس	المان مرزی	درصد خطا	ولتسوس	المان مرزی	درصد خطا
۱/۵	۱/۳۵	۱/۳۷	۱/٤۸	۲/۳۰۹	۲/٤	۳/۹٤
۱/۲	۱/۳٤	۱/۳٦	۱/٤۹	۲/۳۰۹	۲/۳۸	۳/۰۷
۱	۱/۳۲	۱/۳۳	۰/۷٦	۲/۳۰۹	۲/۳۸	۳/۰۷
۰/۸	۱/۲۹	۱/۲۹٦	۰/٤۷	۲/۳۰۹	۲/۳٦	۲/۰۸
۰/٦	۱/۲۲	۱/۲۳	۰/۸۲	۲/۳۰٥	۲/۳۳	۱/۰۸
۰/٤	۱/۰۷	۱/۰٥٦	۱/۳	۲/۲۷۷	۲/۲٥	۱/۱۸
۰/۲	۰/۸	۰/۷۸	۲/٥	۲/۰٤	۱/۹۸	۲/۹

۵- آنالیز قلمرو فرکانس

همان‌گونه که در مطالعات پارامتری بخش‌های بعدی ملاحظه می‌شود، با حضور تیغه میراگر در مخزن استوانه‌ای، فرکانس مود طبیعی سیال تغییر می‌کند که این میزان تغییر وابسته به محل قرارگیری تیغه میراگر (نسبت ارتفاع جانمایی تیغه به ارتفاع مخزن) و شعاع داخلی تیغه میراگر است. ویژگی هندسی مخزن صلب اغلب به صورت نسبت ارتفاع به شعاع مخزن (H/R) معرفی می‌شود. با درنظر گرفتن خصوصیت هندسی تیغه به‌صورت پارامترهای بی‌بعد نسبت ارتفاع تیغه به ارتفاع مخزن (h/H) و نسبت شعاع داخلی تیغه به شعاع مخزن (r/R)، برای مخازن با ویژگی‌های هندسی یکسان، فرکانس مود طبیعی بی‌بعد یکسان به‌دست می‌آید. روابط بی‌بعد مورد نیاز برای فرکانس مود طبیعی بی‌بعد، برش پایه بی‌بعد در برای محور x، و لنگر واژگونی بی‌بعد حول محور y، به‌ترتیب در زیر آورده شده است [۷]:

$$\omega^n = \omega\sqrt{\frac{R}{g}}$$
$$F_x^n = \frac{F_x}{\rho g R^3} \qquad (۱۸)$$
$$M_y^n = \frac{M_y}{\rho g R^4}$$

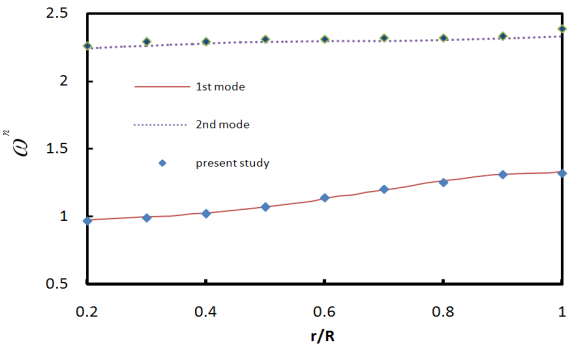
برای صحت‌سنجی برنامه، تأثیر تیغه میراگر بر فرکانس مود طبیعی برای مخزن مجهز به تیغه میراگر با H/R=1 و h/H=0.7 و نسبت‌های مختلف r/R با نتایج گدیکلی و ارگوون [۷] مقایسه شده است. نتایج به صورت گراف در قالب شکل ۲ برای مود اول و دوم آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۲ پیداست، بین نتایج گدیکلی و ارگوون [۷] و نتایج به‌دست آمده از برنامه نوشته‌شده در این پژوهش انطباق خوبی در هر دو مود وجود دارد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که، با کاهش شعاع داخلی تیغه میراگر، فرکانس مود طبیعی سیال کاهش پیدا می‌کند. این تأثیر بر روی فرکانس مود اول بیشتر است.

