نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال دوم / شماره ششم / پاییز ۱۳۹۴

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
2nd Year / No. 6 / November 2015

# تحلیل لرزه‌ای مخازن متقارن محوری مجهز به تیغه‌های میراگر محیطی چندگانه با استفاده از روش المان مرزی

محمدرضا شکاری مهرآبادی *[۱]

## چکیده

مخازن ذخیره سیال به‌عنوان سازه‌های ویژه باید پس از زمین‌لرزه نیز قابل استفاده باشند، زیرا جهت تأمین نیازهای اولیه ازجمله آب‌رسانی در زمان آتش‌نشانی و آب مصرفی شهرها مورداستفاده قرار می‌گیرند؛ بنابراین شناخت مهندسی صحیح از رفتار لرزه‌ای این نوع سازه‌ها از جهت تأمین ایمنی آن‌ها و هم برای کاهش هزینه‌های نگهداری ضروری است. در این تحقیق، تأثیر تیغه‌های میراگر پیرامون مخزن که دارای ابعاد و موقعیت‌های قرارگیری مختلف نسبت به کف مخزن هستند، بررسی می‌شود. در مدل توسعه داده شده با گسسته‌سازی سیال درون مخزن توسط المان‌های مرزی با کاربرد معادله لاپلاس، آنالیز مخزن صلب در قلمرو فرکانس و زمان انجام شده است. در ادامه تأثیر تیغه‌های میراگر بر فرکانس‌های طبیعی تلاطم، ارتفاع امواج تلاطمی، برش پایه و لنگر واژگونی تحت تحریکات هماهنگ و زلزله‌های السنترو و کوبه بررسی شده است.

## واژه‌های کلیدی

مخازن نگهداری مایعات، تیغه‌های میراگر محیطی، المان مرزی، تحلیل فرکانسی و زمانی، امواج تلاطمی.

۱*. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج، m.shekari@yu.ac.ir.

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۸/۱۰

**مقدمه**

مخازن نگهداری مایعات از سازه‌های خاص عمرانی با درجه اهمیت بالا هستند و با توجه به کاربرد این سازه‌ها در شبکه‌های انتقال و توزیع آب، نیروگاه‌های هسته‌ای و مجتمع‌های صنعتی خصوصاً پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی، بررسی رفتار آن‌ها در هنگام وقوع زلزله، مباحث اقتصادی آن‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. به دلیل نبودن ضوابط و معیارهای جامع طراحی، بسیاری از مخازن ذخیره سیال تحت تأثیر زلزله‌های اخیر مانند لوزان فیلیپین، هوکایدوی ژاپن، ارزینکان ترکیه و کوبه ژاپن دچار آسیب‌های جدی شده‌اند که این امر موجب شده است محققان زیادی به مطالعه و بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیلی در این زمینه بپردازند.

بررسی آسیب‌دیدگی مخازن نشان می‌دهد که امواج تلاطمی سطح آب عامل بسیار مهمی در پاسخ مخزن به تحریکات زمین است به‌طوری‌که علاوه بر تأثیر قابل‌توجه بر روی برش پایه و لنگر واژگونی، در تعیین ارتفاع آزاد و آسیب‌های ناشی از آن به‌ویژه خرابی سقف مخازن سرپوشیده و به دنبال آن، آسیب‌های وارد بر دیواره مخزن نیز مؤثر است. ازاین‌رو، استفاده از روش‌های مفید و مقرون‌به‌صرفه برای کاهش تأثیر امواج ثقلی می‌تواند باعث بهبود عملکرد سیستم سیال و مخزن و کاهش هزینه ساخت شود (بیسوال[1] و همکاران، ۲۰۰۳). ازجمله پارامترهایی که در مخازن نگهداری مایعات باعث کاهش دامنه تلاطم و اتلاف آن می‌شود، تنش لزجت است که البته تأثیر آن بسیار ناچیز است (مکیشو و دروزکین[2]، ۱۹۶۱). ازجمله روش‌های عملی و کارآمد برای کاهش دامنه تلاطم امواج سطحی و نیروهای هیدرودینامیکی در مخازن و افزایش همزمان سختی آن، نصب تیغه‌های میراگر به عنوان یک سیستم کنترل غیر فعال جهت اتلاف انرژی، با شکل ها و موقعیت‌های مختلف درون مخزن است.

پیشینه مطالعه و بررسی تأثیر تیغه‌های میراگر به پژوهش های سازمان فضایی ملی آمریکا در اواخر دهه شصت میلادی بر می‌گردد که بر اساس آن استفاده از تیغه‌های جداکننده عمودی در مخزن حاوی مایع توصیه شده است (گزارش فنی ناسا[3]، ۱۹۶۹). اوانز و مک آور[4] در سال ۱۹۸۷ با استفاده از تئوری خطی امواج سطحی به مطالعه تأثیر تیغه‌های میراگر عمودی بر فرکانس‌های طبیعی امواج سطحی در مخزن مکعبی نگهداری آب پرداختند. تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی مختلفی در زمینه تیغه‌های میراگر در مخازن انجام شده است که در این میان می توان به مطالعات کیم و لی[5] (۲۰۰۵)، ولت و مودی[6] (۱۹۹۲) و هانگ و پن[7] (۱۹۹۵) اشاره کرد.

پیشرفت‌های اخیر در زمینه روش‌های عددی و کاربرد آن در مسائل مختلف مهندسی باعث کاربرد این روش ها در زمینه مدل سازی رفتار مخزن شده است، به‌طوری‌که در این میان می‌توان به روش‌های المان محدود و المان مرزی به عنوان پرکاربردترین روش‌ها در مدل‌سازی مخازن اشاره نمود. در سال ۲۰۰۳ بیسوال و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از روش المان محدود، تأثیر تیغه میراگر را بر فرکانس‌های طبیعی امواج سطحی در مخزن استوانه‌ای در حالات مختلف صلبیت و انعطاف پذیری دیواره مخزن بررسی نمودند. چو[8] و همکاران (۲۰۰۵) با مدل‌سازی المان محدود مخزن مجهز به تیغه میراگر، به بررسی پاسخ‌های تشدید امواج متلاطم سطحی در حوزه فرکانس و مطالعه پارامتریک بر روی موقعیت، مقدار بازشدگی و تعداد تیغه‌های میراگر پرداختند.

گدیکلی و ارگوون[9] در سال ۱۹۹۹ با استفاده از روش المان مرزی به بررسی رفتار مخزن صلب استوانه‌ای تحت بار لرزه‌ای هارمونیک و همچنین تحت زلزله واقعی پرداختند و تأثیر تیغه میراگر بر برش پایه، لنگر واژگونی و فرکانس مود طبیعی سیال را ارزیابی کردند. گاورلیوک[10] و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از روش تابع گرین، فرکانس‌ها و مودهای طبیعی امواج متلاطم سطحی را در مخزن استوانه‌ای صلب مجهز به تیغه میراگر

[1] Biswal
[2] Mikishev & Dorozhkin
[3] NASA Technical Report
[4] Evans & McIver
[5] Kim & Lee
[6] Welt & Modi
[7] Hung & Pan
[8] Cho
[9] Gedikli & Erguven
[10] Gavrilyuk

حلقوی بدست آوردند. فیروزآبادی[1] و همکاران (۲۰۰۸) با توسعه یک مدل المان مرزی سه‌بعدی برای مدل کردن مخازن با هندسه‌های مختلف و حالت‌های مختلف تیغه، تأثیر تیغه بر روی فرکانس مود طبیعی سیال را مورد ارزیابی قرار دادند. سیگولسکی[2] (۲۰۱۱) با استفاده از روش المان مرزی سه بعدی، مودها و فرکانس‌های طبیعی سیال درون مخزن مجهز به تیغه‌های میراگر را با فرض محدود بودن دامنه امواج متلاطم سطحی، ارزیابی نمود.

مروری بر نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که با استفاده از تیغه‌های میراگر در مخازن می‌توان آسیب‌های لرزه‌ای را تا حد زیادی کنترل نمود. در همین راستا در این تحقیق، تأثیر تیغه-های میراگر محیطی نصب شده در راستای ارتفاع (چندگانه) مخازن صلب استوانه‌ای زمینی بر مودها و فرکانس‌های طبیعی سیال، تحت تحریک هارمونیک و زلزله واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی سیال درون مخزن از روش المان مرزی استفاده می‌شود زیرا با توجه به گسسته‌سازی مرزها و تعداد المان کمتر از دقت و سرعت بالاتری نسبت به سایر روش-های عددی برخوردار است. آنچه در این تحقیق ارائه می‌شود شامل فرمول‌بندی روش المان‌های مرزی برای مخازن استوانه‌ای صلب و شرح مطالعات عددی در حوزه‌های فرکانس و زمان که شامل صحت سنجی فرمولاسیون مزبور برای این نوع مخازن (که در تحقیقات پیشین تحلیل شده‌اند)، است.

