

بررسی نظری، عددی و آزمایشگاهی فرکانس‌ها و میرایی تلاطم در مخازن استوانه‌ای دارای بافل‌های حلقوی و قطاعی

محمد مهدی محمدی* استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران، mohammadi.mm@mut.ac.ir

حمید موسی زاده پژوهشگر، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، hamid.moosazadeh@modares.ac.ir

حسین جمشیدی پژوهشگر، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، jamshidi_hossein@mecheng.iust.ac.ir

چکیده

توانایی بافل‌ها در افزایش میرایی تلاطم به روش نظری، عددی و آزمایشگاهی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. بافل‌ها اجزائی هستند که به عنوان جداکننده در مخازن حاوی سیال نصب شده و مشخصات دینامیکی تلاطم را تغییر می‌دهند. هدف این مطالعه، بررسی اثر چیدمان بافل‌ها جهت فراهم آوردن فرکانس‌های مورد نظر و پیشنهاد یک آرایش کاربردی جهت افزایش پایداری مخازن نگهداری سیال می‌باشد. جهت نیل به این هدف یک بستر آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار سیال متلاطم و خواص میرایی تلاطم در مخازن استوانه‌ای پر شده تا عمق دلخواه طراحی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که چیدمان بافل‌های پیشنهادی اثر بسیار موثری بر میرایی و فرکانس‌های تلاطم داشته و نیازهای پیش‌بینی شده طراحی را به شکل مطلوب برآورده می‌سازد. به علاوه در ارتفاع‌های نزدیک به کف مخزن، منحنی تئوری پیش‌بینی می‌کند که فرکانس اساسی تلاطم کاهش پیدا کند، در صورتی که فرکانس‌های تجربی نه تنها کاهش پیدا نمی‌کنند بلکه روند افزایشی از خود نشان می‌دهند. همچنین نتایج حاصل از روش المان محدود و حجم محدود در محاسبه فرکانس و میرایی تلاطم، از همگرایی بالایی با نتایج تجربی برخوردار می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: بافل‌های ضد تلاطم، مخازن استوانه‌ای، نرخ میرایی، سطح آزاد سیال، نظریه امواج سطحی، روش حجم محدود.

Theoretical, numerical and experimental study of liquid sloshing frequencies and damping in a cylindrical container with anular and sectorial baffles

M. M. Mohammadi

Fuelcell Technology Research Laboratory, Malek Ashtar University Of Technology, Tehran, Iran

H. Moosazadeh

Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

H. Jamshidi

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

The ability of baffles in increasing the hydrodynamic damping of sloshing in circular cylindrical containers is investigated in this study by analytic, numerical, and experimental methods. Baffles as separate components are installed in tanks containing fluid and can change various aspects of dynamic characteristics of sloshing. The primary objectives of this study is to examine the relative effectiveness of baffle arrangements to provide experimental data for the verification of the numerical models and to recommend a practical baffle arrangement that would be effective over a range of frequencies. The results show that the proposed baffle arrangement has a very effective effect on the damping and sloshing frequencies, and satisfies the anticipated design requirements optimally. The results also display that at liquid height close to the bottom of the container, the theoretical curve predicts that the fundamental frequency of the sloshing will decrease, while the experimental frequency not only decreases but also shows an increasing average. In addition, the results of finite element method and finite volume method in calculation of sloshing frequency and damping are highly consistent with experimental results.

Keywords: Anti-slosh baffles, Circular cylindrical containers, Damping ratio, Surface Wave Theory, Free surface, Finite volume method Maximum 6 words, separated with commas.

یک تکنیک معمول برای این کار قرار دادن زیرسازه‌های اضافی که بافل^۱ یا جداساز نامیده می‌شوند، در داخل تانک است به نحوی که حرکت تلاطمی سیال را مهار کنند [۲]. بررسی‌های انجام شده بر رفتار تلاطم با استفاده از بافل به پنجاه سال قبل باز می‌گردد. زمانی که حجم قابل توجهی از معادلات آزمایشگاهی و نظری بر روی اثر بافل بر تلاطم مخازن سیال تجهیزات فضایی متمرکز شد [۳]. از آن پس نویسندگان زیادی به این موضوع پرداختند. در اینجا فقط یک مرور اجمالی بر مهمترین کارهایی که مستقیماً به تحقیق حاضر مربوط می‌شوند آورده شده است. استراندرگ [۴]. یک بررسی آزمایشگاهی بر روی پایداری و عملکرد دینامیکی تانکرهای افقی با شکل‌ها مختلف و

۱- مقدمه

حرکت سیال در مخازن دارای سطح آزاد تحت تحریک خارجی را تلاطم می‌نامند. این پدیده دارای اهمیت فراوان در بسیاری از وسایل نقلیه، قطارهای حامل مواد شیمیایی مایع، کشتی‌های حامل گاز مایع و فضاپیمها دارد و در صورت عدم بررسی دقیق می‌تواند اثرات مخربی داشته باشد [۱]. عملکرد و پایداری یکی از مهمترین موضوعات در طراحی تانکرهای ذخیره‌سازی سیال در مسائل تلاطم تحت حرکت معین است. در حالت خاص وقتی که فرکانس تحریک نیروی خارجی به فرکانس طبیعی اصلی نزدیک می‌شود، نیرو و گشتاورهای بزرگ ایجاد شده به دلیل تلاطم ممکن است منجر به عدم پایداری سیستم شده و سازه دچار شکست شود.