۶- آنالیز قلمرو زمان

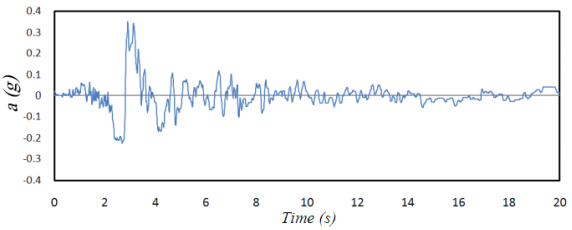
شکل ۳ شتاب‌نگاشت‌های اعمال‌شده بر مخزن را نشان می‌دهد. با اعمال شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه ارزینکان ترکیه و السنترو بر روی مخزن استوانه‌ای با نسبت‌های هندسی برابر با ۱/۵ و ۰/۷۵، برای دو حالت قرارگیری تیغه میراگر در ارتفاع‌های نسبی ۰/۷ و ۰/۹، تأثیر تیغه بر پاسخ لرزه‌ای در حالت‌های مختلف شعاع داخلی نسبی تیغه بررسی شد. تیغه میراگر بر نیروی هیدرودینامیک وارد بر جداره‌های مخزن و خود تیغه و در نتیجه بر برش پایه و لنگر واژگونی مخزن تأثیر می‌گذارد. تأثیر تیغه میراگر بر برش پایه و لنگر واژگونی برای ارتفاع‌های نسبی تیغه مطالعه شده و در شکل‌های ٤ و ٥ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، با نصب تیغه میراگر برش پایه ناشی از تحریک توسط شتاب‌نگاشت‌های یادشده به صورت ناچیز افزایش پیدا کرده و البته لنگر به صورت چشمگیر کاهش می‌یابد. به صورت کلی، هر چه تیغه به سطح آزاد مخزن نزدیک‌تر باشد، افزایش برش پایه و کاهش لنگر واژگونی قابل ملاحظه خواهد بود. در توضیح این پدیده‌ها، می‌توان گفت که استفاده از تیغه میراگر اغلب منجر به کاهش فشار تلاطمی ناشی از جرم انتقالی و افزایش فشار ناشی از جرم ضربه‌ای می‌شود که این امر در نهایت باعث افزایش برش پایه و کاهش لنگر واژگونی می‌شود. نمی‌توان ادعا کرد که کاهش لنگر واژگونی صرفاً به دلیل کاهش فشار هیدرودینامیک در ارتفاع بالاتر در جداره است؛ در واقع مقداری از کاهش لنگر واژگونی می‌تواند به علت لنگر معکوسی است که به تیغه میراگر اعمال می‌شود.

علاوه بر این، هر چه نسبت شعاع داخلی تیغه میراگر به شعاع مخزن کوچک‌تر باشد افزایش برش و کاهش ممان بیشتر می‌شود.

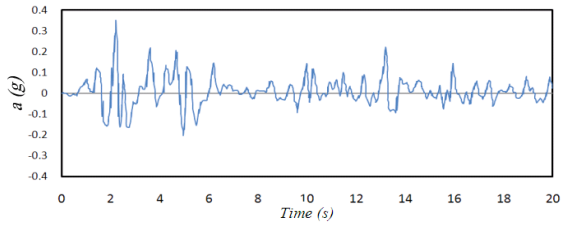
همان‌طور که در جدول شماره ۲ نشان داده شده است، برای مخازن با نسبت ارتفاع به شعاع ۰/۷۵ تأثیر تیغه بسیار قابل ملاحظه‌تر از مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۱/۵ است. این موضوع با توجه به اینکه امواج تلاطمی در مخازن چاق مشهودتر است قابل پیش‌بینی است. البته مقدار کاهش و افزایش پاسخ لرزه‌ای مخزن بر اساس تغییرات خصوصیات هندسی، به ماهیت لرزه‌ای شتاب‌نگاشت اعمال‌شده نیز بستگی دارد. در بعضی از قسمت‌های نمودارهای رسم‌شده فراز و فرودهایی دیده می‌شود که عموماً ناشی از تأثیر تیغه بر فرکانس مود طبیعی سیال و محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت اعمال شده است.



