



بررسی عددی کنترل غیر فعال اسلاشینگ ناشی از زلزله در مخازن بتنی ذخیره آب

اکبر صفرزاده¹، لیلی اسفندیاری²

1- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

Safarzadeh@uma.ac.ir

2- دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

Leily_esfandiari@yahoo.com

چکیده

هدف اصلی این تحقیق، بررسی عددی تاثیر بافل بر کنترل غیر فعال پدیده اسلاشینگ ناشی از زلزله در مخازن بتنی ذخیره مایعات می باشد. بدین منظور از حل معادلات ناویر استوکس به همراه تکنیک های جزء حجم سیال و همچنین روش عمومی جسم متحرک استفاده شده و تاثیر قرار گیری صفحه عمود بر سطح آب بر کاهش پاسخ لرزه ای مخازن تحت تحریک هارمونیک با فرکانس های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می دهد که صفحه مورد استفاده به واسطه تغییر فرکانس ارتعاشی مخزن و ممانعت از شکل گیری اسلاشینگ دورانی، از تشدید نوسانات جلوگیری نموده و منجر به کاهش برش پایه و لنگر واژگونی می شوند.

واژه های کلیدی: اسلاشینگ، مخزن بتنی، بافل، برش پایه، جزء حجم سیال، روش شیئی عمومی متحرک.

1. مقدمه

تحت تحریک نیروهای خارجی در یک مخزن ذخیره مایعات، نوسانات سطح سیال مشاهده می شود. دامنه این ارتعاشات که در اصطلاح فنی به اسلاشینگ معروف است، در حالت عمومی به مشخصات تحریک بیرونی، تراز و مشخصات فیزیکی سیال داخل مخزن و همچنین به هندسیه مخزن بستگی دارد. بایستی توجه نمود که نحوه حرکت ذرات سیال سطحی، متأثر از حرکت کل توده سیال در داخل مخزن می باشد. دو عامل مهم در طراحی چنین مخازنی، حفظ پایداری کلی مخزن و همچنین مقاومت آن در برابر نیروهای وارده، مد نظر قرار می گیرد.

پدیده اسلاشینگ در کاربردهای عملی زیادی رخ می دهد که از آن جمله می توان به رفتار سیال ذخیره شده در مخزن کشتی های حمل سوخت، ارتعاشات سیال در مخزن ذخیره سوخت فضا پیما یا موشک و همچنین رفتار ارتعاشی مخازن بزرگ ذخیره مایعات تحت تحریک زلزله اشاره نمود. در صورتیکه فرکانس تحریک اعمالی از طرف عامل خارجی نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم باشد، بواسطه وقوع پدیده تشدید، بارهای شدیدی



به سازه مخزن اعمال خواهد شد. وقوع این پدیده در بسیاری موارد عامل اصلی ناپایداری عمومی و همچنین تخریب سازه ای مخازن بوده است. فعالیت های گسترده ای در کشورهای با لرزه خیزی بالا برای شناخت رفتار لرزه ای مخازن و تلاش برای کاهش خسارات سازه ای ناشی از پدیده اسلاشینگ صورت گرفته است. در این تحقیقات که به منظور ارزیابی ایمنی لرزه ای مخازن ذخیره مایعات صورت گرفته، هدف اولیه تعیین نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از اسلاشینگ وارد بر جداره داخلی مخازن با روش های آزمایشگاهی و حل تحلیلی معادلات حاکم بوده است. نیروهای هیدرودینامیکی مزبور تاثیر قابل توجهی بر میزان برش پایه و لنگرهای واژگونی مخازن داشته و در اثر این نیروها، مکانیزم های خرابی متعددی رخ می دهد.