## مواد و روش‌ها

برای بیان حرکت سیال از معادلات ناویر استوکس، با در نظر گرفتن عدم نفوذ سیال به درون جداره‌ها و برقراری شرایط سینماتیکی و دینامیکی در سطح آزاد آن، استفاده می‌شود. با استفاده از این معادلات و کاربرد تابع پتانسیل سرعت و با در نظر گرفتن سیال غیر قابل تراکم با جریان غیر چرخشی و بدون اصطکاک، معادله لاپلاس برای رفتار سیال درون مخزن محدود به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\nabla^2\phi = 0 \qquad (۱)$$

از آنجایی‌که در مخازن محدود امواج متلاطم سطحی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ مخزن دارند، با در نظر گرفتن اثرات تلاطمی، فرض کوتاه بودن دامنه امواج، کم بودن تأثیر کشش سطحی نسبت به اثرات ثقل، شرط مرزی سطح آزاد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial\phi}{\partial\mathbf{n}} = \frac{-1}{g}\ddot{\phi} \qquad (۲)$$

در دیواره‌ها نیز (محل تماس سیال با مرزهای شتابدار جامد) شرط مرزی به صورت زیر می باشد:

$$-\frac{\partial\phi}{\partial\mathbf{n}} = v_n(t) \qquad (۳)$$

در روابط بالا، $\phi$= پتانسیل سرعت، $\mathbf{n}$= بردار عمود بر سطح و به سمت خارج از میدان سیال و $v$= سرعت سیال در محل جداره‌ها است. پس از محاسبه مقدار پتانسیل سرعت میدان سیال، می توان فشار دینامیکی را در نقاط مورد نظر از رابطه زیر به دست آورد (شکاری[3] و همکاران، ۲۰۱۰).

$$P = -\rho\frac{\partial\phi}{\partial t} \qquad (۴)$$

## توسعه مدل المان مرزی برای مخازن متقارن محوری

به منظور حل معادله لاپلاس جهت تعیین مقادیر مختلف تابع پتانسیل سرعت، می‌توان از روش المان مرزی به صورت زیر استفاده نمود (بربیا و دومنگووز[4]، ۱۹۹۲):

$$H\varphi = Gq \qquad (۵)$$

که در آن $H$ و $G$= ماتریس های ضرایب فرمولاسیون روش المان مرزی که به هندسه مخزن بستگی دارند و $\phi$ و $q$= بردارهای پتانسیل سرعت و مشتق آن نسبت به بردار نرمال (به ترتیب). برای گسسته سازی مرزها توسط المان‌های مرزی، در محل تیغه میراگر به علت ضخامت کم آن، المان ها به هم نزدیک می شوند و در به‌دست آوردن تأثیر یک گره بر گره‌های دیگر و انتگرال گیری از حل اساسی خطاهای تکینه‌گی به وجود می آید. برای

[1] Firouz-Abadi
[2] Sygulski
[3] Shekari
[4] Brebbia & Dominguez

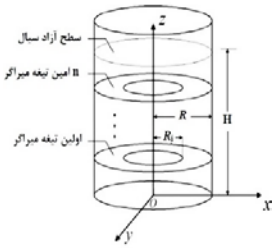
رفع مشکل اخیر، مخزن به نواحی مجزایی تقسیم می‌شود به‌گونه‌ای‌که فرض می‌شود در آن هیچ تیغه‌ای وجود ندارد و اثر تیغه‌ها تنها بر روی مرزها اعمال گردیده و المان بندی برای هر ناحیه به صورت مجزا انجام می‌شود، به‌طوری‌که نهایتاً معادلات نهایی برای کل قلمرو از طریق ترکیب معادلات زیر ناحیه ها بر اساس سازگاری شارها و پتانسیل های بین مرز مشترک، تعیین می‌شود. شکل (۱-الف) یک مخزن استوانه‌ای سه بعدی مجهز به تیغه‌های میراگر چندگانه را نشان می‌دهد که در آن، $R_i$ و $R$ به ترتیب شعاع داخلی و خارجی تیغه‌ها و $H$ ارتفاع آزاد سیال درون مخزن هستند. با توجه به شکل (۱-ب) اگر مخزن به تعدادی ناحیه بالا و پایین تیغه‌های میراگر تقسیم شود، برای هر زیر ناحیه با یک مرز مشترک در محل بازشوی تیغه میراگر (بعنوان مثال ناحیه (۱)) معادله (۵) به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$\overset{1}{\mathrm{H}}\begin{bmatrix}\varphi_{tw}\\ \varphi_{int}\end{bmatrix}=\overset{1}{\mathrm{G}}\begin{bmatrix}q_{tw}\\ q_{int}\end{bmatrix} \qquad (۶)$$

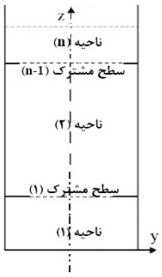
به‌طوری‌که،

$$\begin{aligned}&\overset{1}{\mathrm{H}}_{11}\,\varphi_w+\overset{1}{\mathrm{H}}_{12}\,\varphi_{int}-\overset{1}{\mathrm{G}}_{12}\,q_{int}=0\\ &\overset{1}{\mathrm{H}}_{21}\,\varphi_w+\overset{1}{\mathrm{H}}_{22}\,\varphi_{int}-\overset{1}{\mathrm{G}}_{22}\,q_{int}=0\end{aligned} \qquad (۷)$$

که در آن، اندیس های tw= مرز جداره صلب و int= مرز سطح مشترک دو ناحیه در محل بازشوی تیغه میراگر.




الف) مدل مخزن و پارامترهای آن




ب) زیر ناحیه های قلمرو سیال جهت حل معادله المان مرزی

**شکل (۱): مخزن استوانه‌ای مجهز به تیغه‌های میراگر محیطی**

پس از ساده سازی رابطه (۷)، رابطه (۸) قابل بازنویسی است:

$$\mathbf{q}_{int}=\overset{1}{\mathbf{K}}\boldsymbol{\varphi} \qquad (۸)$$
$$\overset{1}{\mathbf{K}}=(\overset{1}{\mathbf{G}}_{22}-\overset{1}{\mathbf{H}}_{21}(\overset{1}{\mathbf{H}}_{11})^{-1}\overset{1}{\mathbf{G}}_{12})^{-1}(\overset{1}{\mathbf{H}}_{22}-\overset{1}{\mathbf{H}}_{21}(\overset{1}{\mathbf{H}}_{11})^{-1}\overset{1}{\mathbf{H}}_{12})$$

که در آن، $K$= ماتریس تأثیر سطح مشترک (۱). بر اساس رابطه فوق می توان پتانسیل سرعت المان‌های سطح مشترک (۱) را محاسبه نمود، بطوری‌که در صورت نبود تیغه‌های میراگر، فرکانس و شکل مودهای امواج متلاطم سطحی نتایج حاصل از آن خواهند بود. برای سایر نواحی با بیش از یک مرز مشترک در محل بازشوی تیغه میراگر (بعنوان مثال ناحیه (۲)) معادله (۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\mathbf{H}^{1}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\varphi}_{tw}\\ \boldsymbol{\varphi}_{int(n-1)}\\ \boldsymbol{\varphi}_{int(n)}\end{bmatrix}=\mathbf{G}^{1}\begin{bmatrix}\mathbf{q}_{tw}\\ \mathbf{q}_{int(n-1)}\\ \mathbf{q}_{int(n)}\end{bmatrix} \qquad (۹)$$

پس از ساده سازی رابطه (۹)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}&q_{int(n)}=\overset{n}{\mathrm{K}}\,\varphi_n\\ &\overset{n}{\mathrm{K}}=-(\overset{n-1}{\mathrm{M}}\,\overset{n}{\mathrm{d}}+\overset{n}{\mathrm{h}})^{-1}(\overset{n-1}{\mathrm{M}}\,\overset{n}{\mathrm{b}}+\overset{n}{\mathrm{f}})\end{aligned} \qquad (۱۰)$$