شکل (۲) تغییرات فرکانس مود طبیعی به ازای تغییر شعاع داخلی تیغه



(الف) زمین‌لرزه ارزینکان



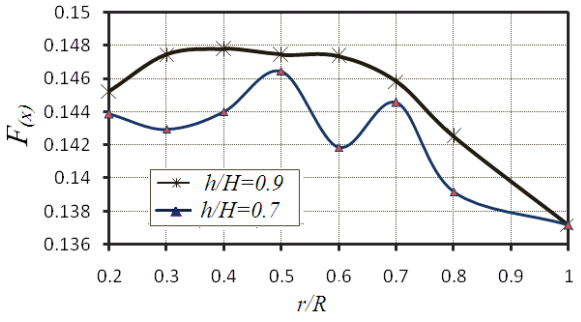
(ب) زمین‌لرزه السنترو

شکل (۳) شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این پژوهش

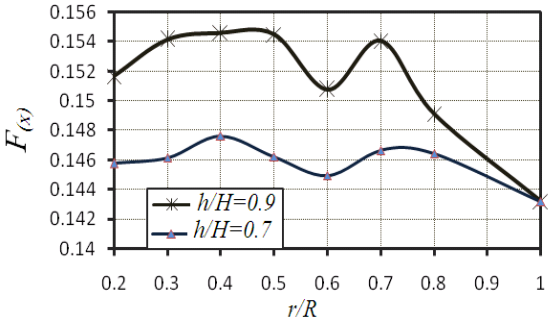
۷- تلاطم سطح آزاد

یکی از مواردی که در مطالعات روی مخازن اهمیت فراوانی دارد، مطالعه رفتار سطح آزاد سیال در حضور تیغه میراگر است. تلاطم سطح آزاد سیال می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی در هنگام وقوع زلزله شود و لذا ارتفاع تلاطم سطح آزاد سیال عامل مهمی در تعیین ارتفاع آزاد مخزن است. در این قسمت، برای درک بهتر تأثیر تیغه میراگر بر تغییر مکان سطح آب، نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان سطح آب وطیف فوریه آن، برای مخازن با نسبت ارتفاع به شعاع برابر با ۱/۵ و ۰/۷۵، تحت زلزله السنترو و ارزینکان، در حالت‌های عدم حضور تیغه میراگر و همراه با تیغه میراگر، با شعاع داخلی ۰/۶ و ۰/۳ شعاع مخزن ارائه شده است. ارتفاع تیغه‌ها نسبت به ارتفاع مخزن برابر با ۰/۹ است.

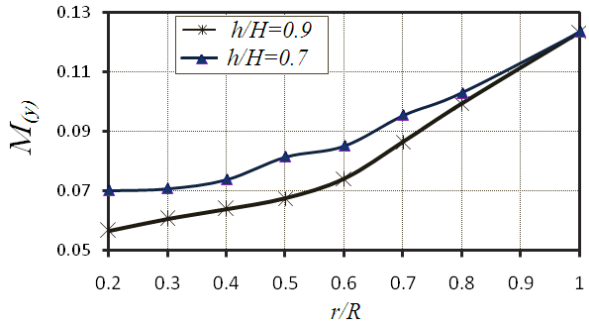
شایان ذکر است که برای مطالعه رفتار سطح آزاد، استفاده از دیدگاه لاگرانژی و انتخاب متغیرهای تغییر مکان به‌عنوان درجه آزادی مستقل، این مزیت را دارد که تغییرات سطح آزاد سیال مستقیماً قابل تعیین خواهد بود [۱۶]. برای به‌دست آوردن ارتفاع سطح آزاد در دیدگاه اویلری، فرض خطی‌بودن رفتار سیال درنظر گرفته می‌شود و لذا، با استفاده از رابطه (۵) و با داشتن فشار به‌دست آمده از روش المان مرزی، تغییر مکان سطح آزاد قابل محاسبه خواهد بود. شایان ذکر است که رابطه (۵)، برای نسبت ارتفاع به شعاع مخزن (H/R) و زلزله‌های مورد استفاده در این پژوهش، که تئوری موج خطی برای تلاطم سطحی امواج قابل کاربرد است، معتبر می‌باشد. شکل‌های ۶ تا ۹ طیف دامنه فوریه فشار هیدرودینامیکی برای یک نقطه از سطح سیال را نشان می‌دهند. این شکل‌ها برای دو زلزله مورد مطالعه و برای نسبت‌های مختلف h/H، r/R و H/R ترسیم شده‌اند.



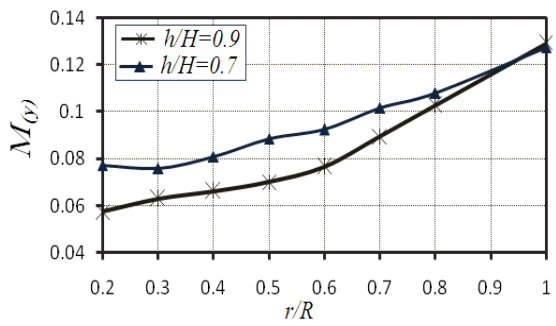
پ) برش پایه بی‌بعد (زلزله السنترو)



الف) برش پایه بی‌بعد (زلزله ارزینکان)

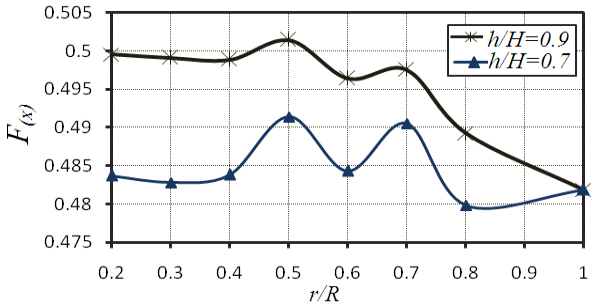


ت) لنگر واژگونی بی‌بعد (زلزله السنترو)