به منظور کاهش خسارات ناشی از پدیده اسلاشینگ در مخازن، روش های کنترلی مختلف توسط طراحان مخازن ارائه شده است. روش سنتی در مخازن بتی مستطیلی شکل، استفاده از صفحات جداگر برای تقسیم مخزن به بخش های مختلف می باشد. در این روش تاثیر پارامترهای مختلفی نظیر ابعاد و محل قرار گیری صفحات بر عملکرد آنها بایستی مورد بررسی قرار گیرد. (Choun and Yun (1996 به بررسی تاثیر سازه های شناور بر کنترل پدیده اسلاشینگ در مخازن پرداخته است. بر اساس نتایج محققین مزبور، استفاده از سازه های شناور منجر به کاهش ارتفاع موج، نیروی برش پایه و همچنین فشارهای هیدرودینامیکی وارد بر جداره های مخزن می شود. در مقابل، استفاده از این سیستم باعث افزایش میزان لنگر واژگونی مخزن شده است. (Cho and Lee (2003 تاثیر استفاده از صفحات شکل پذیر بر کنترل پدیده اسلاشینگ در مخازن استوانه ای را مطالعه کردند. Cho et al., (2005) با استفاده از مدل سازی دو بعدی کنترل پدیده تشدید در مخازن را با استفاده از صفحات افقی مطالعه کردند. بر اساس نتایج تحقیق مزبور، استفاده از صفحات افقی تاثیر استهلاکی بسیار زیادی در مخازن دارد. اغلب مطالعات صورت گرفته قبلی، بصورت دو بعدی بوده و تاثیر لزجت و همچنین آشفتنگی جریان کمتر مورد نظر قرار گرفته است. در این تحقیق، رفتار لرزه ای مخازن بتنی ذخیره آب تحت تحریک هارمونیک و همچنین زلزله های واقعی بصورت سه بعدی کامل مدل سازی عددی شده و تاثیر استفاده از بافل های داخل مخازن به عنوان یک ابزار کنترلی غیر فعال در ارتعاش سیال و همچنین نیروها و لنگرهای ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفته است.

2. مبانی تئوریک

2.1. معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان های غیر دائمی سیالات از جمله پدیده اسلاشینگ، همان معادلات ناویر استوکس هستند که براساس قانون بقاء جرم (معادله پیوستگی) و مومنتم (قانون دوم نیوتن) با متغیرهای شناخته شده که تراز سطح آب از سطح مبنا فرضی و اجزاء سرعت می باشند، پایه گذاری می شوند. این به صورت زیر تعریف می شوند:



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

(1)

رابطه 1 فرم معادله پیوستگی بوده و برای همه انواع جریان سیال، اعم از غیر ماندگار، آشفته و تراکم پذیر کاربرد دارد. قابل ذکر است که در رابطه 1، ρ چگالی، u مولفه سرعت در جهت x ، v مولفه سرعت در جهت y و w مولفه سرعت در جهت z می باشند. معادله حاکم بر حرکت بصورت معادلات سه بعدی ناویر استوکس می باشد (معادله 2).

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \bar{X} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \overline{u'u'} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'} \right]$$

(2)

در معادله فوق سه جمله در سمت راست تساوی، $-\rho(\overline{u'u'})$ ، $-\rho(\overline{u'v'})$ ، $-\rho(\overline{u'w'})$ به عنوان تنش های رینولدز شناخته می شوند. این جملات اضافی از متوسط گیری زمانی برای جریان آشفته به دست آمده اند. معادلات فوق موسوم به رینولدز (RANS) بوده و از آنجایی که جریان در درون مخزن همواره آشفته است، بنابراین برای حل جریان آشفته و محاسبه انتقال آشفتگی در حوزه محاسباتی بایستی از یک مدل مناسب استفاده شود. در کاربردهای مهندسی اغلب از مدل های دو معادله ای استفاده می شود که معروف ترین این مدلها، مدل $k-\epsilon$ می باشد. مدل RNG از معادلاتی شبیه معادلات مدل $k-\epsilon$ استفاده می کند. اما ثوابتی که به طور تجربی در مدل های $k-\epsilon$ استاندارد به دست آمده است، در مدل RNG به طور صریح استحصال می شود. به طور کلی مدل RNG کاربرد وسیعی نسبت به مدل $k-\epsilon$ دارد. در این مطالعه از مدل RNG $k-\epsilon$ برای بستن معادلات و مدل سازی تنش های رینولدزی استفاده شده است.

2.2. روش جزء حجم سیال

با توجه به اینکه پدیده اسلاشینگ بصورت تغییرات سطح آزاد سیال رخ می دهد لذا سطح آزاد در هر گام زمانی بایستی به طریقی تعیین شود. در این تحقیق از جز \square حجم سیال (هیرت و نیکولز، 1981) برای بدست آوردن سطح آزاد استفاده شده است. روش جز \square حجم سیال می تواند سطح آزاد را ردگیری کرده و شرایط مرزی مناسب را در آن سطوح اعمال کند. برای این جریان آب و هوا پارامتر F بیانگر کسر حجمی آب (سیال غیرقابل تراکم)، و ناحیه متمم آن با کسر حجمی $1-F$ معرف هوا (سیال تراکم پذیر) می باشد. معادلات حجم سیال در یک حجم واحد برابر است با:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \frac{\partial}{\partial t} (FA_i u_i) = F_{DIF} \quad (3)$$

که در آن:

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{c_{f\mu}}{\rho} A_i \frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

که V_F نسبت کسر حجمی فضای باز برای عبور جریان، ρ دانسیته سیال، u_i ($i=1,2,3$) مولفه های سرعت در جهت های x, y, z هستند.