که در آن،

$$\begin{aligned}
&\overset{n}{\mathbf{M}}=-(\overset{n}{\mathbf{e}}+\overset{n}{\mathbf{g}}\overset{n}{\mathbf{K}})^{-1}(\overset{n}{\mathbf{a}}+\overset{n}{\mathbf{c}}\overset{n}{\mathbf{K}})^{-1}\\
&\overset{n}{\mathbf{a}}=(\overset{n}{\mathbf{H}}_{11}-\overset{n}{\mathbf{H}}_{12}(\overset{n}{\mathbf{H}}_{22})^{-1}\overset{n}{\mathbf{H}}_{21})\\
&\overset{n}{\mathbf{b}}=(\overset{n}{\mathbf{H}}_{13}-\overset{n}{\mathbf{H}}_{12}(\overset{n}{\mathbf{H}}_{22})^{-1}\overset{n}{\mathbf{H}}_{23})\\
&\overset{n}{\mathbf{c}}=(\overset{n}{\mathbf{G}}_{11}-\overset{n}{\mathbf{H}}_{12}(\overset{n}{\mathbf{H}}_{22})^{-1}\overset{n}{\mathbf{G}}_{21})\\
&\overset{n}{\mathbf{d}}=(\overset{n}{\mathbf{H}}_{12}(\overset{n}{\mathbf{H}}_{22})^{-1}\overset{n}{\mathbf{G}}_{23}-\overset{n}{\mathbf{G}}_{13})\\
&\overset{n}{\mathbf{e}}=(\overset{n}{\mathbf{H}}_{31}-\overset{n}{\mathbf{H}}_{32}(\overset{n}{\mathbf{H}}_{22})^{-1}\overset{n}{\mathbf{H}}_{23})\\
&\overset{n}{\mathbf{f}}=(\overset{n}{\mathbf{H}}_{33}-\overset{n}{\mathbf{H}}_{32}(\overset{n}{\mathbf{H}}_{22})^{-1}\overset{n}{\mathbf{H}}_{21})\\
&\overset{n}{\mathbf{g}}=(\overset{n}{\mathbf{G}}_{31}-\overset{n}{\mathbf{H}}_{32}(\overset{n}{\mathbf{H}}_{22})^{-1}\overset{n}{\mathbf{G}}_{21})\\
&\overset{n}{\mathbf{h}}=(\overset{n}{\mathbf{H}}_{31}(\overset{n}{\mathbf{H}}_{22})^{-1}\overset{n}{\mathbf{G}}_{23}-\overset{n}{\mathbf{G}}_{33})
\end{aligned} \qquad (۱۱)$$

پس از ساده سازی و انجام عملیات ریاضی، رابطه ای مشابه رابطه (۱۰) برای تابع پتانسیل سرعت سطح آب بصورت زیر بدست می آید:

$$\ddot{\boldsymbol{\varphi}}_{int(n)}+g\overset{n}{\mathbf{K}}\boldsymbol{\varphi}_{int(n)}=0 \qquad (۱۲)$$

در نهایت با حل این معادله مودهای تغییر شکل امواج متلاطم و فرکانس‌های متناظر آن‌ها به‌دست می آیند. جهت تحلیل قلمرو

زمان، تاریخچه زمانی شتاب های اعمالی به مخزن با استفاده از سنتز فوریه به قلمرو فرکانس انتقال داده می‌شود و پس از انجام تحلیل‌ها در قلمرو فرکانس، نتایج با استفاده از تبدیل فوریه معکوس به قلمرو زمان برگردانده می‌شود.

## نتایج

در مطالعه حاضر، برای بررسی رفتار سیال داخل مخزن دارای تیغه‌های میراگر از روش المان مرزی استفاده شده و بر اساس فرمول‌بندی شرح داده شده در بخش قبلی، یک برنامه رایانه‌ای تهیه شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق به بررسی مخازن استوانه‌ای و مستطیلی پرداخته شده است و از ذکر تحلیل مخازن بیضوی و کروی اجتناب شده است. به منظور کنترل صحت نتایج خروجی برنامه تهیه شده، مقایسه‌های متعددی بین نتایج حاضر در حالات مختلف مخزن ساده و با تیغه‌های میراگر و نتایج بدست آمده توسط سایر محققین انجام شده است که در ادامه به ارزیابی آن‌ها پرداخته می‌شود.

### *صحت‌سنجی با مخزن استوانه‌ای ساده*

فرکانس امواج متلاطم سطحی در مودهای مختلف، وابسته به هندسه مخزن است به‌طوری‌که با تغییر نسبت ارتفاع به شعاع مخزن، تأثیر تلاطم سطح آزاد سیال در پاسخ لرزه‌ای سیال تغییر می‌کند. در این قسمت جهت کنترل صحت برنامه تهیه شده، فرکانس مود $j$ام طبیعی تلاطم سیال در مخازن با نسبت ارتفاع به شعاع مختلف با نتایج رابطه تحلیلی ولتسوس[1] (۱۹۸۷) به شرح زیر، مقایسه شده است:

$$\omega_j = \sqrt{\lambda_j (\tanh \mu_j) \frac{g}{R}} \qquad (۱۳)$$

که در آن $\mu_j = \lambda_j H/R$ و $\lambda_j$= مشتق اول از تابع بسل نوع اول به‌طوری‌که، برای مودهای اول تا سوم مقادیر آن به ترتیب ۱/۸۴۱۲، ۵/۳۳۱۴ و ۸/۵۳۶۳ است. در جدول (۱) فرکانس‌های طبیعی امواج سطحی مخازن با نسبت‌های مختلف ارتفاع به شعاع (شعاع مخزن ثابت و برابر ۵ متر) توسط برنامه و نتایج حاصل از رابطه (۱۳) آورده شده است. به‌طوری‌که مقایسه نتایج نشان دهنده انطباقی خوب بین نتایج تحقیق حاضر و حل ولتسوس است.

جدول (۱): فرکانس طبیعی امواج سطحی (rad/sec)

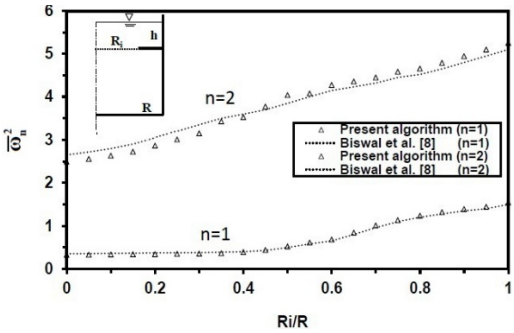
| | j=1 | | j=2 | | j=3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| H/R | مطالعه حاضر | رابطه ولتسوس | مطالعه حاضر | رابطه ولتسوس | مطالعه حاضر | رابطه ولتسوس |
| ۰/۲۵ | ۱/۲۴۷ | ۱/۲۲۲ | ۳/۰۱۷ | ۳/۰۴۷ | ۴/۰۹۲ | ۴/۱۸۲ |
| ۰/۵ | ۱/۶۲۰ | ۱/۵۸۷ | ۳/۲۱۹ | ۳/۲۵۱ | ۴/۰۹۲ | ۴/۱۸۲ |
| ۰/۷۵ | ۱/۷۸۴ | ۱/۷۴۸ | ۳/۲۳۳ | ۳/۲۶۵ | ۴/۰۹۲ | ۴/۰۲۳ |
| ۱ | ۱/۸۵۳ | ۱/۸۹۰ | ۳/۲۳۴ | ۳/۲۹۹ | ۴/۰۹۲ | ۴/۰۲۳ |
| ۱/۲۵ | ۱/۸۸۲ | ۱/۹۱۹ | ۳/۲۳۴ | ۳/۲۹۹ | ۴/۰۹۲ | ۴/۰۲۳ |
| ۱/۵ | ۱/۸۹۳ | ۱/۹۳۱ | ۳/۲۳۴ | ۳/۲۹۹ | ۴/۰۹۲ | ۴/۰۲۳ |
| ۱/۷۵ | ۱/۸۹۸ | ۱/۸۷۹ | ۳/۲۳۴ | ۳/۱۷۰ | ۴/۰۹۲ | ۴/۰۵۲ |
| ۲ | ۱/۸۹۹ | ۱/۸۸۰ | ۳/۲۳۴ | ۳/۱۷۰ | ۴/۰۹۲ | ۴/۰۵۲ |

شعاع مخزن: $R$ ; ارتفاع مخزن: $H$

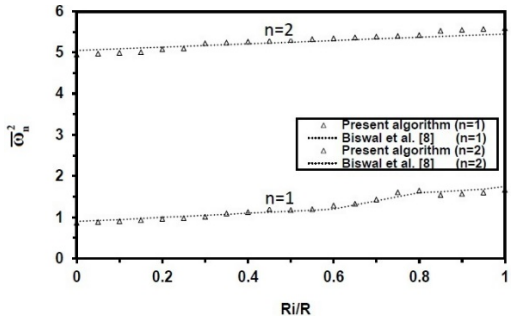
### *صحت‌سنجی با مخزن استوانه‌ای دارای تیغه میراگر*