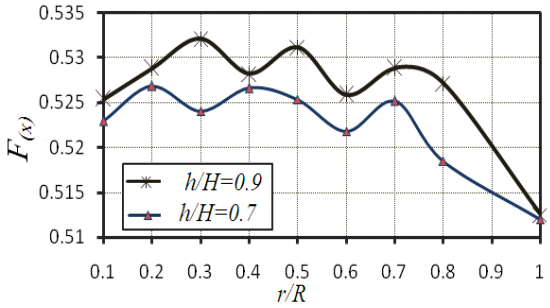


ب) لنگر واژگونی بی‌بعد (زلزله ارزینکان)

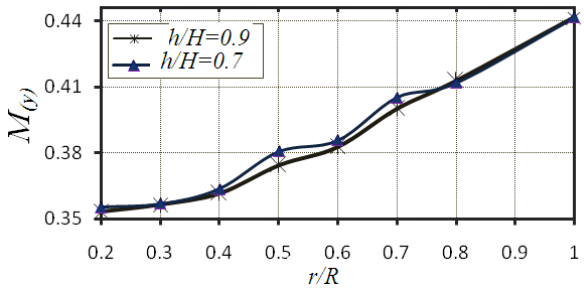
شکل (٤) تغییرات برش پایه و لنگر واژگونی برای یک مخزن با نسبت هندسی ۰/۷۵



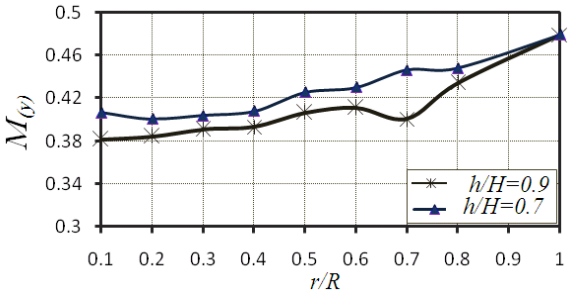
پ) برش پایه بی‌بعد (زلزله السنترو)



الف) برش پایه بی‌بعد (زلزله ارزینکان)



ت) لنگر واژگونی بی‌بعد (زلزله السنترو)

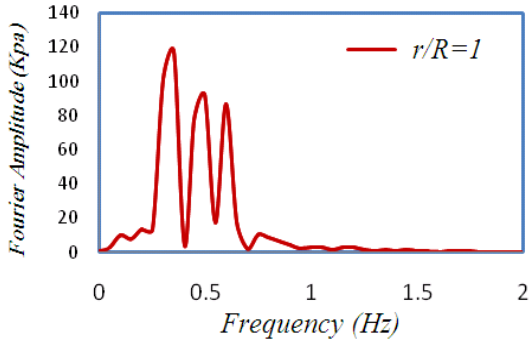


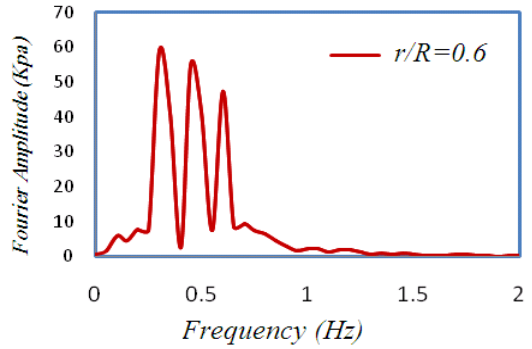
ب) لنگر واژگونی بی‌بعد (زلزله ارزینکان)

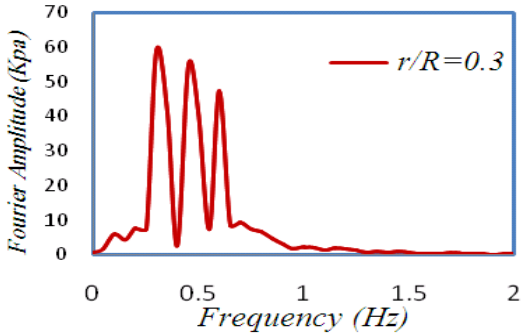
شکل (٥) تغییرات برش پایه و لنگر واژگونی برای یک مخزن با نسبت هندسی ۱/۵

