

## مطالعه عددی تاثیر نسبت ابعاد هندسی بر پدیده اسلاشینگ مخازن مستطیلی تحت تحریک زاویه‌دار

اکبر صفرزاده<sup>۱\*</sup>، لاله نوعی اقدم<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، safarzadeh@uma.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه محقق اردبیلی،

l\_noeiaghdam@yahoo.com

### چکیده

در این مقاله مدل‌سازی عددی سه‌بعدی پدیده اسلاشینگ در مخازن مستطیلی تحت تحریک زاویه‌دار انجام شده و تاثیر نسبت ابعاد هندسی بر حداکثر نیروی فشاری وارد بر کف و جداره مخزن و حداکثر بالاروی سطح آب بر روی دیواره مخزن بررسی می‌شود. برای اعمال تحریک دینامیکی به توده سیال از روش سیستم مختصات غیراینرسیال و برای تعیین تغییرات سطح آب، از روش جزء حجم سیال استفاده شده است. برای صحت سنجی عملکرد روش سیستم مختصات غیراینرسیال، مدل‌های عددی از مدل مبنای آزمایشگاهی ساخته شده و تاثیر راستا، فرکانس و دامنه تحریک بر نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. نتایج حاصله موید دقت بسیار خوب این روش در پیش‌بینی پدیده اسلاشینگ در مخزن است. به منظور بررسی تاثیر نسبت ابعاد، سه مخزن با نسبت طول به عرض مختلف در نظر گرفته شده و به‌ازای نسبت فرکانس‌های مختلف، تحت تحریک هارمونیک قرار گرفته‌اند. براساس نتایج حاصله، در تمامی حالات حداکثر نیروی وارد بر جداره مخزن در حالتی رخ می‌دهد که تحریک هم‌راستا با وجه طولی مخزن باشد. در مقابل، حداکثر بالاروی سطح آب به‌ازای تحریک قطری رخ می‌دهد. با افزایش نسبت طول مخزن به عرض آن، نیروی وارد بر دیواره جانبی افزایش یافته و در مقابل، نیروی وارد بر کف کاهش یافته است.

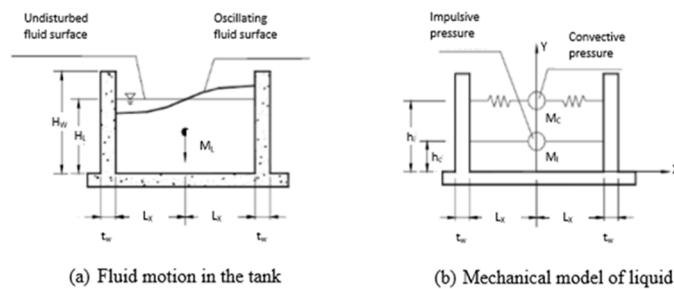
واژه‌های کلیدی فارسی: اسلاشینگ، تحریک، نیروی فشاری، جرم صلب، جرم مواج

### ۱- مقدمه

مخازن ذخیره آب یکی از سازه‌های زیر بنایی عمرانی با درجه اهمیت بالا می‌باشند و با توجه به کاربرد این سازه‌ها، بررسی رفتارشان هنگام زلزله بسیار مهم تر از مباحث اقتصادی آن هاست. مساله اصلی در مطالعه اسلاشینگ سیال، به دست آوردن توزیع فشار هیدرودینامیکی، نیروها، گشتاورها و نوسانات سطح مایع است. این پارامترها بر پایداری دینامیکی و کارکرد مخازن ذخیره مایعات اثر مستقیم دارند. زمانی که مخزن حاوی سیال تحت تحریک بار دینامیکی قرار می‌گیرد، سیال داخل مخزن تحریک شده و حرکت سیال نیرویی به دیواره مخزن وارد می‌کند که به دو جزء نوسانی و ضربه‌ای تقسیم می‌شوند. بخشی از سیال که در لایه‌های تحتانی واقع است، هماهنگ با دیواره مخزن حرکت نموده و نیروی عکس‌العمل را به دیواره‌های مخزن وارد می‌کند و تحت عنوان جرم سخت در نظر گرفته می‌شود. در حالی که نوسانات سطح آزاد سیال که زمان تناوب بزرگتری نسبت به لایه‌های پایینی دارد، نیروی نوسانی را به دیواره‌های مخزن وارد می‌کند که باعث بالاروی سطح آب می‌شود و این بخش از سیال نیز به جرم مواج معروف است. بواسطه حرکت سیال در داخل مخزن، چه بصورت جرم سخت و چه بصورت جرم مواج، اندرکنش بین سیال و مخزن باعث شکل‌گیری فشار دینامیکی می‌شود. در واقع حرکت افقی مخزن، سیال را وادار به اسلاشینگ می‌کند و نوسانات قائم مخزن عموماً باعث چنین حرکاتی نمی‌شوند. برای اطمینان از عملکرد مناسب مخازن در هنگام وقوع زمین لرزه، شناخت اضافه

فشار هیدرودینامیکی وارد شده بر دیوارهای آن که ناشی از ارتعاش سیال ذخیره شده می باشد از بیشترین اهمیت برخوردار است.

