



بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی میراگرهای مایع تنظیمی با استفاده از روش SPH

امین کرم‌نسب^۱، محمدرضا چمنی^۲، امیر مهدی حلییان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استادیار مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

a.karamnasab18@gmail.com

خلاصه

ساختمان‌های مرتفع را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که سبک‌تر، انعطاف‌پذیرتر و نیز مقاوم در برابر نیروهای همچون باد، امواج دریا و زلزله باشند. یکی از روش‌های موجود برای کنترل ارتعاشات چنین سیستم‌هایی استفاده از میراگر مایع تنظیمی (TLD) است. اساس کار سیستم‌های TLD به توسعه موج‌های ضربه‌ای روی سطح آزاد مایع که در نهایت به استهلاك انرژی دینامیکی القا شده منجر می‌شود، استوار است. این گونه سیستم‌ها به دلیل هزینه کم و نصب آسان برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در مقاله‌ی حاضر به بررسی عملکرد این میراگر تحت فرکانس‌های مختلف ارتعاشی با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) پرداخته شده است. روش SPH از جمله روش‌های عددی بدون شبکه‌بندی (Mesh-free) است که قابلیت بسیاری در تحلیل جریان سیال به خصوص مدل‌سازی شکست امواج دارد. مقادیر مربوط به نیروی برشی کف مخزن و نیز ارتفاع موج در دیواره‌های کناری به کمک روش SPH پیش‌بینی شده و با نتایج آزمایشگاهی و عددی مقایسه گردیده است.

کلمات کلیدی: میراگر مایع تنظیمی، روش SPH، موج

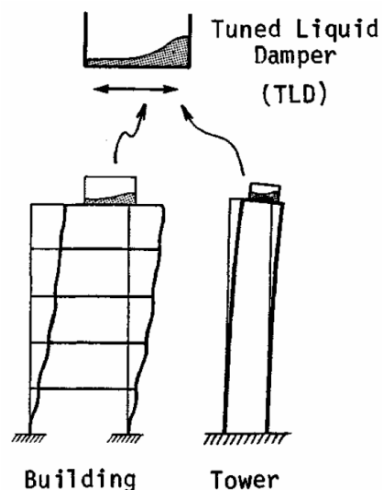
۱. مقدمه

بر اساس نیازهای موجود در عرصه‌ی ساختمان‌سازی در دهه‌های اخیر، مبحث جدیدی تحت عنوان کنترل لرزه‌ای سازه‌ها مطرح شده است. روش‌های زیادی برای کنترل ارتعاشات سازه‌های بلندمرتبه‌ای که تحت تأثیر حرکت لرزه‌ای زمین و یا اثر تندبادها قرار دارند، وجود دارد. به همین منظور از جاذب‌های انرژی^۱ (میراگر) به منظور کاستن از پاسخ دینامیکی سازه در برابر بارگذاری باد و زلزله استفاده می‌شود. مکانیزم عملکردی این وسایل به گونه‌ای است که با انجام تغییر شکل‌های ویژه و اعمال مکانیکی خاص، مقدار زیادی از انرژی ورودی به سازه بر اثر بارگذاری دینامیکی را جذب و مستهلک می‌سازند. عملکرد این وسایل موجب می‌گردد که انرژی دریافتی سایر اعضای سازه کاهش یافته و در نتیجه تغییر شکل زیادی در آنها ایجاد نشود. در نتیجه، از نقطه نظر دینامیکی مفاهیم جدیدی در ارتباط با سیستم‌های حفاظت از سازه‌ها مطرح شده‌اند. این سیستم‌ها به سه بخش زیر تقسیم می‌شوند:

- ✓ جداسازی لرزه‌ای: تکیه‌گاه‌های الاستومتری، تکیه‌گاه‌های لاستیکی سربی و پاندول اصطکاکی لغزشی
 - ✓ اتلاف انرژی منفعل: میراگرهای فلزی، میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای ویسکوالاستیک، میراگرهای سیالی لزج، میراگرهای جرمی تنظیم شده و میراگرهای مایع تنظیم شده
 - ✓ کنترل فعال و نیمه فعال: سیستم‌های مهاربندی فعال، میراگرهای جرمی فعال و سیستم‌های میرایی و سختی متغیر
- یکی از روش‌های یاد شده برای کنترل غیرفعال یا منفعل ارتعاشات سازه‌ها، که در آن از نوسانات و تلاطم آب در یک مخزن برای کنترل