A_i برابر سطح عبوری جریان در جهت های x, y, z در هر المان می باشند. در معادله فوق، c_f یک مقدار ثابت بوده و عکس آن برابر عدد اشمیت آشفتنگی می باشد.

2.3. روش شیئی عمومی متحرک

یک جسم عام متحرک، جسم صلب تحت هر نوع حرکت فیزیکی دلخواه می باشد به نحوی که حرکت مزبور یا با میدان جریان همبسته بوده و یا از پیش تعیین شده می باشد. جسم می تواند 6 درجه آزادی داشته و یا حول یک نقطه یا یک محور مشخص بچرخد. در این روش یک سیستم مختصات جسم مبنا تحت عنوان "سیستم مختصات جسم" برای هر جسم متحرک در نظر گرفته شده و یک سیستم مختصات فضا مبنا تحت عنوان "سیستم مختصات فضا" در نظر گرفته می شود. در هر گام زمانی، نیروهای هیدرولیکی و لنگرهای ناشی از فشار و تنش برشی محاسبه شده و معادلات حرکت برای اجسام متحرک تحت حرکت همبسته با در نظر گرفتن نیروهای هیدرولیکی، ثقل و نیروهای کنترلی و لنگرها حل می شوند. یک سیستم مختصات جسم برای هر جسم متحرک بصورت (x', y', z') در نظر گرفته می شود به نحوی که محورها های هر جسم در لحظه $t=0$ بموازات محورها های متناظر فضایی (x, y, z) می باشد. مبدا سیستم مختصات جسم در مرکز ثقل آن (G) قرار داده شده و تبدیل مختصات بین سیستم مختصات فضایی و سیستم مختصات جسم بصورت زیر انجام می شود:

$$X_s = [R] \cdot X_b + X_G \quad (5)$$

که در آن X_b و X_s بردار موقعیت جسم به ترتیب نسبت به سیستم های مختصات جسم و فضا می باشند. X_G بردار موقعیت مرکز ثقل در سیستم مختصات فضایی می باشد. $[R]$ تانسور تبدیل مختصات متعامد بوده و با حل معادله دیفرانسیل زیر قابل تعیین است:

$$\frac{d[R]}{dt} = [\Omega][R] \quad (6)$$

در رابطه فوق $[\Omega]$ تانسور سرعت های چرخشی جسم در مختصات فضا بوده و بصورت زیر تعریف می

شود:

$$[\Omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & \Omega_x \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.4. روابط عمومی اسلاشینگ در مخازن مستطیلی

روش سنتی مطالعه این پدیده استفاده از تئوری امواج کوتاه بوده و شکل سطح سیال، بصورت یک صفحه صاف در نظر گرفته می شود. مدل ساده خطی ارائه شده توسط هاسنر 1957 (مدل جرم و فنر) بواسطه سادگی، بطور گسترده در استانداردهای طراحی مخازن رو زمینی مایعات نظیر API-STD-650-98 و AWWAD100-5 استفاده شده است. سو همکاران در سال 1982، با استفاده از تئوری امواج خطی، مودهای ارتعاشی طبیعی یک مخزن مستطیلی را به صورت رابطه زیر ارائه نمودند. در این رابطه، L و d به ترتیب بیانگر طول مخزن و عمق آب اولیه می باشد [4].

$$\omega_m = \sqrt{\pi g \frac{m}{L} \tanh\left(\pi \frac{m}{L} d\right)} \quad (8)$$

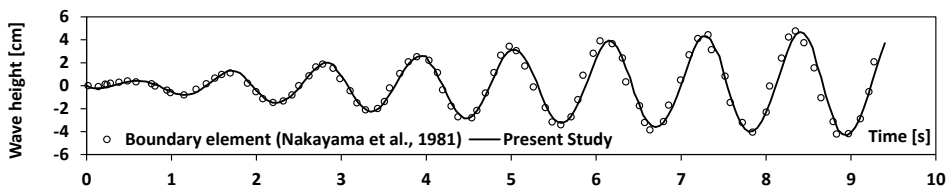
این تئوری با وجود سادگی، محدودیت های زیادی داشته بطوریکه پیش بینی مقدار بالاروی آب، کمتر از مقدار واقعی آن می تواند منجر به اعمال نیروی ضربه ای شدید به سقف مخزن شده و خرابی مخزن را به بار آورد. به همین علت در این تحقیق بدون اعمال هیچ محدودیت و ساده سازی، رفتار واقعی ارتعاش غیر خطی مخزن بررسی شده است.