در این بخش به مقایسه فرکانس مود طبیعی سیال حاصل از الگوریتم حاضر و نتایج بدست آمده توسط بیسوال و همکارانش (۲۰۰۳)، در یک مخزن استوانه ای با حضور تیغه میراگر پرداخته می‌شود. سیال در نظر گرفته شده در تحلیل‌ها، آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. یک تیغه میراگر حلقوی نیز به ضخامت ۴ میلی‌متر، شعاع داخلی و خارجی بترتیب $R_i$ و $R$، در عمق $h$ از سطح آزاد سیال جانمایی شده است. در شکل (۲) تأثیر تیغه میراگر بر فرکانس طبیعی امواج سطحی( $\overline{\omega}_n^2 = \omega_n^2 \mathbf{R}/g$) در مخزن با $H/R$=1 و نسبت های مختلف $h/H$ و $R_i/R$ برای مود اول و دوم نشان داده شده است. در واقع فرکانس طبیعی سیال به‌صورت پارامتر بدون بعد $\omega_n^2 \mathbf{R}/g$ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، بین نتایج بیسوال و همکاران (۲۰۰۳) و نتایج مطالعه حاضر انطباق خوبی در هر دو مود وجود دارد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع داخلی تیغه میراگر، فرکانس امواج سطحی سیال افزایش پیدا می کند.

[1] Veletsos & Tang




$h/H$=0.3

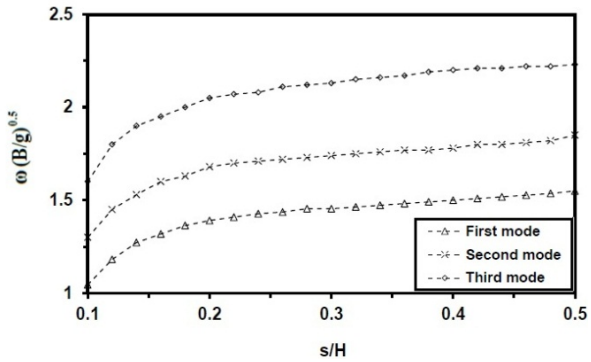



$h/H$=0.1

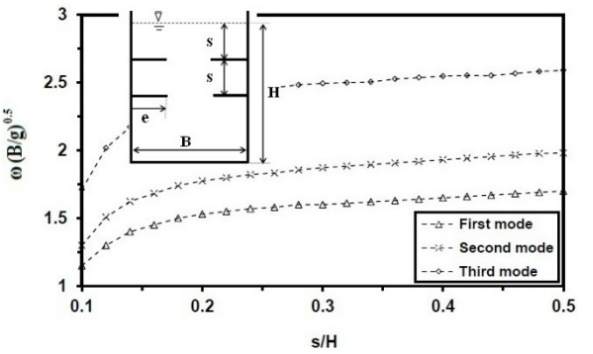
**شکل (۲): تغییرات فرکانس مود طبیعی نسبت به تغییرات شعاع داخلی تیغه**

### *آنالیز حوزه فرکانس*

در این بخش، به بررسی فرکانس مود طبیعی امواج متلاطم سطحی در مخازن متقارن محوری با حضور تیغه میراگر پرداخته می‌شود. شکل (۳) تغییرات فرکانس مودهای اول تا سوم تلاطم امواج سطحی را در مخزن مستطیلی مجهز به تیغه‌های میراگر، در موقعیت‌های مختلف قرارگیری تیغه‌های میراگر (نسبت ارتفاع جانمایی تیغه به ارتفاع مخزن) نمایش می‌دهد، به‌طوری‌که ویژگی هندسی مخزن صلب به‌صورت نسبت ارتفاع به بعد مخزن ($H/B$) معرفی می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است، با نزدیک شدن تیغه‌های میراگر به سطح آزاد آب، فرکانس تلاطم سطحی در تمام مودها کاهش پیدا می‌کند. در توضیح دلیل آن، می‌توان گفت که با نزدیک شدن تیغه‌های میراگر به سطح آزاد آب یک ناحیه آب کم‌عمق نزدیک سطح آزاد سیال ایجاد می‌شود و طبیعی است که در آب کم‌عمق امواج با فرکانس نسبتاً پایین وجود داشته باشند.



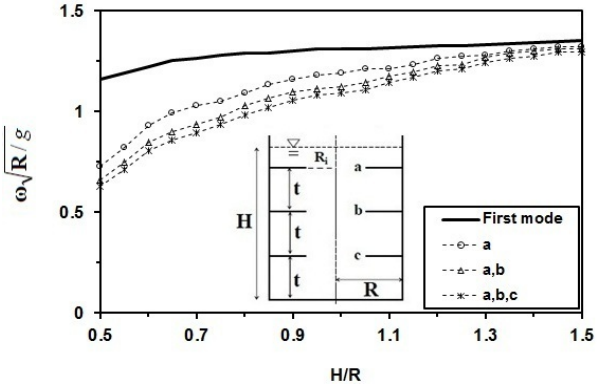

$H/B$=0.3

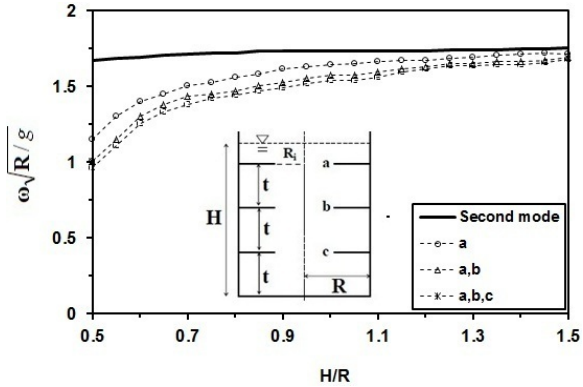



$H/B$=1

**شکل (۳): تغییرات فرکانس مودهای تلاطمی مخزن مستطیلی نسبت به موقعیت قرارگیری تیغه‌های میراگر ($e/B$=0.3)**

ازجمله مسائلی که در بررسی راندمان تأثیر تیغه‌های میراگر بر کاهش فرکانس امواج تلاطمی حائز اهمیت است، تعداد این تیغه‌ها در ارتفاع مخزن است که جهت بررسی آن تعدادی آنالیز در حوزه فرکانس با در نظر گرفتن یک مخزن استوانه‌ای انجام شد.

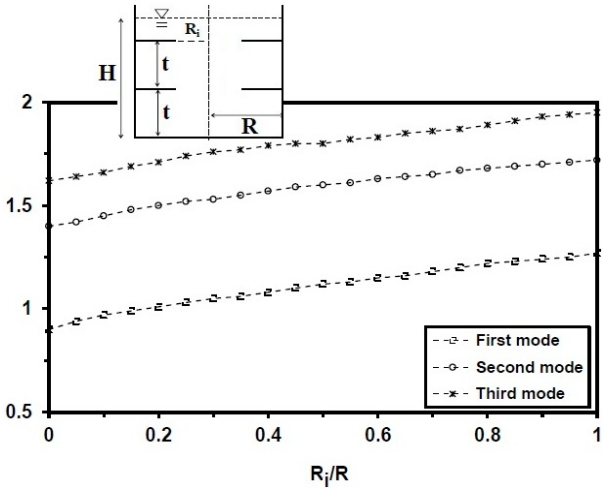





**شکل (۴): تغییرات فرکانس مودهای تلاطمی مخزن استوانه‌ای در حالت‌های مختلف قرارگیری تیغه‌های میراگر ($t/R$=0.15 و $R_i/R$=0.5)**

شکل (۴) تغییرات فرکانس بی‌بعد شده مودهای اول و دوم تلاطم امواج سطحی ($\omega\sqrt{R/g}$) را در یک مخزن استوانه‌ای با ارتفاع متغیر سطح آب و تعداد متغیر تیغه‌های میراگر در ارتفاع مخزن، نشان می‌دهد. بررسی نتایج در شکل نشان می‌دهد که در محدوده تغییرات مشخص‌شده عمق آب، تیغه میراگر نزدیک به سطح آزاد آب نسبت به بقیه تیغه‌ها نقش بسیار مؤثرتری در کاهش فرکانس امواج سطحی دارد. همچنین با دور شده تیغه-های میراگر از سطح آزاد آب راندمان آن‌ها در کاهش فرکانس تلاطم به‌شدت کاهش می‌یابد که این مطلب در مودهای اول و دوم به‌وضوح قابل مشاهده است.