^۱ Energy absorber

ارتعاشات سازه استفاده می‌شود، سیستم میراگر مایع تنظیم شده^۱ (TLD) است. نحوه‌ی کار میراگر بدین ترتیب است که تعدادی مخزن در قسمت بالای سازه نصب شده و تلاطم مایع درون این مخازن انرژی ارتعاشی وارده به سازه را در هنگام زلزله یا تند باد، مستهلک می‌کند. نیروی کنترلی که در این روش برای کاهش ارتعاشات سازه استفاده می‌شود از فشار دینامیکی‌ای که روی سطح جداره‌های انتهایی ظرف اثر می‌کند، تولید می‌شود. تلاطم مایع موجب ایجاد تفاوت در رقوم سطح آزاد مایع در جداره‌های انتهایی مخزن می‌شود و اختلاف فشار ناشی از تفاوت رقوم سطح آزاد مایع در جداره‌های انتهایی به صورت یک نیروی برشی در کف مخزن ظاهر می‌گردد. میراگر مایع تنظیم شده و محل قرارگیری آن در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک
کارگزاری میراگر مایع
تنظیم شده روی ساختمان
و برج

در اوایل قرن بیستم از این سیستم برای کنترل ارتعاشات ناشی از امواج دریا در کشتی‌های اقیانوس‌پیما استفاده شد. این سیستم در نیمه‌ی دوم قرن بیستم برای کنترل نوسانات و جنبش‌های آزاد با دوره‌ی تناوب بالا در ماهواره‌ها به کار رفت. از اواسط دهه‌ی ۱۹۸۰، میراگر مایع تنظیم شده برای کنترل ارتعاشات سازه‌های مهندسی عمران به کار گرفته شد. سیستم‌های TLD باید بر اساس فرکانس مد اول سازه تنظیم شوند، یعنی فرکانس نوسان‌های آب در داخل ظرف باید نزدیک فرکانس طبیعی مد اول سازه باشد. بنابراین، مشخصات میراگر نظیر ابعاد ظرف و عمق آب داخل آن باید به گونه‌ای تنظیم شوند که فرکانس تلاطم مایع درون میراگر با فرکانس ارتعاش سازه هماهنگ شود. به عنوان مثالی از عملکرد و میزان تاثیر این میراگرها در کنترل و کاهش ارتعاشات سازه‌ای، حداکثر شتاب پاسخ برج دریایی یوکوهاما تحت اثر باد برابر با 0.27 m/s^2 و ضریب میرایی آن 0.06% بود. پس از استفاده از TLD به عنوان یک روش کنترل ارتعاشات سازه، حداکثر شتاب پاسخ سازه به 0.10 m/s^2 یا کمتر رسید و ضریب میرایی سازه به $4/5\%$ افزایش یافت [۱].

میراگرهای مایع تنظیمی برای اولین بار در اواخر قرن نوزدهم میلادی مطرح شدند. اولین استفاده از آنها در صنعت کشتی‌سازی بود [۲]. با قرار دادن منبع آب در یک سازه‌ی دریایی، می‌توان پاسخ سازه دریایی به ارتعاشات ناشی از باد را کم کرد. گه و همکاران^۲ (۱۹۹۴) در آزمایش‌های دینامیکی با استفاده از تحریک باد و زلزله، نتایج به‌دست آمده در تأثیر مثبت میراگرهای مایع تنظیمی در کاهش پاسخ را تأیید کردند [۳]. کانکو و آیشیکوا^۳ (۱۹۹۹) با استفاده از روش تحلیلی، به بررسی تلاطم جریان در TLD پرداختند [۴]. لی و همکاران^۴ (۲۰۰۲) مطالعات بیشتری را روی اثرات تغییرات میرایی، ارتفاع آب، فرکانس و جرم میراگرهای تنظیمی بر سازه‌های دریایی انجام دادند [۵]. تایت و همکاران^۵ (۲۰۰۵) با استفاده از روش تفاضل محدود به بررسی اثر صفحات مشبک بر میرایی سازه در TLD پرداختند. آنها با به‌دست آوردن ضرایب نیروی دراگ (به دلیل عبور

^۱ Tuned Liquid Damper

^۲ Koh et al.