جدول (۲) مقادیر برش پایه و لنگر واژگونی

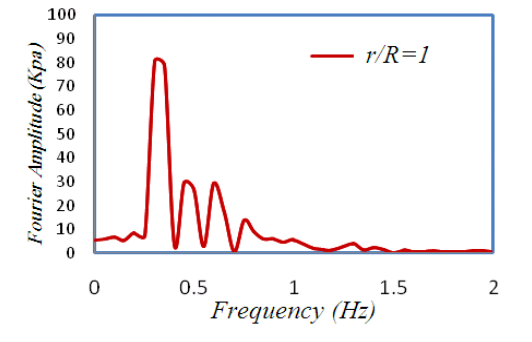
زلزله	H/R	h/H	برش پایه (میلیون نیوتن)			لنگر واژگونی (میلیون نیوتن متر)		
			بدون تیغه میراگر	با تیغه میراگر	بیشینه افزایش (٪)	بدون تیغه میراگر	با تیغه میراگر	بیشینه کاهش (٪)
ارزینکان	۱/۵	۰/۷	۲/۰۱	۲/۰۶	۲/۷۳	۱۳/۸	۱۱/۵	۱۶/۴۹
		۰/۹	۲/۰۱	۲/۰۹	۳/۹۱	۱۳/۸	۱۱/۰	۲۰/۳۱
	۰/۷۵	۰/۷	۰/۵۶۱	۰/۵۷۹	۳/۲۲	۳/۶۷	۲/۱۸	۴۰/۶۲
		۰/۹	۰/۵۶۱	۰/۶۰۶	۸/۱۱	۳/۶۷	۱/۶۴	۵۵/۴۶
السنترو	۱/۵	۰/۷	۱/۸۸	۱/۹۳	۲/۲۹	۱۲/۷	۱۰/۲	۱۹/۵۰
		۰/۹	۱/۸۸	۱/۹۷	۴/۳۷	۱۲/۷	۱۰/۱	۱۹/۹۵
	۰/۷۵	۰/۷	۵/۳۷	۵/۷۳	۶/۵۷	۳/۵۶	۲/۰۱	۴۳/۵۴
		۰/۹	۵/۳۷	۵/۸۷	۷/۷۶	۳/۵۶	۱/۶۱	۵۴/۸۴

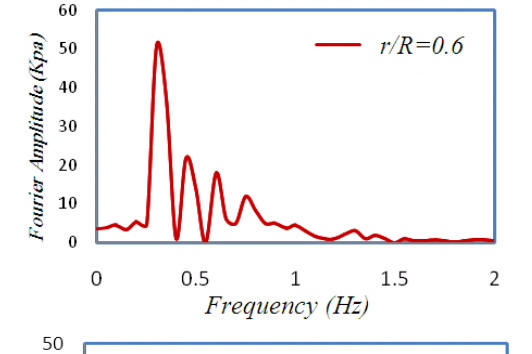


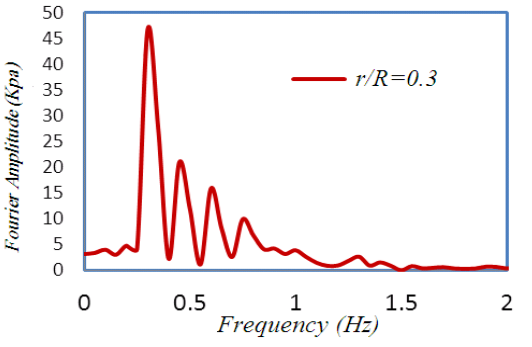




شکل (٦) طیف دامنه فوریه فشار هیدرودینامیکی برای تیغه‌های مختلف در ارتفاع نسبی ۰/۹ و نسبت ارتفاع به شعاع مخزن ۰/۷۵ (زلزله ارزینکان)