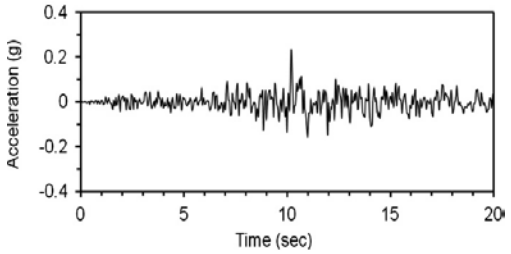
جهت بررسی تأثیر میزان بازشدگی تیغه‌های میراگر بر فرکانس مودهای تلاطم سطحی، یک مخزن استوانه‌ای با نسبت ارتفاع به شعاع برابر یک و با قرارگیری دو تیغه میراگر با نسبت‌های مختلف بازشدگی ($R_i/R$) در ارتفاع مخزن مورد تحلیل حوزه فرکانس قرار گرفت و نتایج آن در شکل (۵) برای مودهای اول تا سوم نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با کاهش شعاع داخلی تیغه میراگر فرکانس امواج سطحی در مودهای مختلف کاهش پیدا می‌کند. همچنین در مقایسه با نتایج شکل (۴) می‌توان دریافت که جانمایی تیغه‌های میراگر پارامتر مهم‌تری نسبت به میزان بازشدگی آن در محیط مخزن است و با گرادیان بیشتری بر میزان فرکانس تلاطم در مودهای مختلف تأثیر می‌گذارد.



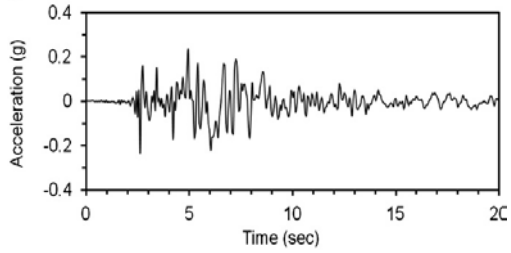

**شکل (۵): تغییرات فرکانس مودهای تلاطمی مخزن استوانه‌ای در حالت‌های مختلف قرارگیری تیغه‌های میراگر ($t/R$=0.4).**

### *آنالیز حوزه زمان*

در این پژوهش برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از روش المان مرزی، شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه ۱۹۴۰ ال سنت رو و ۱۹۹۵ کوبه ژاپن بکار برده شد که رکورد زمین‌لرزه‌ها در شکل (۶) نشان داده‌شده است.




الف) زلزله کوبه

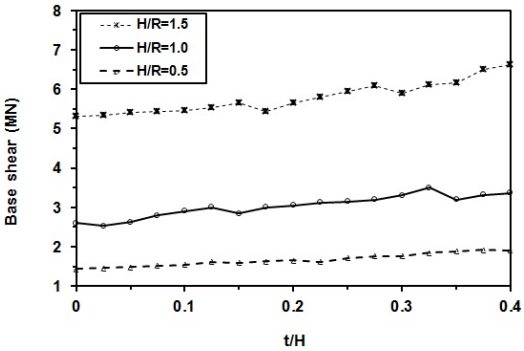



ب) زلزله السنترو

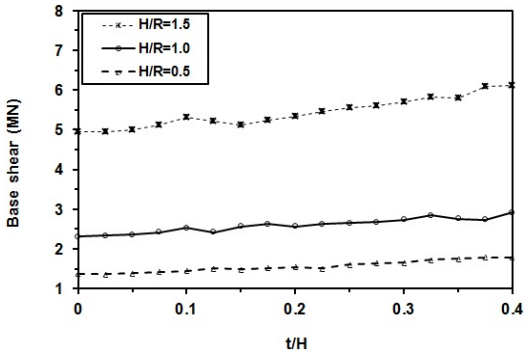
**شکل (۶) : رکورد زلزله‌های مورداستفاده در این تحقیق**

در این بخش، یک مخزن استوانه‌ای با نسبت‌های هندسی ارتفاع به شعاع ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و با قرارگیری دو تیغه میراگر با نسبت‌های مختلف بازشدگی ($R_i/R$) و موقعیت‌های مختلف قرارگیری

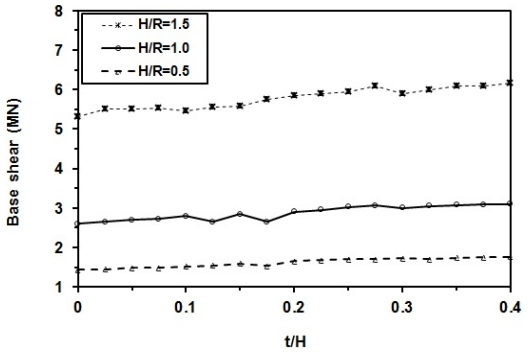
تیغه‌های میراگر در ارتفاع مخزن ($t/H$) مورد تحلیل در حوزه زمان قرار گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری تیغه در محیط مخزن، فشار هیدرودینامیک وارد بر جداره مخزن و به تبع آن برش پایه و لنگر واژگونی مخزن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شعاع در نظر گرفته شده برای مخزن برابر ۷/۳۲ متر و سیال درون مخزن دارای چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. در شکل (۷)، تأثیر تیغه‌های میراگر بر برش پایه برای جانمایی‌ها و مقادیر مختلف شعاع داخلی تیغه‌ها نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با قرارگیری تیغه میراگر، مقدار برش پایه تحت تأثیر شتاب‌نگاشت‌های یادشده و در نسبت‌های هندسی مختلف مخزن افزایش پیدا می‌کند؛ به‌عبارت‌دیگر، هر چه تیغه به سطح آزاد مخزن نزدیک‌تر باشد، افزایش برش پایه بیشتر خواهد بود. علت این پدیده را می‌توان چنین بیان نمود که تیغه‌های میراگر ناحیه زیرین خود را از ناحیه بالایی جدا می‌کند و افزایش فشار ناشی از ناحیه زیرین تیغه‌ها (جرم ضربه‌ای) و کاهش فشار تلاطم امواج سطحی رخ می‌دهد که این امر درمجموع باعث افزایش برش پایه می‌شود. همچنین بررسی نتایج هریک از شتاب‌نگاشت‌ها نشان می‌دهد که برش پایه برای تیغه‌های میراگر با شعاع داخلی کمتر با گرادیان بیشتری افزایش پیدا می‌کند، چون در این حالت جدایی ناحیه بالایی تیغه از ناحیه پایینی مشهودتر است.



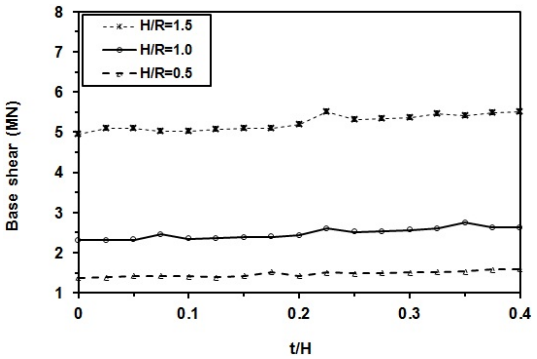

الف) زلزله السنترو ($R_i/R$=0.1)




ب) زلزله کوبه ($R_i/R$=0.1)




پ) زلزله السنترو ($R_i/R$=0.5)

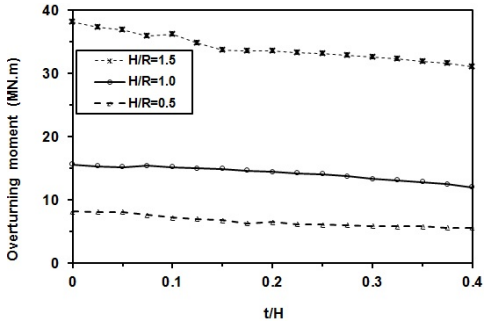



ت) زلزله کوبه ($R_i/R$=0.5)

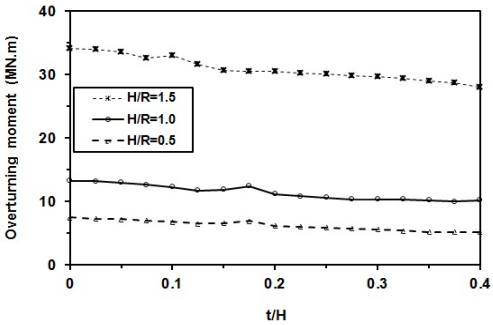
**شکل (۷): تغییرات برش پایه برای مخزن استوانه‌ای با نسبت‌های هندسی مختلف**