3. مدل سازی عددی

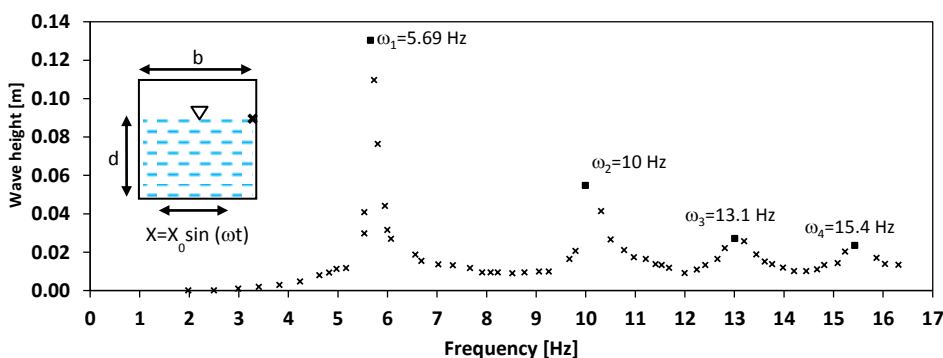
برای حل عددی معادلات و شبیه سازی پدیده مورد نظر از نرم افزار FLOW3D استفاده شده است. در این نرم افزار، معادله های حاکم بر حرکت سیال با استفاده از تقریب احجام محدود حل می شود. مدل مخزن مربع ساخته شده در این تحقیق درازی طول 0/9 متر، عرض 0/9 متر بوده و عمق اولیه آب در آن 0/6 متر می باشد. شبکه بندی به نحوی انتخاب شد که ضمن شناخت هندسه میدان، در بخش هایی از مدل (در محدوده وجود سیال) برای پیش بینی دقیق تر میدان از شبکه بندی ریز تر استفاده شده است. تعداد خط شبکه در راستای طولی، عرضی و عمقی به ترتیب برابر 100، 50 و 70 می باشد. مدت زمان شبیه سازی هر مدل در کامپیوتر 8 هسته ای 6 ساعت می باشد.

بارگذاری مخزن بصورت تحریک هارمونیک در امتداد محور X با دامنه 0/002 متر بوده و برای بررسی پارامتریک، فرکانس های مختلف استفاده شده است. طبق رابطه 8، پائین ترین فرکانس طبیعی سیستم 5/76 هرتز می باشد. در شکل 3 نوسانات سطح آب ایجاد شده در دیواره سمت راست مخزن برای فرکانس تحریک 5/5 هرتز با نتایج مدل المان مرزی Nakayama et al., 1981 مقایسه شده است. با توجه به شکل مزبور همخوانی نتایج مدل با داده های مزبور بسیار مناسب می باشد. مدل برای دامنه ثابت 0/002 و 63 فرکانس تحریک مختلف هر کدام برای مدت 50 ثانیه اجرا شده و حداکثر ارتفاع موج حاصله در دیواره سمت راست در مقابل فرکانس تحریک به عنوان پاسخ فرکانسی مجموعه، طبق شکل 4 رسم شده است. با توجه به شکل مزبور فرکانس هایی که در آنها حداکثر میزان بالاروی آب بدست آمده است معادل با شرایط تشدید سیستم بوده و با استفاده از شکل مزبور می توان فرکانس های طبیعی مخزن بتنی مورد نظر را مشاهده نمود. مقادیر فرکانسهای قید شده بر روی