یکی از اولین مطالعات در بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی فشار هیدرودینامیکی در مخازن مستطیلی که تحت حرکت افقی قرار گرفته اند، توسط (هاسکین و ژاکوبسن، ۱۹۳۴) انجام شد. مطالعات اولیه تحلیلی در زمینه هیدرودینامیک مخازن توسط (ژاکوبسن، ۱۹۴۹) و (هاسنر، ۱۹۵۴) صورت گرفت. نتایج این تحلیل ها نشان داد که تحت اثر تحریکات ورودی، بخشی از مایع درون مخزن که به بخش موج موسوم است دچار نوسانات پیروید بلند می گردد در حالی که مابقی مایع که به بخش سخت موسوم است، شتابی مشابه تحریکات وارده به مخزن را تجربه کرده و به صورت صلب گونه و با دیواره مخزن در حرکت می باشد. پس از آن (هاسنر، ۱۹۶۳) ایده خود را در برآورد پاسخ سیال در مخازن صلب مستطیلی و استوانه ای تحت تحریک زلزله، فرموله کرد. وی دریافت که فشار هیدرودینامیکی ناشی از تحریک لرزه ای به دو مولفه ضربه ای و نوسانی با استفاده از تقریب جرم متمرکز تقسیم شده است. شکل ۱ بیانگر مدل جرم و فنر ارائه شده توسط (هاسنر، ۱۹۶۳) می باشد.



شکل ۱: نوسانات سیال داخل مخزن و مدل جرم و فنر ارائه شده توسط هاسنر (۱۹۶۳)

(هارون و هاسنر، ۱۹۸۱) هیدرودینامیک مخازن با جداره انعطاف پذیر قرار گرفته بر روی بستر صلب را بررسی نمودند و نشان دادند برش پایه و لنگر واژگونی محاسبه شده با فرض صلب بودن جداره مخزن به مراتب کمتر از مقادیر به دست آمده از تحلیل ها با فرض انعطاف پذیری دیواره مخزن می باشد. (سو و همکاران، ۱۹۸۲) با استفاده از تئوری امواج خطی، مودهای ارتعاشی طبیعی یک مخزن مستطیلی را به صورت رابطه (۱) ارائه نمودند:

$$\omega_m = \sqrt{g \frac{m\pi}{L} \tanh\left(\frac{m\pi}{L} d\right)} \quad (1)$$

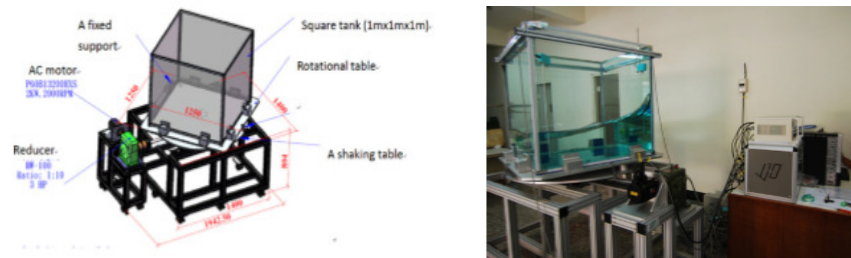
که در آن،  $d$  عمق آب درون مخزن،  $L$  طول مخزن در راستای تحریک،  $g$  شتاب گرانشی زمین و  $m$  مدنوسان می باشد. (مینوا، ۱۹۸۴) تاثیر انعطاف پذیری دیواره های مخازن و فشار هیدرودینامیکی وارد بر دیوار را بررسی کرد و مطالعات آزمایشگاهی خود را برای تعیین خصوصیات دینامیکی مخازن مستطیلی انجام داد. (پارک و همکاران، ۱۹۹۲) مطالعاتی را بر روی مخازن مستطیلی انجام دادند. آن ها از روش المان مرزی برای به دست آوردن توزیع فشار هیدرودینامیکی و روش المان محدود برای تحلیل دیواره های سخت استفاده کردند. (جلبی و آکیلدیز، ۲۰۰۱) به بررسی مدل غیر خطی اسلاشینگ در مخازنی که به صورت هارمونیک در راستای انحنای قائم همانند یک مخزن واقعی تحت تحریک در روی زمین به حرکت در می آیند، پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق، نقش دامنه و فرکانس مخازن با بافل یا بدون آن به صورت مستقیم در حالت غیر خطی پدیده اسلاشینگ تاثیر می گذارند. (کیانوش و همکاران، ۲۰۰۶) یک روش جدید برای تجزیه و تحلیل لرزه ای مخازن مستطیل شکل در فضای دو بعدی ارائه کردند که در آن تاثیر هر دو مولفه های ضربه ای و انتقالی در دامنه زمانی در نظر گرفته شده است. (هاکان آکدنیز

و اردم اول، ۲۰۰۶) اسلاشینگ مخازن مستطیلی متحرک را در حالت سه بعدی شبیه سازی عددی نموده و اعتبار مدل عددی را با نتایج آزمایشگاهی مورد سنجش قرار دادند. (یانگ هسینگچن و همکاران، ۲۰۰۷) برای محاسبات اسلاشینگ غیر خطی مخازن و محاسبات سطوح موج های ناپایدار و برش پایه بدون فرض عمق آب از روش المان مرزی و با استفاده از المان خطی چهار گوشه ایزوپارامتریک برای مش بندی مرزهای مخزن استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که محاسبه برش پایه با استفاده از فشار هیدرواستاتیک زمانی دارای صحت است که فرکانس نیرویی خیلی بزرگتر از اولین فرکانس اساسی مخزن نباشد. تحریک هارمونیک با هر دامنه بزرگی فقط می تواند باعث موج هارمونیک شود و مدل خطی نمی تواند پدیده تشدید را به طور دقیق مدل نماید. (قائم مقامی و کیانوش، ۲۰۰۹) رفتار لرزه ای مخازن مستطیلی سیال در فضای دو بعدی را مورد بررسی قرار دادند. آنها دو روش مختلف المان محدود مطابق با مخازن کم ارتفاع و بلند با تکیه گاه های صلب تحت تاثیر حرکت زمین به صورت افقی و عمودی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که انعطاف پذیری دیواره و خواص میرایی سیال اثر عمده ای بر رفتار لرزه ای مخازن سیال دارد. (ژائو میمی، ۲۰۱۱) در پژوهشی تحت عنوان مدل سازی عددی اسلاشینگ مایع در مخازن مستطیلی با استفاده از روش CPM (روش ذرات سازگار) به بررسی این موضوع پرداخته است. (اکیدا و همکاران، ۲۰۱۲) به بررسی نظری و تجربی نوسانات غیر خطی مایع در یک مخزن مربعی که در معرض تحریک افقی مایل قرار گرفته شده است پرداختند. تاثیرات نسبت ابعاد مخزن، سطح مایع و جهت تحریک در انواع موج نوسانات حالت پایدار در جزئیات مورد بحث قرار گرفت. (ووچی هو و همکاران، ۲۰۱۳) با استفاده از روش تفاضل محدود و نتایج آزمایشگاهی مدل مخزن مربعی را تحت تحریک هارمونیک با فرکانس های مختلف قرار دادند.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱ مدل سازی اولیه