شکل (۸) تأثیر تیغه‌های میراگر بر لنگر واژگونی برای جانمایی‌ها و مقادیر مختلف شعاع داخلی تیغه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، با قرارگیری تیغه میراگر لنگر واژگونی تحت تأثیر زلزله‌های مختلف و در نسبت‌های هندسی مختلف مخزن کاهش پیدا می‌کند؛ به‌گونه‌ای که هر چه تیغه دارای نسبت بازشدگی کمتری باشد، کاهش لنگر واژگونی قابل‌ملاحظه‌تر خواهد بود. البته بررسی نمودارهای رسم شده نشان دهنده فراز و فرودهایی در برخی نسبت‌های هندسی مخزن و تیغه‌های میراگر است که می‌توان رخداد آن را ناشی از تأثیر

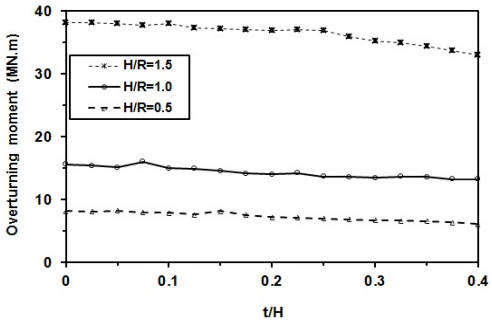
تیغه‌ها بر فرکانس طبیعی تلاطم سیال در مودهای مختلف و همچنین محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت اعمال‌شده دانست.



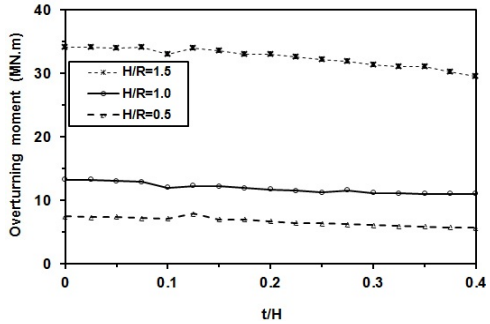

**الف) زلزله السنترو ($R_i/R$=0.1)**




**ب) زلزله کوبه ($R_i/R$=0.1)**




**پ) زلزله السنترو ($R_i/R$=0.5)**




**ت) زلزله کوبه ($R_i/R$=0.5)**

**شکل (۸): تغییرات حداکثر لنگر واژگونی برای مخزن استوانه‌ای با نسبت‌های هندسی مختلف**

جهت مقایسه کمی مقادیر برش پایه و لنگر واژگونی در حالات مختلف جانمایی تیغه‌های میراگر با ابعاد هندسی یادشده، جدول (۲) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تأثیر تیغه‌های میراگر در کاهش لنگر واژگونی برای مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۰/۵ بسیار مؤثرتر از مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۱/۵ است. در بیان علت آن باید گفت که با نصب تیغه میراگر مؤلفه تلاطمی لنگر خمشی کاهش پیدا می‌کند و ازآنجاکه توان امواج تلاطمی در مخازن با شعاع قاعده بیشتر، قوی‌تر است کاهش مذکور نیز چشمگیرتر است. همچنین مقایسه نسبی مقادیر جدول در مورد لنگر واژگونی نشان‌دهنده این مطلب است که در نسبت‌های مختلف هندسی مخزن هر چه بازشدگی تیغه کمتر باشد، کاهش بیشتر لنگر واژگونی اتفاق می‌افتد. به‌عنوان مثال موردی، تیغه‌های میراگر در مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع ۱/۵ تحت تأثیر زلزله السنترو در نسبت بازشدگی ۰/۱ مقدار لنگر واژگونی را ۱۸/۶٪ کاهش می‌دهد درصورتی‌که در شرایط مشابه و در نسبت بازشدگی ۰/۵ مقدار لنگر واژگونی را ۱۳/۵۱٪ کاهش می‌دهد.

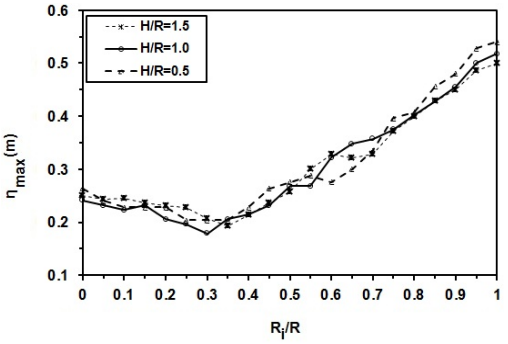
ازجمله مسائلی که در مطالعات رفتار مخازن هنگام زلزله اهمیت فراوانی دارد، بررسی رفتار سطح آزاد سیال در حضور تیغه‌های میراگر است. ازآنجایی‌که امواج متلاطم سطحی می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی به مخازن در هنگام وقوع زلزله شود، لذا ارتفاع امواج متلاطم سطحی سیال (اختلاف ارتفاع نقاط مختلف سطح مواج نسبت به سطح اولیه سیال) عامل مهمی در تعیین ارتفاع آزاد مخزن است. جهت محاسبه ارتفاع امواج سطحی ($\eta$) پس از محاسبه فشار دینامیکی در نقاط مختلف مخزن می‌توان از رابطه (۱۴) استفاده نمود:

$$P = \rho g \eta \qquad (۱۴)$$

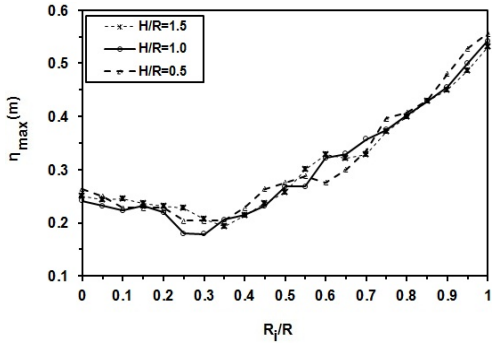
**شکل (۲): مقادیر برش پایه و لنگر واژگونی**

| زلزله | $H/R$ | $R_i/R$ | برش پایه (MN) | | | لنگر واژگونی (MN/m) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | مخزن بدون تیغه | مخزن با تیغه | درصد افزایش | مخزن بدون تیغه | مخزن با تیغه | درصد کاهش |
| السنترو | ۱/۵ | ۰/۱ | ۵/۳۲ | ۶/۶۳ | ۲۴/۶ | ۳۸/۱۱ | ۳۱/۰۲ | ۱۸/۶ |
| | | ۰/۵ | ۵/۳۲ | ۶/۱۶ | ۱۵/۷۸ | ۳۸/۱۱ | ۳۲/۹۶ | ۱۳/۵۱ |
| | ۱ | ۰/۱ | ۲/۵۹ | ۳/۳۶ | ۲۹/۷۲ | ۱۵/۶۱ | ۱۲/۰۱ | ۲۳/۰۶ |
| | | ۰/۵ | ۲/۵۹ | ۳/۱ | ۱۹/۶۹ | ۱۵/۶۱ | ۱۳/۲۳ | ۱۵/۲۴ |
| | ۰/۵ | ۰/۱ | ۱/۴۴ | ۱/۹۱ | ۳۲/۶۳ | ۸/۲۱ | ۵/۶۱ | ۳۱/۶۶ |
| | | ۰/۵ | ۱/۴۴ | ۱/۷۶ | ۲۲/۲۳ | ۸/۲۱ | ۶/۱۱ | ۲۵/۵۸ |
| کوبه | ۱/۵ | ۰/۱ | ۴/۹۵ | ۶/۱۱ | ۲۳/۴۳ | ۳۴/۰۲ | ۲۸/۰۱ | ۱۷/۶۷ |
| | | ۰/۵ | ۴/۹۵ | ۵/۵۱ | ۱۱/۳۱ | ۳۴/۰۲ | ۲۹/۵۶ | ۱۳/۱۱ |
| | ۱ | ۰/۱ | ۲/۳۱ | ۲/۹۲ | ۲۶/۴۱ | ۱۳/۲۱ | ۱۰/۲۱ | ۲۲/۷۱ |
| | | ۰/۵ | ۲/۳۱ | ۲/۶۲ | ۱۳/۴۱ | ۱۳/۲۱ | ۱۱/۰۱ | ۱۶/۶۵ |
| | ۰/۵ | ۰/۱ | ۱/۳۸ | ۱/۷۹ | ۲۹/۷۱ | ۷/۵۱ | ۵/۲۳ | ۳۰/۳۶ |
| | | ۰/۵ | ۱/۳۸ | ۱/۶۱ | ۱۶/۶۷ | ۷/۵۱ | ۵/۶۸ | ۲۴/۳۶ |