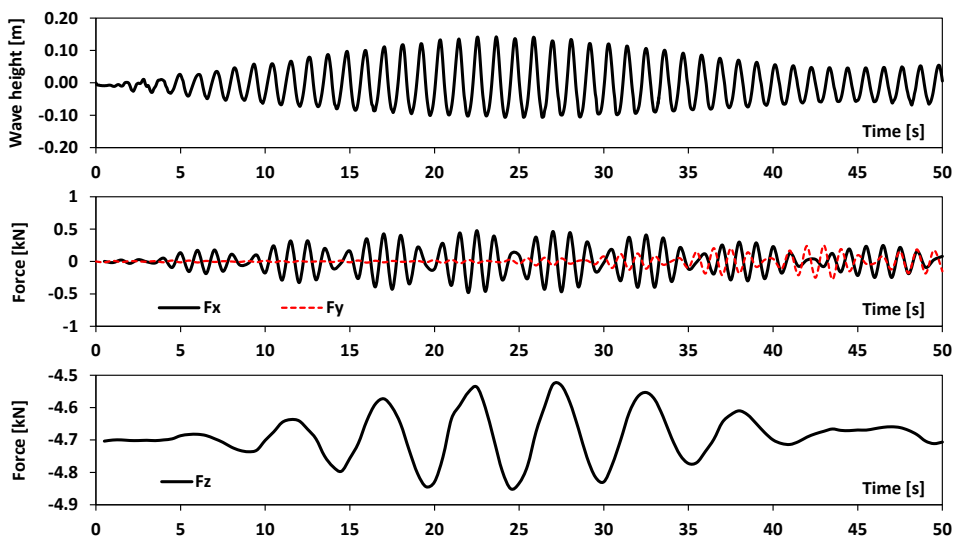
شکل 4 همخوانی بسیار خوبی با مقادیر فرکانس های طبیعی حاصل از رابطه 8 دارند. بیشترین میزان بالاروی سطح آب 13 سانتیمتر بوده است. در شکل (5) تغییرات زمانی ارتفاع موج بر روی دیواره، نیروهای افقی وارد بر دیواره های مخزن و همچنین نیروی وارد بر کف و لنگر واژگونی حول محور Y برای تحریک با فرکانس طبیعی سیستم نشان داده شده است.

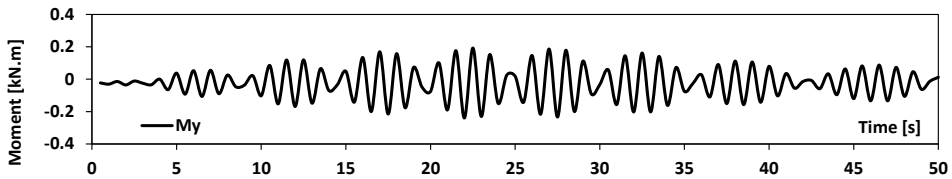


شکل 3- صحت سنجی نتایج مدل عددی برای فرکانس تحریک 5/5 هرتز و عمق 0/6 متر.



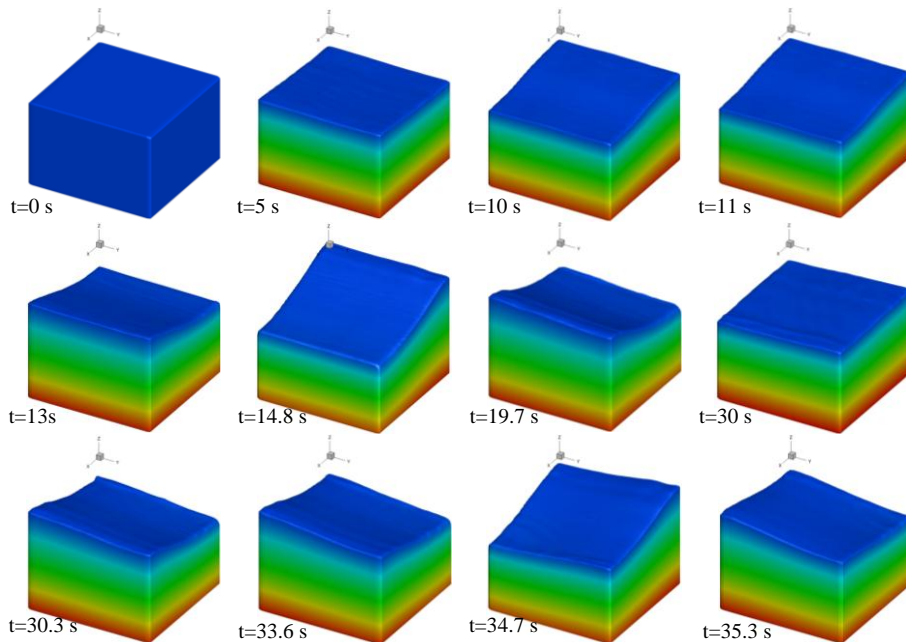
شکل 4- پاسخ فرکانسی سیال در مخزن بتنی مورد نظر با عمق 0/6 متر.