^۳ Kaneko and Ishikawa

^۴ Li et al.

^۵ Tait et al.

جریان از منافذ صفحات مشبک) با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی، میرایی سازه را بررسی کردند [۶]. چن و همکاران^۱ (۲۰۰۷) به مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی میراگر مایع تنظیمی پرداختند. آنها TLD را تحت تحریک‌هایی با دامنه‌ی کم قرار داده و در فرکانس‌های مختلف به بررسی تغییرات ارتفاع موج و نیروی کف مخزن در یک بازه‌ی زمانی پرداختند [۷]. مریوانی و حامد^۲ (۲۰۰۹) نیز با استفاده از روش تفاضل محدود بدون درنظر گرفتن فرضیات خطی‌سازی، به بررسی تلاطم جریان در TLD با درنظر گرفتن جریان غیرخطی پرداختند [۸].

در این تحقیق سعی شده است که ابتدا یک مخزن مستطیلی به عنوان TLD با استفاده از روش SPH مدل‌سازی شود. سپس تحت فرکانس‌های مختلف ارتعاشی، نیروی اینرسی ایجاد شده در مخزن را به‌دست آورده و با نتایج حاصل از روش المان‌های مرزی که توسط چن و همکاران (۲۰۰۷) انجام شده است، مقایسه می‌گردد.

۲. تئوری روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

روش SPH از روش‌های عددی بدون شبکه (mesh-free) است که در مدل‌سازی جریان سیال استفاده می‌شود. روشی برای حل معادلات دینامیکی سیال به‌وسیله‌ی جایگزینی سیال با مجموعه‌ای از ذرات است. در واقع به کمک این روش معادلاتی همچون ناویر-استوکس گسسته‌سازی می‌شوند. در این روش ذرات سیال دارای فاصله مکانی از یکدیگر می‌باشند که در این فاصله متغیرهایی نظیر چگالی، سرعت و انرژی به کمک توابعی هموار می‌شوند [۹]. این توابع تابع کرنل درونیابی هستند. در این روش می‌توان یک تابع را به شکل انتگرالی زیر نوشت:

$$f(x) = \int_V f(x') \delta(x - x') dx' \quad (1)$$

که در آن $f(x)$ تابعی از x و $\delta(x - x')$ تابع دلتای دیراک و V ناحیه‌ای است که شامل متغیر x است. در روش SPH تابع دلتای دیراک با تابع هموار ساز $W(x - x', h)$ جایگزین می‌گردد. لذا می‌توان تابع کرنل را به صورت زیر نوشت:

$$\langle f(x) \rangle = \int_V f(x') W(x - x', h) dx' \quad (2)$$

که در آن W کرنل درونیابی است و h طول ناحیه‌ای است که در آن تابع هموار ساز عمل می‌کند. مشتق مکانی تابع نیز به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = \int_V \nabla \cdot f(x') W(x - x', h) dx' \quad (3)$$

و با جایگزینی dx' با ΔV_j جرم ذره j ام را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$m_j = \rho_j \Delta V_j \quad (4)$$

که در آن ρ_j چگالی ذره‌ی j ام است. با گسسته‌سازی فرم انتگرالی رابطه (۲) به شکل مجموع برای تمام ذراتی که در ناحیه تابع کرنل قرار گرفته‌اند، تقریب گسسته‌ی ذره به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x_i - x_j, h) \quad (5)$$

به‌طور مشابه، تقریب مشتق مکانی یک تابع نیز به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\langle \nabla \cdot f(x_i) \rangle = - \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot \nabla W(x_i - x_j, h) \quad (6)$$

تقریب‌های SPH که در روابط (۵) و (۶) ذکر شدند روی متغیرها و مشتقاتشان در معادلات لاگرانژی جریان سیال به کار برده می‌شوند. لذا، معادله پیوستگی و مومنتوم به شکل زیر نوشته می‌شوند:

^۱ Chen et al.