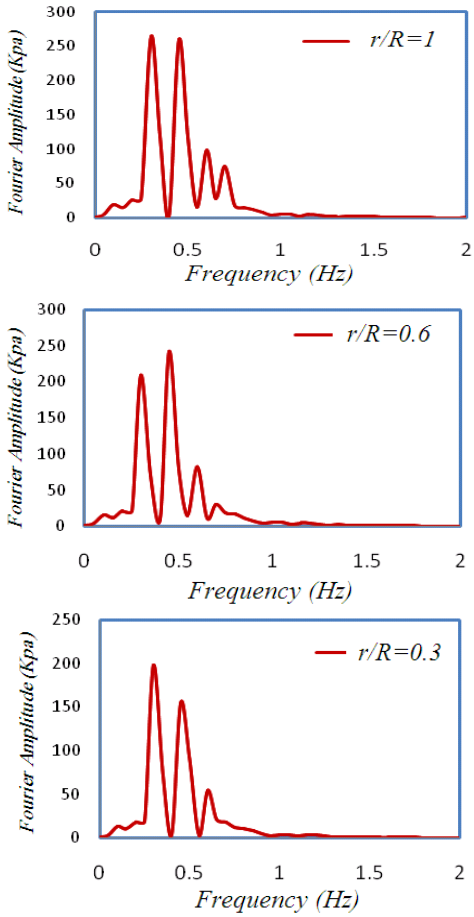




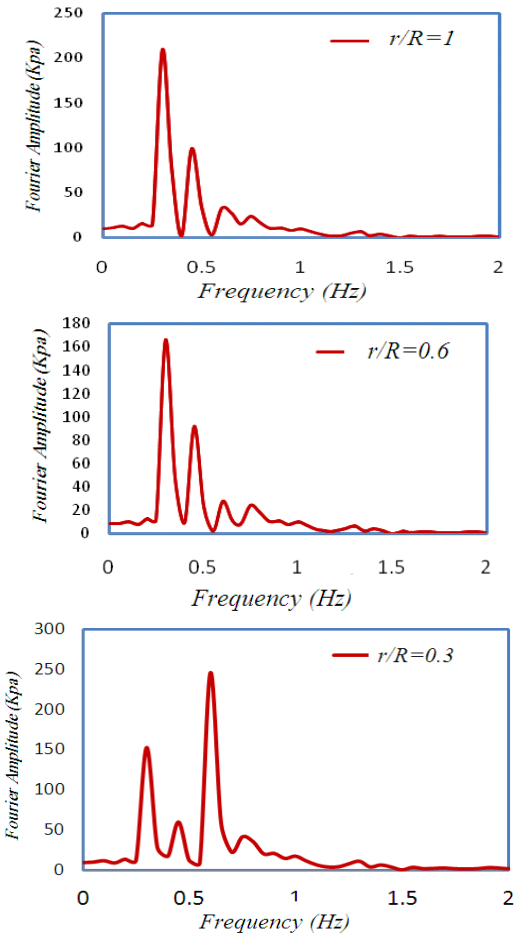
شکل (۷) طیف دامنه فوریه فشار هیدرودینامیکی برای تیغه‌های مختلف در ارتفاع نسبی ۰/۹ و نسبت ارتفاع به شعاع مخزن ۰/۷۵ (زلزله السنترو)

این شکل‌ها مستقیماً از نتایج تحلیل روش المان مرزی به‌دست آمده‌اند که از روی نقاط بیشینه این طیف‌ها می‌توان فرکانس مودهای مختلف را مشاهده کرد. برای مثال با توجه به شکل ۹، ملاحظه می‌شود که در مخزنی با نسبت ارتفاع به شعاع مخزن ۱/۵ تحت زلزله السنترو، در حالتی که در آن تیغه میراگر با شعاع نسبی ۰/٦ قرار داده می‌شود، تأثیر تیغه به صورت کاهش ارتفاع تلاطم و کاهش دامنه طیف فوریه مودهای اول، دوم و سوم می‌شود. ولی برای همین مخزن و در حالتی که در آن تیغه میراگر با شعاع نسبی ۰/۳ قرار داده می‌شود، مود سوم تلاطمی تحریک شده و دامنه طیف فوریه آن افزایش می‌یابد که تأثیر آن روی ارتفاع تلاطم به صورت افزایش آن است.

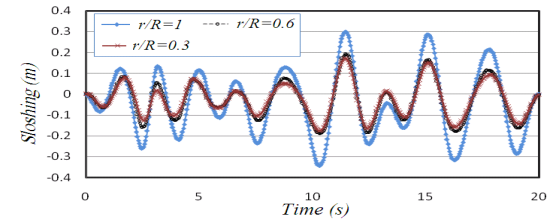
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات ارتفاع سطح آب در یک نقطه از این سطح را در طول تحریک نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌های مزبور پیدا است، به‌صورت کلی می‌توان گفت که با کم‌شدن شعاع بازشوی داخل تیغه میراگر ارتفاع تلاطم سطح آزاد کاهش یافته است. البته این تأثیر به محتوای فرکانسی بار اعمال‌شده کاملاً وابسته است. فرکانس مود طبیعی هر مخزن ذخیره سیال بر اساس مشخصات هندسی مخزن متفاوت است. با قراردادن تیغه میراگر در داخل مخزن، فرکانس مود طبیعی مخزن تغییر می‌کند و درنتیجه، با توجه به محتوای فرکانسی بار اعمال‌شده، ممکن است که تأثیر تیغه بر روی تلاطم به‌صورت افزایش و یا کاهش ارتفاع تلاطمی باشد.



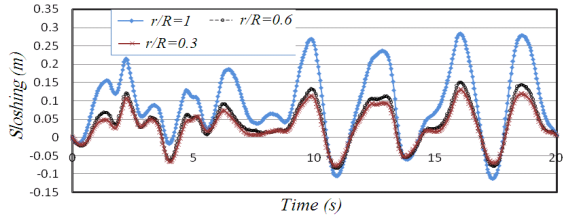
شکل (۸) طیف دامنه فوریه فشار هیدرودینامیکی برای تیغه‌های مختلف در ارتفاع نسبی ۰/۹ و نسبت ارتفاع به شعاع مخزن ۱/۵ (زلزله ارزینکان)



شکل (۹) طیف دامنه فوریه فشار هیدرودینامیکی برای تیغه‌های مختلف در ارتفاع نسبی ۰/۹ و نسبت ارتفاع به شعاع مخزن ۱/۵ (زلزله السنترو)