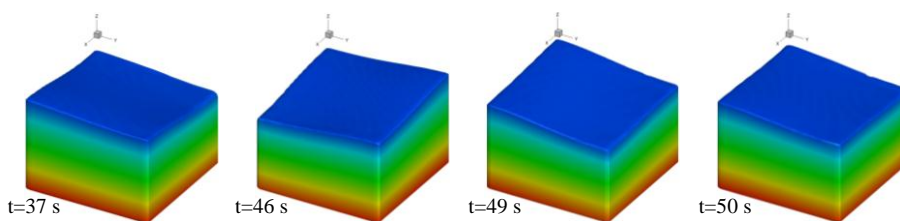




شکل 5- رفتار ارتعاشی سیال در مخزن بتنی مورد نظر به ازای فرکانس 5/76 هرتز.

با توجه به شکل (5) روند تغییرات زمانی سطح آب نشانگر وقوع پدیده تشدید می باشد که تا لحظه 25 ثانیه ارتفاع موج در دیواره با زمان افزایش می یابد. پس از زمان مزبور ارتفاع موج به تدریج کاهش یافته و این روند تقریباً تا انتهای مدلسازی ادامه می یابد. برای بررسی علت وقوع چنین روندی در تغییرات سطح آب و به منظور تحلیل بهتر بقیه منحنی های شکل (5)، تغییرات سه بعدی سطح سیال و همچنین توزیع فشار در زمانهای مختلف به صورت سه بعدی در شکل (6) نمایش داده شده است. تصاویر نشان داده شده در این شکل گویای تغییر در وضعیت نوسانی مخزن پس از زمان 30 ثانیه می باشد به نحوی که به تدریج راستای ارتعاش به محور Y منتقل شده است و به عبارت دیگر، با وجود اعمال تحریک در راستای X ، سیال داخل مخزن چرخیده و ارتعاش یک سویه ندارد. در شکل (10) مقایسه روند تغییرات نیروهای طولی و عرضی نیز مویید این پدیده می باشند. تا لحظه 25 ثانیه نیروی عرضی صفر بوده و پس از آن بواسطه انتقال نوسانات به این راستا، مقدار F_y مخالف صفر شده و حتی در برخی لحظات بزرگتر از مقدار F_x می شود. نیروی قائم وارد بر کف مخزن و لنگر حول محور Y نیز ثابت نمی باشد.

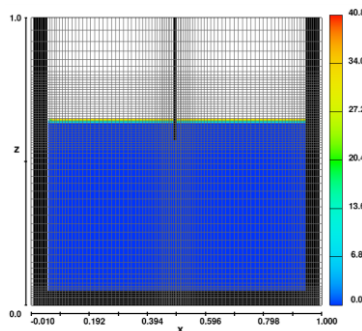
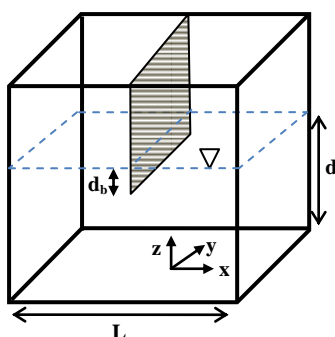




شکل 6- تغییرات سطح سیال و توزیع فشار در مخزن بتنی مورد نظر به ازای فرکانس 5/76 هرتز. پدیده رخ داده در این حالت، در مراجع علمی تحت عنوان اسلاشینگ چرخشی شناخته می شود و علت وقوع آن ترکیب موده‌های انتقالی و دورانی و شکل گیری امواجی تحت عنوان Swirling wave می باشد.