با توجه به هدف تحقیق حاضر، لازم است تا قابلیت مدل عددی برای شبیه سازی پدیده اسلاشینگ تحت تحریک زاویه دار نسبت به اضلاع مخزن بررسی شود. در این بخش از تحقیق، از داده های آزمایشگاهی (ووچی هو و همکاران، ۲۰۱۳) به منظور ارزیابی مدل عددی برای بررسی عملکرد روش دستگاه مختصاتی غیر اینرسی در پیش بینی پدیده اسلاشینگ مخازن مستطیلی تحت تحریک زاویه دار استفاده شده است. طبق نتایج ارائه شده از این مدل آزمایشگاهی، پدیده اسلاشینگ به عمق سیال، ابعاد مخزن، دامنه و فرکانس تحریک و غلظت سیال وابسته است. رفتار غیر خطی امواج اسلاشینگ یک پدیده پیچیده ای است که تحلیل آن با روش تئوری و عددی مشکل می باشد. از طرفی ارزیابی آزمایشگاهی این پدیده بسیار محدود و بیشتر، به تحریک مخزن تحت زاویه  $45^\circ$  و  $0^\circ = \theta$  تمرکز شده است. اما در مدل آزمایشگاهی (ووچی هو و همکاران، ۲۰۱۳) تاثیر زوایای تحریک مختلف بر پدیده اسلاشینگ بررسی شده است. در شکل ۲ مدل آزمایشگاهی و طرح شماتیک مخزن متصل به میز لرزنده که تحت زوایای تحریک مختلف حرکت می کند، نشان داده شده است.



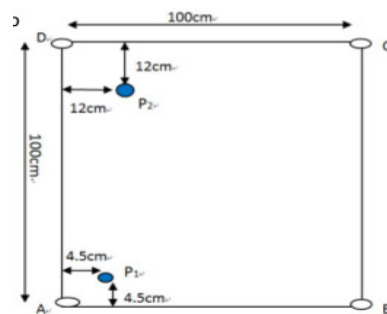
شکل ۲- مدل آزمایشگاهی و طرح شماتیک مخزن مستطیلی تحت تحریک زاویه دار (Wu et al ۲۰۱۳)

در این آزمایش، از مخزن مربعی شکل به ابعاد ۱ متر که عمق اولیه آب در مخزن ۰/۲۵ متر، شتاب گرانشی زمین  $9.81 \text{ m/s}^2$  در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ هندسه و شبکه بندی مورد نظر نشان داده شده است. شبکه بندی مورد نظر به نحوی انتخاب شده که ضمن شناخت هندسه میدان، در بخش هایی از مدل برای پیش بینی دقیق تر میدان از شبکه بندی ریزتر استفاده شده است. در ضمن، با توجه به حرکت زاویه دار مخزن، ابعاد بلوک شبکه بندی به نحوی انتخاب شد که در هیچ لحظه، مخزن از داخل محدوده شبکه بندی شده خارج نشود. برای مدل سازی این مخزن نیز از شرط مرزی دیواره wall برای تمامی جداره ها استفاده شده است.



شکل ۳- شرایط مرزی و شبکه بندی مورد استفاده در مدل سازی مخزن مستطیلی

با توجه با اینکه در کار آزمایشگاهی، عمق اولیه سیال درون مخزن، ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است، بدین منظور در ارائه شرایط اولیه سیال را با  $\text{VOF} = 1$  و ارتفاع ۰/۲۵ متر در نظر می گیریم. در این پژوهش از نقاط مختلف مخزن برای برداشت داده های هیدرولیکی استفاده شده است که مشخصات این نقاط با نام های  $P_1$  و  $P_2$  در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴ : مشخصات نقاط اندازه گیری پارامتر های هیدرولیکی مختلف در مخزن

## ۲-۲ بارگذاری

سری زمانی نوسانات مخزن در راستای محور  $X$  و  $Y$  به صورت گزینه از پیش تعیین شده از قسمت سیستم مختصاتی غیر اینرسی نرم افزار flow 3d وارد می شود. بارگذاری انجام شده به صورت هارمونیک بوده و از معادله (۲) و (۳) پیروی می کند.