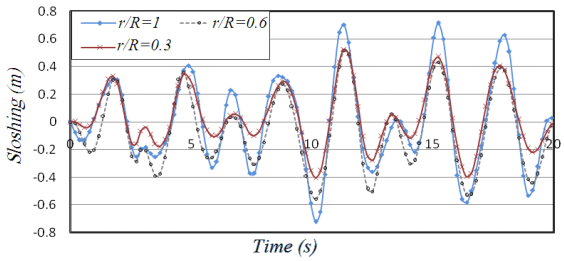


الف) زلزله ارزینکان

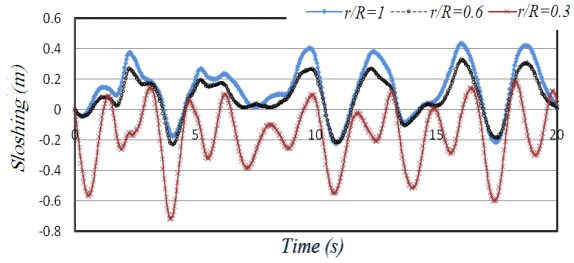


ب) زلزله السنترو

شکل (۱۰) تاریخچه زمانی تلاطم سطح آزاد در حالت‌های مختلف جانمایی تیغه در ارتفاع نسبی ۰/۹ و نسبت ارتفاع به شعاع مخزن ۰/۷۵



الف) زلزله ارزینکان



ب) زلزله السنترو

شکل (۱۱) تاریخچه زمانی تلاطم سطح آزاد در حالت‌های مختلف جانمایی تیغه در ارتفاع نسبی ۰/۹ و نسبت ارتفاع به شعاع مخزن ۱/۵

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به کاهش لنگر واژگونی در مقابل افزایش ناچیز برش پایه و با درنظر گرفتن این که تأثیر تیغه میراگر بر تلاطم سطح آزاد، تأثیر قابل توجهی است، می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از تیغه میراگر اغلب منجر به کاهش فشار تلاطمی ناشی از جرم انتقالی و افزایش فشار ناشی از جرم ضربه‌ای می‌شود و این امر در نهایت باعث افزایش برش پایه و کاهش لنگر واژگونی می‌شود. با نزدیک‌شدن تیغه میراگر به سطح آزاد شاهد افزایش تأثیر تیغه هستیم. هرچه نسبت ارتفاع به شعاع داخلی تیغه میراگر کمتر باشد، تیغه تأثیر محسوس‌تری دارد. نمی‌توان ادعا کرد که کاهش لنگر واژگونی صرفاً به دلیل کاهش فشار هیدرودینامیک در ارتفاع بالاتر در جداره است. در واقع مقداری از کاهش لنگر واژگونی می‌تواند به علت لنگر معکوسی باشد که به تیغه میراگر اعمال می‌شود. تأثیر تغییرات فشار هیدرودینامیک در جداره مخزن، تیغه میراگر و کف مخزن بر میزان کاهش لنگر واژگونی در آینده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. یادآوری می‌شود که نتایج به‌دست آمده در قلمرو زمان در این پژوهش، صرفاً بر اثر اعمال دو شتاب‌نگاشت یادشده بر مخزن ذخیره سیال استوانه‌ای زمینی صلب دارای تیغه میراگر صفحه‌ای‌شکل است و ممکن است بر اثر اعمال شتاب‌نگاشت‌های دیگر (با ماهیت تصادفی متفاوت) نتایج تأثیر تیغه نیز تغییر کند. با توجه به مطالعات قبلی (مثلاً [۱۷])، موارد متعددی از آسیب مخازن بزرگ سیال، با پریودهای طبیعی نسبتاً بالا، ناشی از امواج زلزله با دامنه زیاد و محتوای فرکانسی پایین گزارش شده است. لذا بررسی و یا پیش‌بینی میزان تاثیر تیغه‌های میراگر معرفی‌شده در مقاله حاضر بر رفتار مخازن با شرایط فوق می‌تواند در پژوهش‌های آتی دنبال شود.

۹- مراجع

[1] Mikishev, G. and Dorozhkin, N., (1961), “An experimental investigation of free oscillation of a liquid in containers,” Mekhanika I mashinostroenie, 4, pp 48–83.

[2] Biswal, K., Bhattacharyya, S. and Sinha, P., (2003), "Free-vibration analysis of liquid-filled tank with baffles," Journal of Sound and Vibration, 259, pp 177–192.

[3] Miles, J.W., (1958), "Ring damping of free surface oscillations in cylindrical tank," Journal of Applied Mechanics, 25, pp 274–276.

[4] Silveria, M.A., Stephens, D.G. and Leonard, H.W., (1961), "An experimental investigation of damping of liquid oscillations in cylindrical tanks with various baffles," NASA Report TN–715.

[5] Welt, F. and Modi, V.J., (1992), "Vibration damping through liquid sloshing, Part I: a nonlinear analysis," Journal of Vibration and Acoustics, 114, pp 10–16.