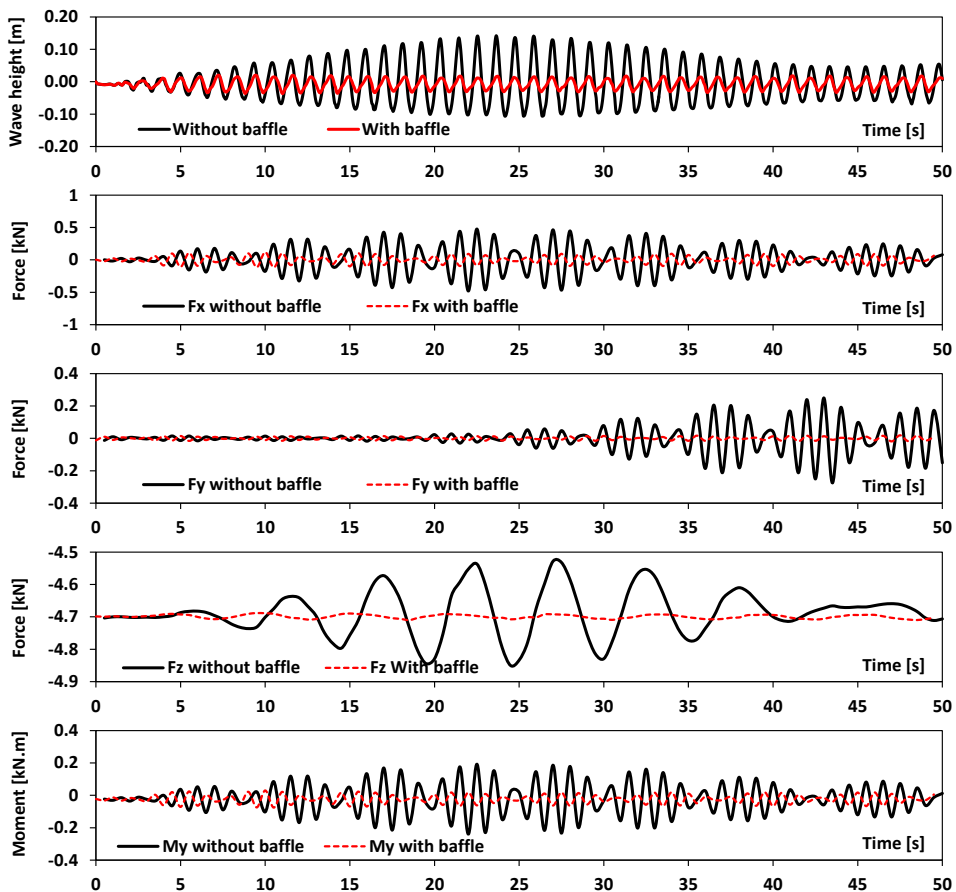
4. کنترل اسلاشینگ دورانی

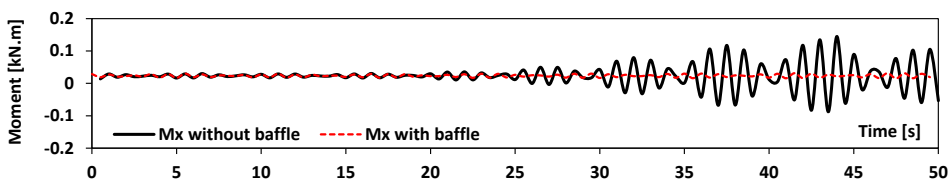
با توجه به نتایج ارائه شده در بخش قبل، نوسانات سطح آب در مخزن شدید بوده و علاوه بر آن شکل گیری اسلاشینگ دورانی، بر پیچیدگی رفتار ارتعاشی سیال داخل مخزن افزوده است. برای کنترل این پدیده، تاثیر استفاده از یک صفحه قائم بر سطح آب به صورت شکل (7) مورد بررسی قرار می گیرد. در تحقیقات قبلی انجام شده بر روی کنترل اسلاشینگ، از صفحات افقی و قائم عمود بر کف و دیواره های مخزن استفاده شده است که از آن جمله می توان به کار Cho and Lee, 2003 اشاره نمود. ایده اصلی استفاده صفحه عمود بر سطح، الگوبرداری از صفحات ضدگرداب در سازه های هیدرولیکی نظیر آبگیر سدها و تیغه های روی سرریزهای نیلوفری می باشد. تیغه به اندازه d_b پائین تر از سطح آب اولیه قرار می گیرد که در این تحقیق مقدار آن برابر $7/5$ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.