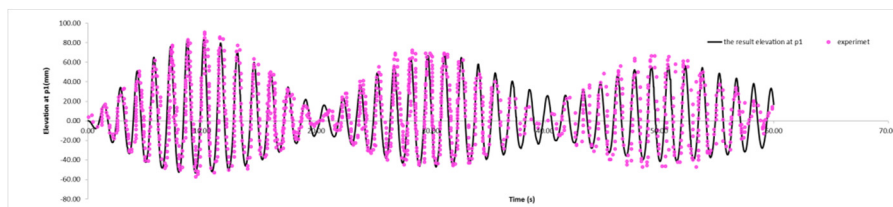
$$x(t) = A \sin \omega t \cos(\theta) \quad (2)$$

$$y(t) = A \sin \omega t \sin(\theta) \quad (3)$$

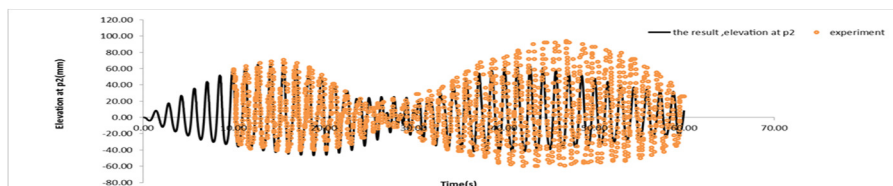
که در این رابطه،  $x(t)$  موقعیت مکانی لحظه ای مخزن،  $A$  دامنه تحریک،  $L$  طول مخزن،  $\omega$  فرکانس تحریک و  $\theta$  زاویه تحریک می باشد.

## ۲-۳ صحت سنجی مدل عددی حاضر با داده های آزمایشگاهی

در مدل حاضر، مخزن تحت تحریک زاویه دار  $30^\circ$  درجه، در مدت زمان  $60$  ثانیه و با فرکانسی معادل  $0.93$  فرکانس طبیعی مخزن قرار گرفته و صحت نتایج در نقطه  $P_1$  که از دیواره سمت چپ مخزن به اندازه  $4/5$  سانتی متر فاصله دارد، در شکل ۵ نشان داده شده است. صحت نتایج در نقطه  $P_2$  نیز مطابق شکل ۶ تحت تحریک زاویه دار  $15^\circ$  درجه در مدت زمان  $60$  ثانیه با فرکانسی معادل  $0.97$  فرکانس طبیعی مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. پایین ترین فرکانس طبیعی مخزن از رابطه (۱) به دست می آید که معادل  $\omega = 4/49 \text{ rad/s}$  می باشد. نتایج اندازه گیری آزمایشگاهی با تحلیل های عددی همخوانی خوبی دارد. نوسانات امواج در نتایج آزمایشگاهی دقیقاً مشابه تحلیل های عددی می باشد اما بین نقط پیک آن ها اندکی اختلاف وجود دارد که این اختلاف حدود  $6$  درصد عمق آب می باشد.



شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در  $L/B=1$  و  $\theta = 30^\circ$  و  $\omega = 0.93\omega_1$  در مدت زمان  $60$  ثانیه



شکل ۶: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در  $L/B=1$  و  $\theta = 15^\circ$  و  $\omega = 0.97\omega_1$  در مدت زمان  $60$  ثانیه

## ۲-۴ تاثیر نسبت ابعاد هندسی بر پدیده اسلاشینگ مخازن مستطیلی تحت تحریک زاویه دار:

به منظور صحت سنجی عملکرد نرم افزار مورد استفاده، مخزن ساخته شده در کار آزمایشگاهی (ووجی هو و همکاران، ۲۰۱۳)، تحت تحریک  $15^\circ$  و  $30^\circ$  درجه قرار گرفته و با داده های آزمایشگاهی مقایسه شد. در این بخش مخزن مورد نظر

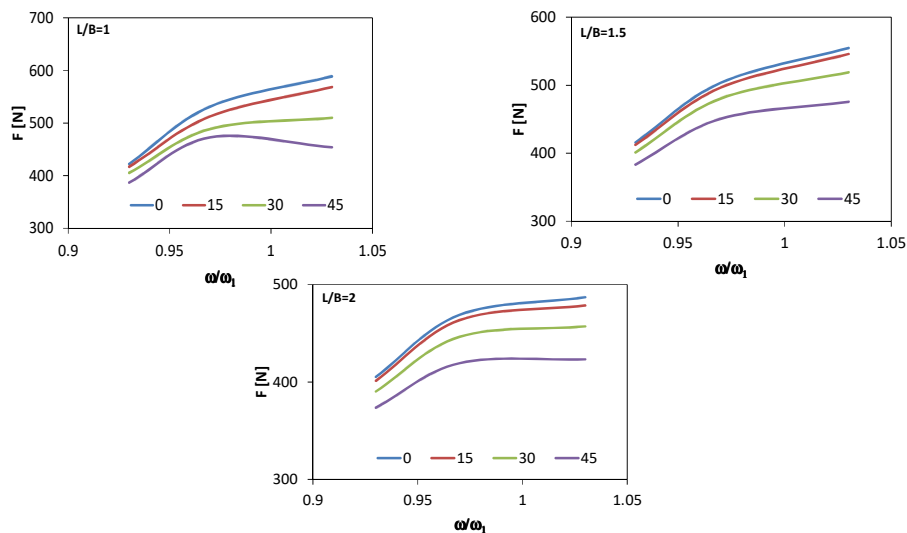
با نسبت  $\frac{L}{B}$  های ۱/۵ و ۲، تحت تحریک زوایای ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه قرار گرفته و حداکثر ارتفاع سطح آزاد و حداکثر نیروی وارد بر جداره سمت راست و کف مخزن و همچنین حداکثر بالاروی سطح آب نسبت به  $\omega/\omega_1$  که بیانگر نسبت فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی مخزن می باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱ مقادیر حداکثر نیروهای وارد بر جداره و کف مخازن با ابعاد مختلف و تحت تحریک هارمونیک با سه فرکانس مختلف در چهار راستای ۰ الی ۴۵ درجه ارائه شده است.