^۲ Marivani and Hamed



$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (7)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left[\frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} + \Pi_{ij} \right] \nabla_i W_{ij} + \vec{g} \quad (8)$$

که در آن‌ها $W_{ij} = W(r_{ij}, h)$ و بردار مکانی از ذره‌ی j به ذره‌ی i ام بوده و برابر $r_j - r_i$ است، p فشار ذره و Π_{ij} عبارت مرتبط با ویسکوزیته که به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha \overline{c_{ij}} h \overline{v_{ij}} \overline{r_{ij}}}{\overline{\rho_{ij}} (\overline{r_{ij}}^2 + \eta^2)} \overline{v_{ij}} \overline{r_{ij}} < 0 \\ 0 & \overline{v_{ij}} \overline{r_{ij}} > 0 \end{cases} ; \quad \left[c_{ij} = \frac{c_i + c_j}{2}, \eta^2 = 0.01 h^2 \right] \quad (9)$$

که در آن α پارامتری است که متناسب با شرایط مسئله تعیین می‌شود و C سرعت موج است. نکته‌ای که حایز اهمیت است آن است که در روش SPH معمولاً سرعت موج را تقریباً ۱۰ برابر سرعت ماکزیموم سیال ($\sqrt{gh}$) در نظر می‌گیرند [۱۰]. رابطه‌ی میان چگالی ذره و فشار سیال را توسط معادله‌ی حالت زیر به دست می‌آید:

$$p = p_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (10)$$

که در آن ρ_0 چگالی مرجع است و برای آب، $\gamma = 7$ انتخاب می‌گردد.

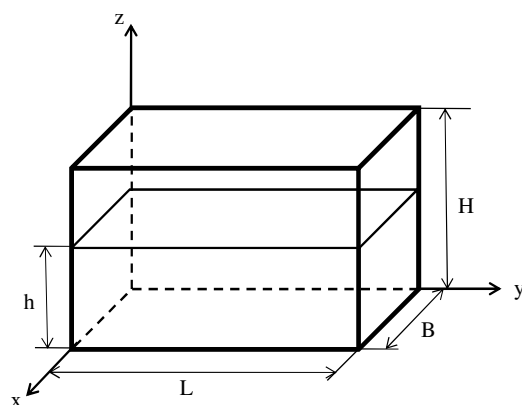
یکی از پارامترهای مهم در روش SPH تعریف شرایط مرزی است. معمولاً از دو روش برای این کار استفاده می‌شود. یکی استفاده از ذرات مرزی موسوم به ذرات مجازی^۱ است که در هر گام زمانی چنانچه ذرات سیال در فاصله مشخصی از مرز قرار گیرند، در طرف دیگر مرز ذراتی مجازی تولید می‌شوند. سرعت این ذرات مجازی، عمود بر مرز و جهت آنها عکس سرعت ذرات سیال است. مقدار فشار و جرم ذرات مجازی با ذرات سیال برابر است. روش دوم تحت عنوان مرز دفع‌کننده^۲ است. در این روش تعدادی ذره روی مرز قرار داده می‌شود. چنانچه ذرات سیال در محدوده‌ی شعاع تأثیر ذرات مرزی قرار گیرند، برای جلوگیری از خروج آنها از مرز، نیرویی در جهت مخالف حرکتشان از سوی ذرات مرزی به آنها اعمال می‌شود.

۳. مدل‌سازی TLD با استفاده از روش SPH

در این قسمت سعی شده است تا با مقایسه نتایج با نتایج تحقیقات چن و همکاران (۲۰۰۷) انجام شده است، صحت نتایج بررسی شود. مخزنی به صورت صلب و گیردار به زمین در نظر گرفته شده است. طول مخزن (L) برابر با ۰/۸ m، عرض آن (B) ۰/۱۴۱ m و ارتفاع مخزن (H) ۰/۲۰ m است که تا ارتفاع (h) برابر با ۰/۱۰ m از آب پر شده است. مشخصات فیزیکی مخزن مستطیلی در شکل (۲) نشان داده شده است. مخزن را تحت تحریکی هارمونیک به صورت $x_f = A \sin(\omega t)$ قرار می‌دهیم. مشخصات مربوط به هر تحریک در جدول (۱) آورده شده است.