شکل 7- نحوه قرار گیری تیغه کنترلی اسلاشینگ دورانی به همراه شبکه بندی محاسباتی مورد استفاده. مخزن مجهز به تیغه قائم تحت تحریک هارمونیک مشابه با حالت بدون تیغه قرار گرفته و مطابق شکل (8)، پاسخ دینامیکی آن بصورت نوسانات سطح آب، نیروهای وارد بر جداره مخزن و همچنین لنگر واژگونی حول محور y در دو حالت با هم مقایسه شده است. با توجه به تغییرات ارتفاع موج، استفاده از تیغه علاوه بر کنترل

تشدید، به اندازه 78٪ از میزان بالاروی سطح آب کاسته است به نحوی که در حالت اول حداکثر ارتفاع موج معادل 0/14 متر بوده ولی در حالت کنترل شده، به 3 سانتیمتر تقلیل یافته است. علاوه بر آن الگوی تغییرات سطح آب به خوبی نشانگر این نکته است که تیغه مانع از دوران سیال داخل مخزن شده است. کنترل تلاطم سیال در این حالت منجر به کاهش شدید مقادیر حدی و همچنین میزان نوسانات نیروهای افقی وارد بر دیواره های مخزن شده است. تفاوت در روند تغییرات زمانی نیروی وارد بر دیواره های مخزن در راستای y در دو حالت کنترل نشده و وجود تیغه کنترلی، موید کنترل اسلاشینگ دورانی توسط تیغه کنترلی می باشد. در حالت کنترل نشده شکل گیری امواج با ارتفاع بلند در مخزن باعث می شود تا توده سیال علاوه بر نیروی ثقل، در لحظات مختلف دو نیروی قائم متفاوت تجربه کنند. این نیروها عبارتند از نیروی اینرسی قائم بواسطه تغییرات زمانی مولفه قائم سرعت و همچنین شار اندازه حرکت عبوری از سطح سیال بواسطه تلاطم شدید در سطح آب. شکل گیری این نیروها باعث می شود تا در حالت کنترل نشده، نیروی وارد بر کف مخزن نسبت به نیروی وزن سیال اختلاف پیدا کرده و باعث اعمال بار دینامیکی به کف مخزن شود.





شکل 8- مقایسه رفتار ارتعاشی سیال در مخزن بتنی در دو حالت کنترل نشده و با تیغه کنترلی به ازای فرکانس 5/76 هر تیز.

مقایسه تغییرات زمانی لنگرهای واژگونی حول محورهای افقی نیز نشان می دهد که استفاده از تیغه ضمن کاهش شدید مقدار لنگر حول محور Y ، از شدت تغییرات زمانی آن نیز کاسته است. مقایسه لنگر حول محور X در دو حالت نشان می دهد در صورت عدم کنترل اسلاشینگ، با وجود اعمال تحریک در راستای X ، ماکزیمم لنگر وارده بر مخزن حول این محور می تواند تا 70٪ لنگر حول محور Y برسد. این در حالیست که استفاده از تیغه کنترلی بواسطه جلوگیری از شکل گیری اسلاشینگ دورانی، ضمن کاهش شدید لنگر M_y ، تقریباً مانع از کل گیری لنگر واژگونی M_x شده است.

5. خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل عددی سه بعدی و به روش شیئی عمومی متحرک، پدیده اسلاشینگ دورانی در مخازن بتنی مستطیلی ذخیره آب شبیه سازی شده و برای کنترل این پدیده و نیروها و لنگرهای حاصل از آن، مشابه با صفحات ضد گرداب، برای اولین بار از تیغه کنترلی عمود بر سطح آب به عنوان یک ابزار کنترلی غیر فعال استفاده شد. نتایج مدلسازی های صورت گرفته نشان داد که برای بحرانی ترین حالت بار گذاری (حالت تشدید)، تیغه کنترلی ضمن استهلاک نوسانات سطح آب، منجر به کاهش حداکثر ارتفاع موج، نیروی افقی، نیروی عرضی، نیروی کف، لنگر M_y و لنگر M_x به ترتیب به میزان 78٪، 75٪، 93٪، 3/3٪، 68٪ و 96٪ می شود.

6. مراجع

- [1] Cho, J.R., Lee, S.Y. Dynamic analysis of baffled fuel-storage tanks using the ALE finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* **41**, 185–208, 2003.
- [2] Cho, J.R., Lee, H.W., Ha, S.Y. Finite element analysis of resonant sloshing response in 2D baffled tank. *Journal of Sound and Vibration* **288**, 829–845, 2005.
- [3] Choun, Youn-Sun, Yun, Chung-Bang. Sloshing characteristics in rectangular tanks with a submerged block. *Computers and Structures* **61** (3), 401–413, 1996.
- [4] Ibrahim, R. *Liquid Sloshing Dynamics Theory and Application*. Cambridge University Press, 2005,



- [5] Nakayama, T, Washizu K. The boundary element method applied to the analysis of two-dimensional nonlinear sloshing problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **17**, 1631–1646, 1981.