جدول ۱: مقادیر حداکثر نیروی وارد بر جداره و کف مخزن با نسبت ابعاد مختلف

L/B						$\frac{\omega}{\omega_1}$	Max F (N)	$\theta$ (درجه)	
Hmax	۲ $\omega_1 = 2/39$	Hmax	۱/۵ $\omega_1 = 3/13$	Hmax	۱ $\omega_1 = 4/49$				
۰/۲۹۵۶	۴۰۵/۳۵۶۱	۰/۲۰۱۳	۴۱۵/۷۹۷	۰/۳۱۱	۴۲۲/۲۰۴۳	۰/۹۳	$F_{wall}$	۰	
	۴۹۱۴/۳۴۲		۳۶۸۷/۵۷۳		۲۴۷۰/۷۸۱		$F_{bed}$		
۰/۳۲۵	۴۶۸/۹۹۷۷	۰/۳۵	۵۰۳/۵۲۸	۰/۳۹۸	۵۳۱/۳۹۹۳۳	۰/۹۷	$F_{wall}$		
	۴۹۲۱/۴۰۳		۳۷۰۳/۴۶۴		۲۵۲۴/۵۷۳		$F_{bed}$		
۰/۳۳۱	۴۸۷/۱۴۶۹	۰/۳۸۱	۵۵۴/۹۰۷	۰/۴۵۸	۵۸۸/۷۸۰۳	۱/۰۳	$F_{wall}$		
	۴۹۱۳/۹۳۴		۳۷۲۳/۱۸۴		۲۵۷۹/۹۶۲		$F_{bed}$		
۰/۲۹۳۳	۴۰۱/۲۹۹۷	۰/۳	۴۱۲/۴۳۲۴	۰/۳۰۸	۴۱۶/۸۰۷۸	۰/۹۳	$F_{wall}$		۱۵
	۴۹۱۳/۷۱۱		۳۶۸۷/۰۸۵		۲۴۷۰/۵۲۲		$F_{bed}$		
۰/۳۲۲	۴۶۳/۵۶۹	۰/۳۴۴	۴۹۶/۵۶۳۵	۰/۳۷۵	۵۱۲/۷۶۷	۰/۹۷	$F_{wall}$		
	۴۹۲۰/۱۶۹		۳۷۰۱/۰۷۴		۲۵۲۴/۵۶۴		$F_{bed}$		
۰/۳۲۷	۴۷۸/۵۳۲۸	۰/۳۷۵	۵۴۶/۹۶۴	۰/۴۴۷	۵۶۸/۵۸	۱/۰۳	$F_{wall}$		
	۴۹۱۸/۴۴۸		۳۷۱۹/۷۷		۲۵۶۷/۵۲۷		$F_{bed}$		
۰/۲۸۷۹	۳۹۰/۳۰۹۸	۰/۲۹۴	۴۰۱/۱۵۹۶	۰/۲۹۷۶	۴۰۵/۲۷۲۴	۰/۹۳	$F_{wall}$	۳۰	
	۴۹۱۱/۶۹۸		۳۶۸۵/۴۸۷		۲۴۷۱/۸۰۴		$F_{bed}$		
۰/۳۱۳۷	۴۴۶/۴۶۵۵	۰/۳۳۴	۴۸۰/۴۱۱۶	۰/۳۴۵	۴۸۸/۸۷۴۵	۰/۹۷	$F_{wall}$		
	۴۹۱۶/۹۰۶		۳۶۹۷/۴۰۳		۲۵۳۸/۵۷		$F_{bed}$		
۰/۳۱۶	۴۵۷/۱۷۵۸	۰/۳۵۶	۵۱۹/۰۶۵۲	۰/۳۷۷	۵۱۰/۱۱۲۵	۱/۰۳	$F_{wall}$		
	۴۹۱۵/۶۷۶		۳۷۱۰/۰۸۳		۲۵۴۷/۳۱		$F_{bed}$		
۰/۲۸	۳۷۳/۶۰۳۹	۰/۲۸۵۸	۳۸۳/۳۴۱۴	۰/۲۸۳۹	۳۸۶/۶۹۱۳	۰/۹۳	$F_{wall}$		۴۵
	۴۹۰۹/۲۹۳		۳۶۸۳/۴۹۳		۲۴۷۲/۳۰۲		$F_{bed}$		
۰/۲۹۹۹	۴۱۹/۴۴۷۴	۰/۳۱۸	۴۵۰/۵۹۳	۰/۳۲۶	۴۷۲/۹۵۵۳	۰/۹۷	$F_{wall}$		
	۴۹۱۲/۲۸۹		۳۶۹۱/۷۸۹		۲۵۴۵/۰۰۶		$F_{bed}$		
۰/۳۰۰۹	۴۲۳/۳۲۹۶	۰/۳۳	۴۷۵/۸۸۹	۰/۳۲۱	۴۵۳/۹۵۱۲	۱/۰۳	$F_{wall}$		
	۴۹۱۱/۹۹۳		۳۶۹۹/۱۱۸		۲۵۴۳/۱۰۲		$F_{bed}$		