^۱ Ghost particles

^۲ Repulsive boundary



شکل ۲- شکل شماتیک مخزن مستطیلی

جدول ۱- مشخصات مدل‌های شبیه‌سازی شده

شماره مدل	دامنه ارتعاشی (cm)	فرکانس ارتعاشی (rad/s)	مدت زمان مدل‌سازی (sec)	اندازه ذرات (mm)	تعداد ذرات سیال	تعداد ذرات مرزی
۱	۰/۰۴	۳/۷۹	۱۰	۴	۵۰۰۰	۳۰۰
۲	۰/۰۴	۵۰	۳	۴	۵۰۰۰	۳۰۰
۳	۰/۰۴	۳/۷۹	۱۵	۲	۲۰۰۰۰	۶۰۰

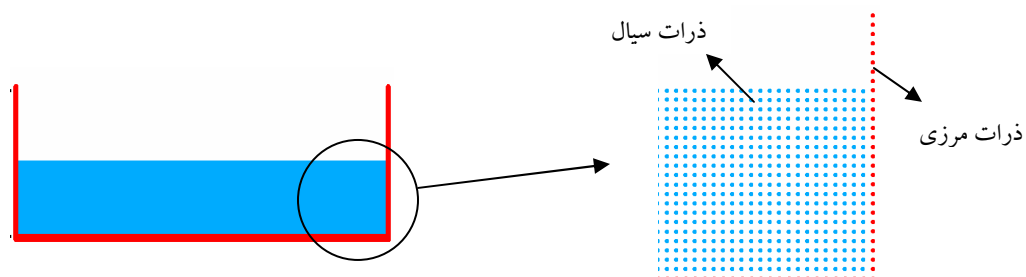
بر اساس تئوری امواج با دامنه‌ی کوتاه، فرکانس طبیعی سیال درون مخزن از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(2n+1)\pi g}{L} \cdot \tanh\left(\frac{(2n+1)\pi h}{L}\right)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

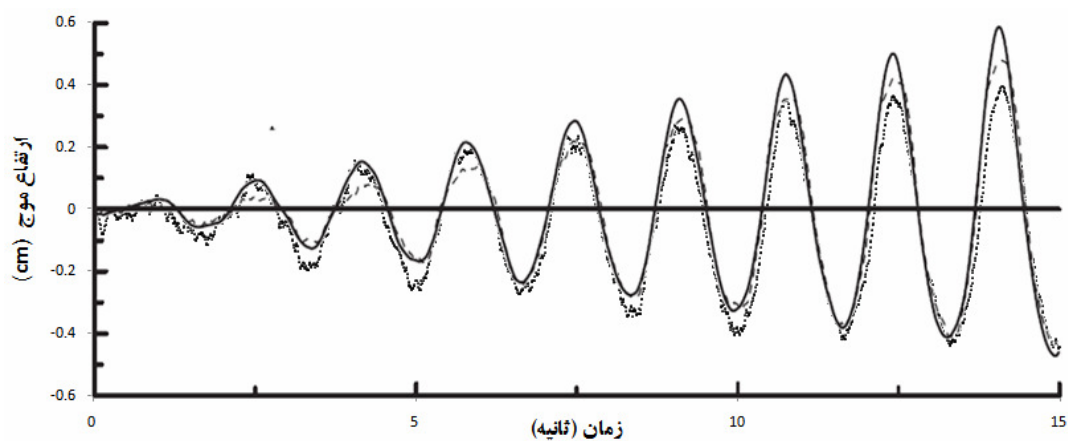
با جایگذاری مقادیر عمق سیال درون مخزن و نیز طول مخزن در رابطه (۱۱)، مقدار فرکانس طبیعی سیال برابر با ۳/۷۹ rad/s است.

همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد در روش SPH حجم سیال به تعدادی ذره تقسیم‌بندی می‌شود. در شکل (۳) چیدمان ابتدایی ذرات برای مثال بالا نشان داده شده است. هرچه تعداد ذرات بیشتر باشد نتایج شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. البته گاهی هم افزایش بیش از اندازه تعداد ذرات تأثیری بر نتیجه نخواهد داشت. لذا بهتر است برای یک مسئله خاص با تعداد ذرات متفاوت شبیه‌سازی را انجام داد. شایان ذکر است که ضریب α در عبارت ویسکوزیته برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در این تحقیق عمق آب ۰/۱۰ m است، سرعت موج حدوداً برابر با ۱۰ m/s به دست می‌آید.

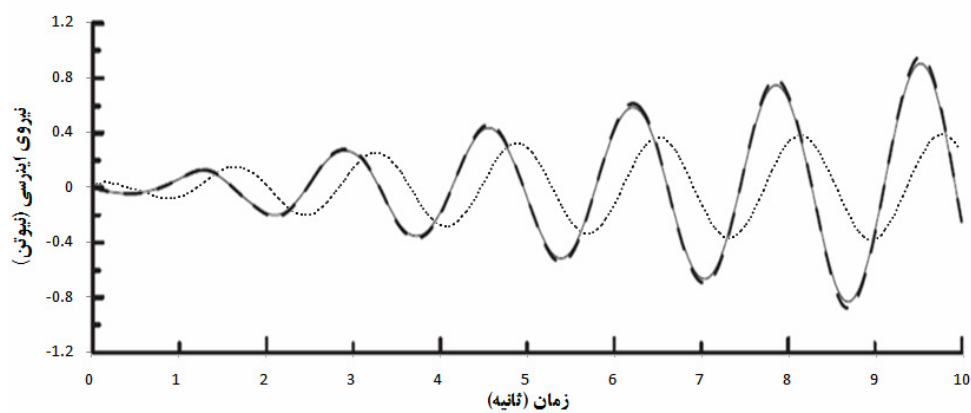
نتایج این مثال‌ها با روش المان‌های مرزی (BEM) که توسط چن و همکاران گزارش شده مقایسه گردیده است. نتایج ارتفاع موج پیش‌بینی شده توسط روش SPH با داده‌های آزمایشگاهی و نیز روش BEM گزارش شده به وسیله چن و همکاران در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح آزاد آب در روش SPH به خوبی مدل‌سازی شده است. در شکل‌های (۵) و (۶) نتایج نیروی اینرسی مخزن نشان داده شده است.



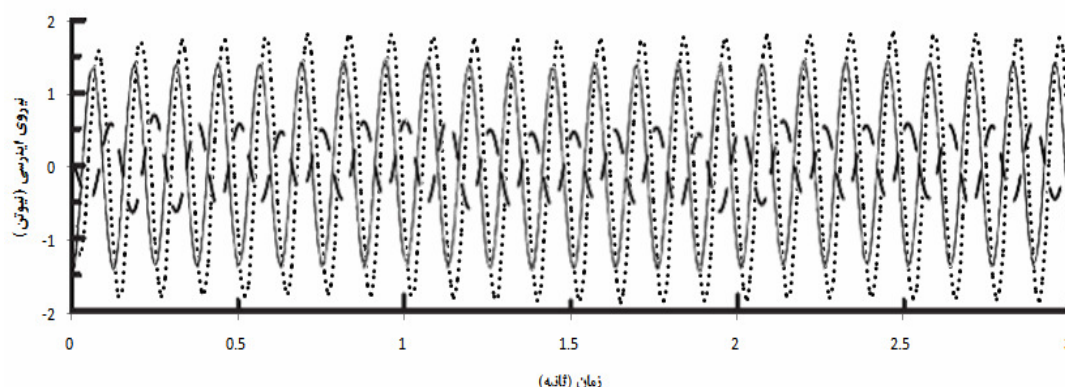
شکل ۳- چیدمان ابتدایی ذرات



شکل ۴- نمودار ارتفاع موج روی دیواره‌ی سمت راست مخزن برای مدل ۳. SPH (....)،
(---) داده آزمایشگاهی و BEM (—)



شکل ۵- نمودار نیروی آبرسی برای مدل ۱. SPH (....) و BEM (—)



شکل ۶- نمودار نیروی آبرسی برای مدل ۲. (.....) SPH، (—) BEM و (---) نیروی هیدروستاتیک