در شکل (۹)، تأثیر تیغه‌های میراگر بر حداکثر ارتفاع امواج سطحی برای مقادیر مختلف شعاع داخلی تیغه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، با قرارگیری تیغه-های میراگر مقدار بیشینه ارتفاع امواج سطحی تحت تأثیر زلزله‌های مختلف و در نسبت‌های هندسی مختلف مخزن کاهش پیدا می‌کند. البته بررسی نمودارهای رسم شده نشان می‌دهد که با کاهش نسبت بازشدگی تیغه‌های میراگر تا حدود ۰/۳۵ تا ۰/۳ بیشینه ارتفاع امواج سطحی کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر، در مقادیر کمتر از این محدوده افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در ارتفاع امواج سطحی رخ می‌دهد که علت آن را می‌توان عملکرد تقریباً مستقل ناحیه نزدیک به سطح آزاد سیال به‌صورت یک مخزن با شعاع قاعده نسبتاً زیاد و به تبع آن ایجاد امواج با ارتفاع بیشتر نسبت به مخزن اولیه، دانست.



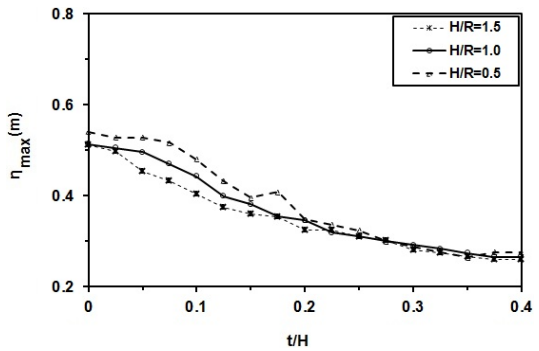

**الف) زلزله السنترو**



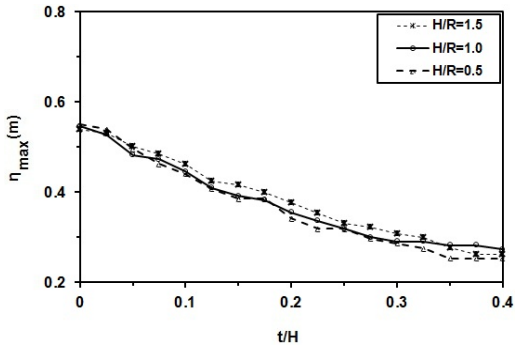

**ب) زلزله کوبه**

**شکل (۹): تغییرات حداکثر ارتفاع امواج سطحی برای مخزن استوانه‌ای با نسبت‌های هندسی مختلف ($t/H$=0.4)**

در شکل (۱۰) تأثیر تیغه‌های میراگر بر حداکثر ارتفاع امواج سطحی برای جانمایی‌های مختلف تیغه‌های میراگر، نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با قرارگیری تیغه میراگر، ارتفاع امواج سطحی شتاب‌نگاشت‌های یادشده، در نسبت‌های هندسی مختلف مخزن کاهش پیدا می‌کند. به‌گونه‌ای که هر چه تیغه به سطح آزاد مخزن نزدیک‌تر باشد مهار امواج متلاطم سطحی قابل‌ملاحظه‌تر خواهد بود.



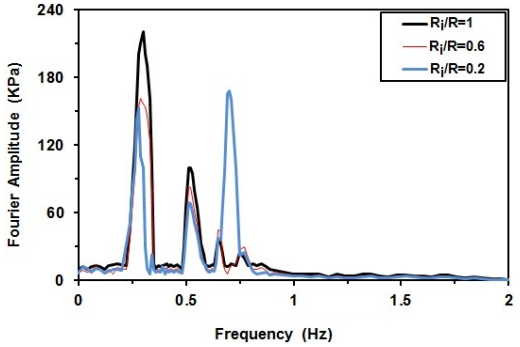

**الف) زلزله السنترو**



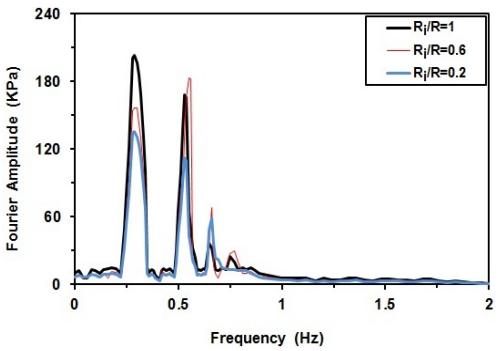

**ب) زلزله کوبه**

**شکل (۱۰): تغییرات حداکثر ارتفاع امواج سطحی برای مخزن استوانه‌ای با نسبت‌های هندسی مختلف ($R_i/R$=0.5)**

به‌منظور بررسی تأثیر تیغه‌های میراگر بر طیف فوریه مودهای مختلف امواج متلاطم سطحی، دامنه فوریه فشار هیدرودینامیکی برای یک نقطه از سطح آزاد سیال (نقطه y=R در شکل (۱)) برای دو زلزله موردمطالعه محاسبه گردید. شکل (۱۱) دامنه طیف موردنظر برای نسبت‌های مختلف بازشدگی تیغه‌های میراگر نمایش داده شده است. نقاط مختلف نمودارها از نتایج تحلیل روش المان مرزی به‌دست‌آمده‌اند و مقادیر بیشینه نشان‌دهنده فرکانس مودهای مختلف است.




**الف) زلزله السنترو**

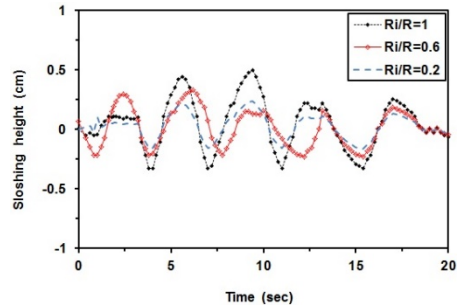



**ب) زلزله کوبه**

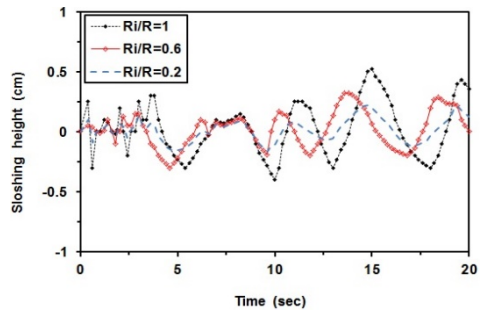
**شکل (۱۱): طیف دامنه فوریه فشار هیدرودینامیکی برای مخزن استوانه‌ای لاغر ($R_i/R$=0.5 و $H/R$=1.5)**

به‌عنوان‌مثال با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که تحت تأثیر زلزله السنترو، در حالتی که نسبت بازشدگی تیغه‌های مخزن ۰/۶ است تأثیر تیغه‌ها به‌صورت کاهش دامنه طیف فوریه مودهای اول و دوم ولی افزایش مود سوم ظاهر می‌شود. ولی برای همین مخزن و در شرایط مشابه تحت تأثیر زلزله کوبه دامنه طیف فوریه مود اول کاهش یافته و مودهای دوم و سوم افزایش می‌یابد. رخداد چنین حالاتی به محتوای فرکانسی بار زلزله کاملاً وابسته است.

در شکل (۱۲) تغییرات ارتفاع امواج سطحی در یک نقطه از این سطح (نقطه y=R در شکل (۱))، تحت تأثیر زلزله‌های موردمطالعه نشان داده شده است. با اعمال شتاب‌نگاشت زلزله السنترو حداکثر ارتفاع امواج سطحی در مخزن استوانه‌ای بدون تیغه‌های میراگر ۴۹/۵ سانتیمتر به دست می‌آید، درحالی‌که با کاربرد تیغه‌های میراگر با نسبت‌های بازشدگی ۰/۶ و ۰/۲ مقادیر متناظر به ترتیب ۳۳ و ۲۳/۵ سانتیمتر برآورد شده است. همچنین با اعمال شتاب‌نگاشت زلزله کوبه مقدار حداکثر ارتفاع امواج سطحی بدون تیغه‌های میراگر ۵۲/۱ سانتیمتر حاصل شده است که با کاربرد تیغه‌های میراگر با نسبت‌های یادشده مقادیر متناظر به ترتیب ۳۲/۵ و ۲۲/۲ سانتیمتر برآورد می‌شود؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت با کم شدن نسبت بازشدگی تیغه-های میراگر، ارتفاع تلاطم سطح آزاد کاهش یافته است که البته رخداد این پدیده به محتوای فرکانسی شتاب اعمال شده کاملاً وابسته است.