[6] Maleki, A. and Ziyaifar, M., (2008), "Sloshing damping in cylindrical liquid storage tank with baffles," Journal of Sound and Vibration, 311, pp 372–385.

[7] Gedikli, A. and Erguven, M.E., (1999), "Seismic analysis of liquid storage tank with baffle," Journal of Sound and Vibration, 223, pp 141–155.

[8] Cho, J.R., Lee, H.W. and Kim, K.W., (2002). "Free vibration analysis of baffled liquid-storage tanks by structural al-acoustic finite element formulation," Journal of Sound and Vibration, 258, pp 847–866.

[9] Cho, J.R. and Lee, H.W., (2004). "Numerical study on liquid sloshing in baffled tank by nonlinear finite element method," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 193, pp 2581–2598.

[10] Cho, J.R., Lee, H.W. and Ha, S.Y., (2005), "Finite element analysis of resonant sloshing response in 2-D baffled tank," Journal of Sound and Vibration, 288, pp 829–845.

[11] Firouz-Abadi, R.D., Haddadpour, H., Noorian, M.A. and Ghasemi, M., (2008), "A 3D BEM model for liquid sloshing in baffled tanks," International Journal for Numerical methods in Engineering, 76, pp 1419–1433.

[۱۲] عرب، م.ح.، (۱۳۸۹)." آنالیز لرزه‌ای مخازن ذخیره سیال دارای تیغه‌های میراگر با درنظرگرفتن اندرکنش سازه و سیال". *پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس*.

[13] Francois, A. and Jose, A., (2007), "Modelling of mechanical systems fluid-structure Interaction," Butterworth-Heinemann, Elsevier.

[14] Brebbia, C. and Dominguez, J., (1992), "Boundary Elements: An Introductory Course," WIT Press, Computational Mechanics Publications.

[15] Veletsos, A., & Tang, Y. (1987). "Rocking response of liquid storage tanks," ASCE Journal of Engineering Mechanics 113, 1774–1792.

[۱۶] رحیم زاده رفوئی، ف.، باقری کلجاهی، س.، (۱۳۸۲). بررسی رفتار دینامیکی مخازن روزمینی انعطاف‌پذیر. *چهارمین کنفرانس بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله*.

[17] Shekari, M.R., Khaji, N., Ahmadi, M.T., (2010). "On the seismic behavior of cylindrical base-isolated liquid storage tanks excited by long-period ground motions," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, pp 968–980.

Seismic Analysis of Baffled Liquid Storage Tanks Using Boundary Element Method

M.H. Arab[1], N. Khaji[2,*]

1- M.Sc. in Hydraulic Structures, Tarbiat Modares University
2- Associate Professor, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

nkhaji@modares.ac.ir

Abstract:

Nowadays, fluid storage tanks play critical role as lifeline facilities which are as important as fluids' supplement in urban life. The dynamic behavior of these vital structures is different from common structures. In order to protect these structures against destructive effects of seismic loading, various active and passive devices may be employed. Baffles as passive control devices can reduce the effects of sloshing, which in turn reduces the structural response to seismic excitations. In this study, the effect of baffles on the seismic response of cylindrical vertical liquid storage tanks is investigated. The considered baffle is an annular plate with constant level from the base and constant inner diameter. The baffle is fixed on the wall of the tank. Fluid motion is assumed to be irrotational, incompressible and inviscid. Therefore, considering Laplace's equation as the governing equation of the fluid domain, and using boundary element method, a rigid tank is analyzed. In this study, both frequency and time domains are taken into account. In the frequency domain, the baffle effects on natural frequency are studied, while in the time domain, the baffle effects on the base shear and overturning moment are investigated. In order to develop an efficient numerical tool based on boundary element method, the well-known substructuring approach is implemented in this research. For this purpose, the fluid domain is divided into two upper and lower potions partitioned by the baffle. As a result, the compatibility boundary conditions should be satisfied at top and bottom sides of baffle which interact with the fluid domain. Furthermore, continuity boundary condition is fulfilled at the common boundary of two portions of the fluid domain. Linearized free surface condition is taken into consideration. By discretizing the fluid boundaries to quadrilateral elements, the boundary integral equation is formulated into a general matrix form. This general matrix form is then reduced to a more efficient form, which reduces the size of the computational matrices considerably. The result obtained using the present method is verified in comparison with the results available in the literature, with very good agreement. Finally, some example tanks are used to study the baffle's effect on the responses of the example tanks excited by El Centro and Erzincan earthquakes. Based on the results obtained by of mentioned analyses, it is observed that when the baffle is installed, the natural frequency of liquid domain reduces. Moreover, by installing the baffle, the base shear slightly increases whereas overturning moment remarkably reduces. These promising results encourage the authors to follow the present research for the case of flexible baffles, in which the fluid-structure interaction may play a crucial role.

Keywords: liquid storage tank, annular baffle, boundary element method, sloshing, seismic analysis.