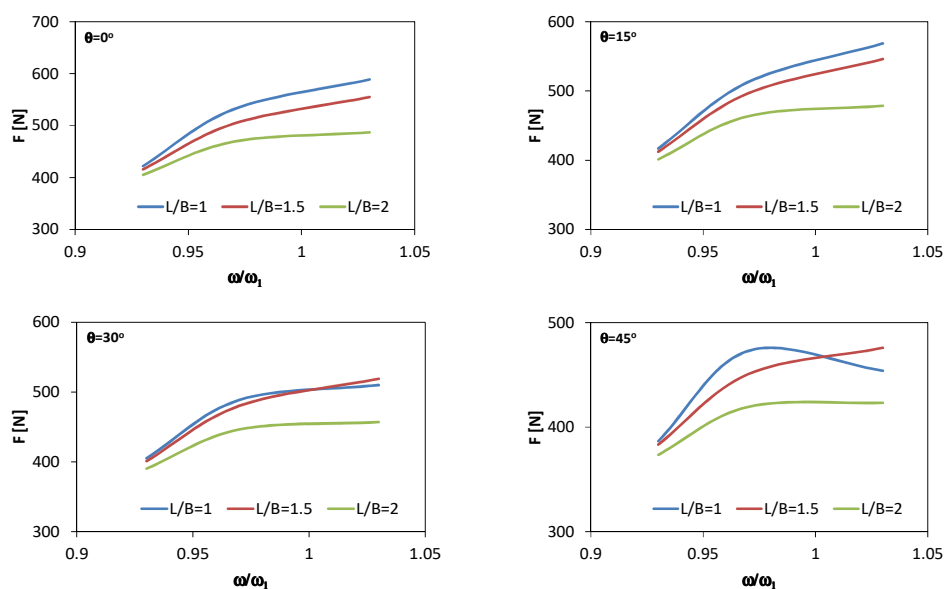
به منظور بررسی روند تغییرات نیروها، شکل های ۷ الی ۱۰ ارائه شده اند. با توجه به شکل ۷ در تمامی مخزن ها، بیشترین نیروی وارد بر جداره در حالت تحریک صفر درجه (در امتداد ضلع طولی مخزن) رخ داده و با افزایش زاویه تحریک، مقدار

حداکثر نیروی وارد بر جداره به ازای تمامی فرکانس های تحریک، کاهش می یابد. در همه مخزن ها، با افزایش فرکانس تحریک به ازای تمامی زوایا، مقدار نیروی وارد بر جداره جانبی افزایش می یابد.



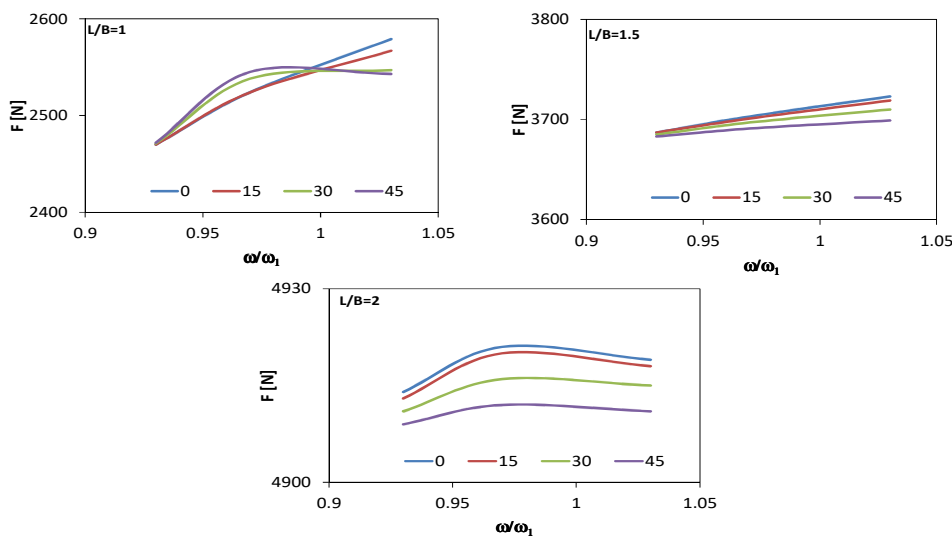
شکل ۷- تغییرات حداکثر نیروی وارد بر جداره سمت راست مخزن نسبت به فرکانس تحریک در مخازن مختلف

با توجه به شکل ۸، با افزایش نسبت طول به عرض، نیروی جانبی وارد بر جداره کاهش می یابد. نکته قابل توجه در این شکل، تغییرات نیرو در مخزن با نسبت ابعاد ۱ به ازای تحریک تحت زاویه ۴۵ درجه می باشد به نحوی که به ازای نسبت فرکانس بزرگتر از یک، مقدار نیروی وارد بر جداره کاهش یافته است. بررسی روند نوسانات سه بعدی سطح آب در مخزن نشان داد که این پدیده به علت تغییر در شکل و الگوی امواج حاصله در داخل مخزن مربعی می باشد.



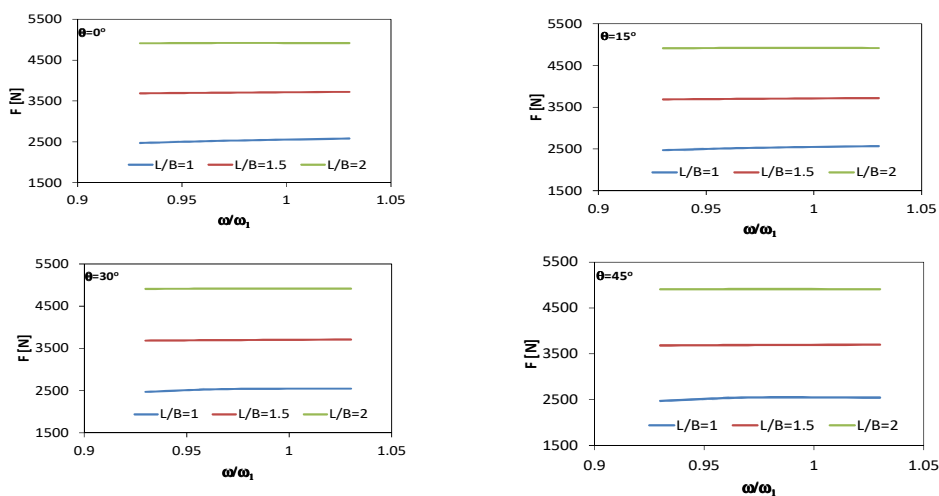
شکل ۸- تغییرات نیروی وارد بر جداره مخزن تحت تحریک با زوایای مختلف