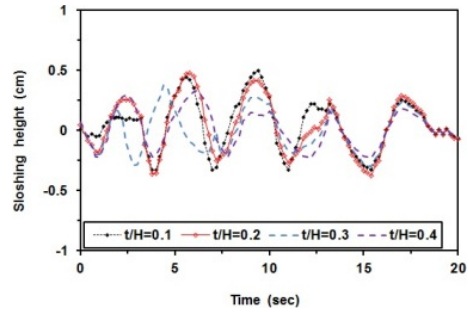

**الف) زلزله السنترو**



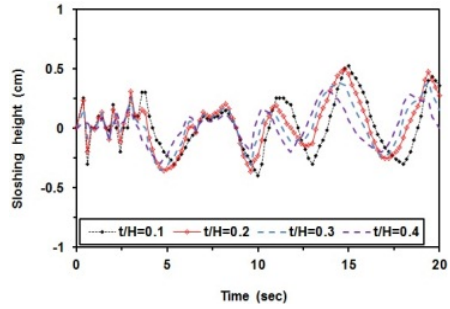

**ب) زلزله کوبه**

**شکل (۱۲): تاریخچه زمانی تلاطم سطح آب در مخزن استوانه‌ای با بازشدگی‌های مختلف تیغه ($t/H$=0.4)**

در شکل (۱۳) تغییرات ارتفاع امواج سطحی در نقطه y=R (شکل (۱)) برای جانمایی‌های مختلف تیغه‌های میراگر تحت تأثیر زلزله‌های موردمطالعه ارائه شده است.




**الف) زلزله السنترو**




**ب) زلزله کوبه**

**شکل (۱۳): تاریخچه زمانی تلاطم سطح آب در مخزن استوانه‌ای با جانمایی‌های مختلف تیغه ($R_i/R$=0.6)**

با اعمال شتاب‌نگاشت زلزله السنترو حداکثر ارتفاع امواج سطحی با کاربرد تیغه‌های میراگر با موقعیت‌های مختلف قرارگیری ($t/H$) برابر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ به ترتیب ۴۹/۵، ۴۷/۴، ۳۷/۳ و ۳۳ سانتیمتر برآورد شده است. همچنین با اعمال شتاب‌نگاشت زلزله کوبه مقدار حداکثر ارتفاع امواج سطحی با نسبت‌های یاد شده، مقادیر متناظر به ترتیب ۵۲/۱، ۴۹/۷، ۳۸/۷ و ۳۲/۵ سانتیمتر خواهند بود. این نتایج نشان‌دهنده این واقعیت است که با نزدیک شدن تیغه‌های میراگر به سطح آزاد آب به‌خصوص برای محدوده $t/H>0.3$ مقدار حداکثر ارتفاع تلاطم سطح آزاد به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. البته با مقایسه نتایج شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان دریافت، با جانمایی مناسب تیغه‌های میراگر می‌توان ارتفاع امواج متلاطم سطحی را تا حد زیادی مهار نمود که به‌نوبه خود از لحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه‌تر از تغییر اندازه تیغه‌های میراگر است.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش المان مرزی جهت گسسته‌سازی سیال درون مخزن و با کاربرد تابع گرین و با در نظر گرفتن معادله لاپلاس به‌عنوان رابطه حاکم بر حرکت سیال، مدلی برای بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن صلب متقارن محوری مجهز به تیغه‌های میراگر محیطی چندگانه در قلمرو فرکانس و زمان توسعه داده شده است. بر اساس نتایج تحلیل‌ها، با قرارگیری تیغه‌های میراگر درون مخزن فرکانس مود طبیعی مخزن که خود تابعی از مشخصات هندسی مخزن است تغییر می‌کند که به‌تبع آن پاسخ مخزن نیز با توجه به محتوای فرکانسی بارگذاری اعمال‌شده تغییر خواهد نمود. با توجه به افزایش نیروی برش پایه در مقابل کاهش لنگر واژگونی و با در نظر گرفتن تأثیر قابل‌توجه تیغه میراگر بر کاهش ارتفاع امواج متلاطم، می‌توان چنین برداشت نمود که کاربرد تیغه‌های میراگر اغلب منجر به کاهش فشار تلاطم امواج سطحی و افزایش فشار ناشی از ناحیه زیرین تیغه‌ها (جرم ضربه‌ای) می‌شود که این امر در مجموع باعث افزایش برش پایه و کاهش لنگر واژگونی می‌شود. با نزدیک‌شدن تیغه‌های میراگر به سطح آزاد آب به‌خصوص در محدوده یک‌سوم قسمت بالایی مخزن و با کاهش نسبت بازشدگی تیغه‌ها، شاهد افزایش تأثیر تیغه‌ها هستیم. درواقع جانمایی مناسب تیغه‌های میراگر در راستای ارتفاع مخزن

در مقایسه با افزایش اندازه آن‌ها از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر است و با راندمان بیشتری می‌تواند بر فرکانس امواج تلاطمی تأثیر بگذارد. باید اشاره نمود که نتایج ارائه شده در قلمرو زمان، صرفاً بر اثر اعمال دو شتاب‌نگاشت یاد شده بر مخزن صلب متقارن مجهز به تیغه‌های میراگر مسطح افقی است و ممکن است با اعمال شتاب‌نگاشت‌ها با محتوای فرکانسی متفاوت شاهد تأثیر تیغه‌ها به‌گونه‌ای دیگر باشیم. ازاین‌رو در تحقیقات آتی می‌توان به بررسی تأثیر شرایط مختلف بر رفتار مخازن معرفی‌شده در این تحقیق پرداخت.

## مراجع


1- Biswal, K., Bhattacharyya, S. and Sinha, P. (2003). “Free-vibration analysis of liquid-filled tank with baffles. ” *Journal of Sound and Vibration*. 259(1), 177–192.

2- Mikishev, G. and Dorozhkin, N. (1961). “An experimental investigation of free oscillation of a liquid in containers. ” *Mekhanika Mashinostroenie*. 4, 48-83.

3- NASA Technical Report SP-8031 (1969) 467 pp.

4- Evans, D. V. and McIver, P. (1987). “Resonant frequencies in a container with a vertical baffle. ” *Journal of Fluid Mechanics*. 175(February 1987), 295–307.

5- Young-Wann, K. and Young-Shin, L. (2005). “Coupled vibration analysis of liquid-filled rigid cylindrical storage tank with an annular plate cover.” *Journal of Sound and Vibration*. 279(1-2), 217–235.

6- Welt, F. and Modi, V. J. (1992). “Vibration damping through liquid sloshing, Part II: experimental results. ” *Journal of Vibration and Acoustics*. 114(1), 10–16.

7- Hung, R. J. and Pan, H. L. (1995). “Baffle effect on sloshing-modulated torques responsed to orbital accelerations in microgravity. ” *Journal of Spacecraft and Rockets*. 32(4), 723–731.

8- Biswal, K. C., Bhattacharyya, S. K. and Sinha, P. K. (2003). “Free vibration analysis of liquid filled tank with baffles. ” *Journal of Sound and Vibration*. 259(1), 177–192.

9- 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(4), 829–845.

10- Gedikli, A. and Erguven, M. E. (1999). “Seismic analysis of liquid storage tank with baffle.” *Journal of Sound and Vibration*. 223(1), 141-155.

11- Gavrilyuk, I., Lukovsky, I. and Trotsenko, Y. (2006). “The fluid sloshing in a vertical circular cylindrical tank with an annular baffle. Part 1: Linear fundamental solutions.” *Journal of Engineering Mathematics*. 54(1), 71–88.

12- 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(9), 1419-1433.

13- Sygulski, R. (2011). “Boundary element analysis of liquid sloshing in baffled tanks.” *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 35(8), 978–83.

14- Shekari, M. R., Khaji, N. and Ahmadi, M. T. (2010). “On the seismic behavior of cylindrical base isolated liquid storage tanks excited by longperiod ground motions. ” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 30(10), 968-980.

15- Brebbia, C. and Dominguez, J. (1992). Boundary Elements: An Introductory Course. WIT Press, Computational Mechanics Publications.

16- Veletsos, A. and Tang, Y. (1987). “Rocking response of liquid storage tanks.” *Journal of Engineering Mechanics*. 113(11), 1774-1792.