همانطور که در نمودارها مشخص است، نتایج حاصل از SPH تطابق نسبتاً خوبی با روش BEM دارد. شایان ذکر است که مقدار نیروی برشی کف مخزن در روش SPH از جمع مقادیر مربوط به ضرب شتاب a در جرم m هر ذره به دست آمده است. اختلافی که در نتایج مشاهده می‌شود، مرتبط با برخی پارامترهایی است که حضور یا عدم حضور آنها در حل معادلات حاکم بر سیال بروز چنین اختلافی را سبب خواهد شد. برای مثال، چن و همکاران سیال را در شرایطی مدل‌سازی کرده‌اند که ویسکوزیته در آن لحاظ نشده است. در روش SPH، ویسکوزیته سیال در نظر گرفته شده است. از دیگر عوامل می‌توان به تعریف شرایط مرزی در روش SPH اشاره کرد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عملکرد میراگر مایع تنظیمی تحت فرکانس‌های مختلف پرداخته شده است. مدل‌سازی این نوع مخازن با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) صورت گرفته است. خصوصیتی از جریان سیال مانند نیروی وارده از سیال به مخزن و نیز پیش‌بینی ارتفاع موج بررسی شده است. در هر دو مورد، نتایج روش SPH تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی و نیز روش عددی المان‌های مرزی (BEM) داشت. با توجه به قابلیت‌های روش SPH می‌توان از این روش برای دامنه‌های ارتعاشی بزرگ‌تر نیز استفاده کرد، چراکه وقوع پدیده‌ی شکست موج از جمله مواردی است که در دامنه‌های بزرگ‌تر رخ می‌دهد که SPH قابلیت مدل‌سازی آن را دارد.

۵. مراجع

[۱] Bauer, H.F., (۱۹۸۴), "Oscillation of immiscible liquids in a rectangular container," J. Sou. Vib., ۹۳(۱), ۱۱۷-۱۳۳.

[۲] Den Hartogh, J.P., (۱۹۵۶), "Mechanical Vibrations," McGraw-Hill, ۴th ed., New York, ۴۳۶ p.

[۳] Koh, C.G., Mahatma, S., and Wang, C.M., (۱۹۹۴), "Theoretical and experimental studies on rectangular liquid dampers under arbitrary excitations," J. Earth. Eng. Struct. Dyn., ۲۳, ۱۷-۳۱.

[۴] Kaneko, S., and Ishikawa, M., (۱۹۹۹), "Modeling of tuned liquid damper with submerged nets," Transactions of the ASME, ۱۲۱, ۳۳۴-۳۴۳.

[۵] Li, S.J., Li, G.Q., Tang, J., and Li, Q.S., (۲۰۰۲), "Shallow rectangular TLD for structural control implementation," J. App. Acous., ۶۳, ۱۱۲۵-۱۱۳۵.



[۶] Tait, M.J., El Damatty, A.A., Isyumov, N., and Siddique, M.R., (۲۰۰۵), "Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens," J. Fluids and Struct., ۲۰, ۱۰۰۷-۱۰۲۳.

[۷] Chen, Y.H., Hwang, W.S., and Ko, C.H., (۲۰۰۷), "Sloshing behaviours of rectangular and cylindrical liquid tanks subjected to harmonic and seismic excitations," J. Earthq. Eng and Struct. Dynamics, ۳۶(۱۲), ۱۷۰۱-۱۷۱۷.

[۸] Marivani, M., and Hamed, M.S., (۲۰۰۹), "Numerical simulation of structure response outfitted with a tuned liquid damper," J. Comp. and Strut., ۸۷, ۱۱۵۴-۱۱۶۵.

[۹] Monaghan, J.J., (۲۰۰۵), "Smoothed particle hydrodynamics," Reports on Progress in Physics, ۶۸, ۱۷۰۳-۱۷۵۹.

[۱۰] Delorme, L., Bulian, G., Mc Cue L., and Souto-Iglesias, A., (۲۰۰۶), "Coupling between sloshing and ship roll motion: Comparison between nonlinear potential theory and SPH," ۲۶th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, ۱۷-۲۲ September.