در شکل های ۹ و ۱۰ تغییرات نیروی وارد بر کف مخازن مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل ۹، در مخزن مربعی، به ازای زوایای تحریک صفر و پانزده درجه، با افزایش فرکانس تحریک، نیروی وارد بر کف به صورت خطی افزایش می یابد ولی در زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه، مقدار نیروی وارد به کف برای فرکانسهای بزرگتر از فرکانس طبیعی تقریباً ثابت مانده است. در مخزن با نسبت طول به عرض ۱/۵ به ازای تمامی زوایای تحریک، مقدار نیروی وارد بر کف مخزن به صورت خطی افزایش می یابد. در مخزن با نسبت طول به عرض ۲، مقدار نیروی وارد بر کف به ازای زوایای تحریک و همچنین فرکانس های تحریک، تغییرات چندانی ندارد.



شکل ۹- تغییرات نیروی وارد بر کف مخزن تحت تحریک با زوایای مختلف

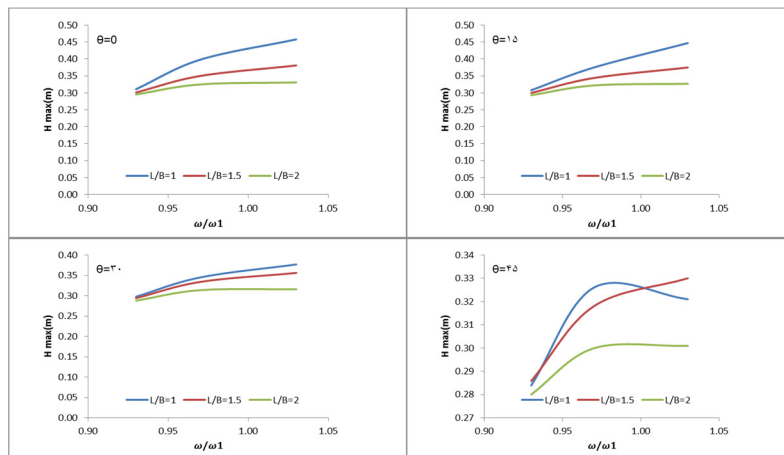
با توجه به شکل ۱۰، مقدار نیروی هیدرودینامیکی وارد بر کف مخزن به ازای تمامی زوایای تحریک، با افزایش نسبت طول به عرض، افزایش یافته و تغییرات نسبت به فرکانس تحریک به صورت خطی می باشد.



شکل ۱۰- تغییرات حداکثر نیروی وارد بر کف مخزن نسبت به فرکانس تحریک در مخازن مختلف

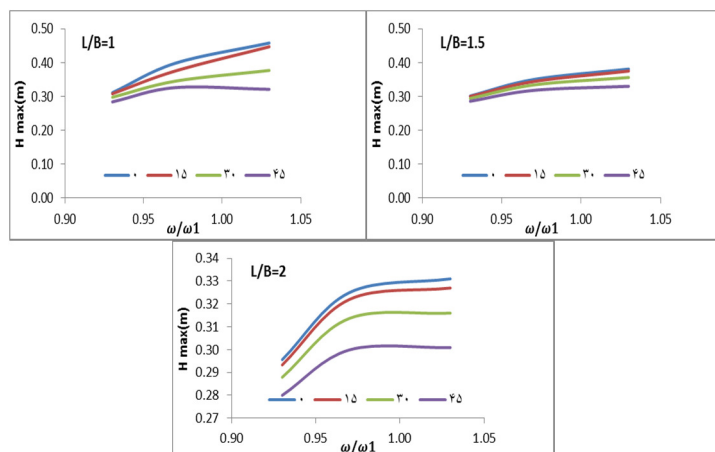


در شکل ۱۱ و ۱۲ بالاروی سطح آب تحت تحریک زاویه دار در مخازن مختلف ارائه شده است. در شکل ۱۱ در تمامی زوایای تحریک، با افزایش نسبت طول به عرض مخازن حداکثر بالاروی سطح آب کاهش می یابد. یعنی حداکثر بالاروی سطح آب به مخازن مربعی شکل اختصاص دارد.



شکل ۱۱: تغییرات حداکثر بالاروی سطح آب نسبت به فرکانس های مختلف با افزایش نسبت ابعاد هندسی

شکل ۱۲ نیز نشانگر حداکثر بالاروی سطح آب نسبت به فرکانس های مختلف در زوایای تحریک ۰ و ۱۵ و ۳۰ و ۴۵ درجه می باشد. مطابق شکل در هر مخزن با افزایش زاویه تحریک، حداکثر بالاروی سطح آب رو به کاهش است و بیشترین بالاروی زمانی رخ می دهد که تحریک، تحت زاویه صفر درجه یعنی در راستای اضلاع مخزن باشد.



شکل ۱۲: نمودار تغییرات حداکثر بالاروی سطح آب نسبت به فرکانس های مختلف با افزایش زاویه تحریک

### ۳- نتیجه گیری

در این مقاله مدلسازی عددی سه بعدی پدیده اسلاشینگ در مخازن مستطیلی تحت تحریک هارمونیک زاویه دار با استفاده از روش سیستم مختصات غیر اینرسیال انجام شده و نتایج زیر حاصل شده است:

- ۱- بر اساس صحت سنجی های صورت گرفته با داده های موجود آزمایشگاهی، روش سیستم مختصات غیر اینرسیال دقت بسیار خوبی برای شبیه سازی پدیده اسلاشینگ دارد.
- ۲- با افزایش فرکانس تحریک به ازای دامنه ثابت، مستقل از نسبت ابعاد، حداکثر نیروی وارد بر جداره و کف مخزن افزایش می یابد.
- ۳- بیشترین نیروی وارد بر جداره به ازای تحریک در راستای طولی مخزن ایجاد می شود.
- ۴- بیشترین بالاروی سطح آب به ازای زاویه تحریک صفر درجه یعنی در راستای طولی مخزن ایجاد می شود.
- ۵- با افزایش طول مخزن، نیروی وارد بر جداره به ازای تمامی نسبت فرکانس ها کاهش می یابد.
- ۶- با افزایش طول مخزن، نیروی وارد بر کف مخزن به ازای تمامی نسبت فرکانس ها افزایش می یابد.
- ۷- با افزایش طول مخزن، حداکثر بالاروی سطح آب به ازای تمامی نسبت فرکانس ها کاهش می یابد.

#### ۴-مراجع :

- 1- Hoskins L. M., Jacobsen L. S. 1934., "Water pressure in a tank caused by a simulated earthquake" Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 24.
- 2- Jacobsen L. S., 1949. "Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier" Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 39.
- 3 - Housner, G.W. 1954. "Earthquake Pressure on Fluid Containers", Project No. 081-095, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- 4- Housner G. W. 1963. "The dynamic behavior of water tanks" Bulletin of the Seismological Society of American, Vol. 53.
- 5- Haroun, M.A. and Housner, G.W. 1981., "Seismic Design of Liquid Storage Tanks", Journal Technical Councils, ASCE, 107(1), 191-207
- 6- Minowa C. 1980. Dynamic analysis for rectangular water tanks. Recent Advances in Lifeline Earthquake Engineering in Japan: 135-142.
- 7- Park, J.H., Koh, H.M., and coupled boundary element - finite element Kim, J. 1992 Liquid-structure interaction analysis by method in time domain. In Proceedings of the 7th International.
- 8- Kianoush, M.R., and Chen, J.Z. 2006. Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. Engineering Structures, 28(5): 704-715.
- 9- Hakan Akyildiz, N. Erdem Unal. 2006. "Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: Numerical simulation and Experimental validation" Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Istanbul Technical University, 34469 Maslak, Istanbul, Turkey.
- 10- Yung-Hsiang Chen, Wei-Shien Hwang and Chia-Hao Ko, . 2007. "Sloshing behaviours of rectangular and cylindrical liquid tanks subjected to harmonic and seismic excitations", Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taiwan, Republic of China.
- 11- Ghaemmaghami, A.R. and Kianoush, M.R. 2009. Effect of wall flexibility on dynamic response of concrete rectangular tanks under horizontal and vertical ground motions. ASCE Journal of Structural Engineering, Accepted for publication.
- 12- Gao Mimi. 2011. "Numerical simulation of liquid sloshing in rectangular tanks using consistent particle method and experimental verification." A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy department of civil engineering national university of singapore.
- 13- T. Ikeda, R.A. . 2012. Ibrahim, Y. Harata, T. Kuriyama, Nonlinear liquid sloshing in a square tank subjected to obliquely horizontal excitation, Journal of Fluid Mechanics 1-25
- 14- Wu Chih-Hua, . 2013. Chen Bang-Fuh, Hung Tin-Kan. "Hydrodynamic forces induced by transient sloshing in a 3D rectangular tank due to oblique horizontal excitation" Department of Bioengineering, University of Pittsburgh, United States.

## **Numerical Study on Effects of the Geometrical Parameters on Sloshing Phenomenon in Rectangular Tanks under Oblique Excitation**

**Akbar Safarzadeh<sup>1\*</sup>, Laleh Noeiaghdam<sup>2</sup>**

**1- Associate Professor of Water Eng., safarzadeh@uma.ac.ir**

**2- M.Sc.in Water Engineering & Hydraulic Structures, l\_noeiaghdam@yahoo.com**

### **Abstract**

In this paper 3D numerical modelling of the sloshing phenomenon in rectangular tanks has been conducted under the oblique excitation. Effect of the aspect ratio on the maximum side wall and bed hydrodynamic forces and also on the maximum water run up over the side wall has been investigated. The dynamic excitation to the fluid body has been applied using the non-inertial reference frame system and the volume of fluid (VOF) method has been used to capture the water surface variations. Two experimental benchmark test cases are used to verify the non-inertial reference frame method and effect of the excitation direction, frequency and amplitude has been studied. Results show that the non-inertial reference method has very good accuracy to predict the sloshing phenomenon. Afterward and in order to study the effect of the geometrical parameters on the sloshing phenomenon, three rectangular tanks with different length/width ratios have been considered and for various frequency ratios have been loaded under harmonic excitations. Results show that in all cases the maximum pressure force on the side wall occurs when the excitation is parallel with the side wall, while the maximum water surface occurs for the diagonal excitation. By increasing the length/width ratio the maximum pressure force on the side wall decreases and on the other hand the maximum pressure force on the tank bottom decreases.

**Keywords: Rectangular tank, Earthquake, Sloshing, Excitation direction, Aspect ratio, Hydrodynamic force.**