در عمل انواع گوناگونی از وسایل غیر فعال برای فائق آمدن بر اثرات نامطلوب تلاطم و حرکت سیال در داخل مخزن به کار می‌روند.

¹Baffle

ترکیب‌بندی مختلف از انواع بافل انجام داد و نتیجه گرفت که بافل عمودی بر مخزن بدون بافل یا مخزن با بافل‌های افقی ترجیح دارند. اوانس و مک آیور [۵] روش بسط توابع ویژه را برای بررسی اثر اضافه کردن یک بافل عمودی از کف یا از سطح در داخل یک مخزن مستطیلی بررسی نمودند. چو و همکارانش [۶] روش اجزای محدود همزمان سازه‌ای-اکوستیکی را برای بررسی پارامتری مقادیر ویژه یک مخزن استوانه‌ای ایستاده‌ی مجهز به بافل حلقوی برگزیدند. مدرسی تهرانی و همکارانش [۷] از نرم افزار فلونت برای ایجاد یک مدل سه بعدی در مخازن قسمتی پر استوانه‌ای بافل‌دار و بدون بافل استفاده کردند تا میزان اهمیت بافل‌ها را در اندازه‌ی نیروها و گشتاورهای ناپایدار ساز که در اثر تلاطم گذرا به وجود می‌آیند مورد بررسی قرار دهند. فیروزآبادی و همکارانش [۸] یک تحلیل اجزای مرزی سه بعدی را معرفی کردند و با استفاده از آن بسامدهای طبیعی و شکل موده‌های تلاطم سیال را در مخازن بافل‌دار با هندسه‌ی دلخواه بررسی نمودند. ملکی و ضیائی‌فر [۹] یک مدل هیدرودینامیک بر مبنای معادله‌ی دیفرانسیل لاپلاس برای تخمین نسبت میرایی تلاطم سیال که در اثر وجود یک بافل حلقوی افقی و نیز بافل عمودی در مخازن استوانه‌ای ایستاده در اثر تحریک عرضی به وجود می‌آید ارائه کردند. اسوارانا و همکارانش [۱۰] تکنیک‌های حجم سیال را در کنار نرم افزار ADINA به کار بردند تا توانایی بافل‌ها در محدود کردن تلاطم در مخازن مکعبی را بررسی نمایند. گودرزی و صباغ یزدی [۱۱] اثر بافل‌های افقی و عمودی را بر میرایی دامنه تلاطم در مخازن مستطیلی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نشان دادند که روابط ارائه شده برای پیش‌بینی میرایی از دقت کافی برخوردار می‌باشند. هاگان و همکاران [۱۲] تلاطم در مخازن استوانه دارای بافل‌های حلقوی تحت تحریک دورانی را به شیوه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که بافل‌های حلقوی تأثیر بسزایی بر کاهش نوسانات سطح آزاد دارد. هاشمی‌نژاد و همکاران [۱۳] اثر بافل‌های افقی و عمودی را بر تلاطم در مخازن استوانه‌ای افقی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که بافل‌های ضد تلاطم نقش بسزایی در کاهش گشتاور وارد بر مخزن دارند. نوریان و همکاران [۱۴] یک مدل عددی برای بررسی رفتار آئروالاستیک یک صفحه با شکل و شرایط مرزی دلخواه تحت اثر همزمان جریان خارجی مافوق صوت و تلاطم سیال ارائه کردند. از یک مدل اجزای محدود برای توصیف دینامیک سازه همراه با نظریه پیستون خطی برای توصیف اثرات جریان خارجی مافوق صوت استفاده گردید. همچنین برای توصیف میدان جریان داخلی از یک مدل جریان پتانسیل گسسته شده با روش اجزای مرزی استفاده شد. مدل توسعه یافته برای بررسی مرزهای پایداری دینامیکی سیستم برای شرایط مختلف سیال داخلی به کار گرفته شد و رفتارهای دینامیکی جدید در برهمکنش سازه با جریان داخلی و خارجی به طور همزمان مشاهده گردید. ابراهیمیان و همکاران [۱۵] به تجزیه و تحلیل تلاطم سیال در مخازن متقارن محوری با هندسه دلخواه تحت شرایط جاذبه کم با استفاده از روش اجزای مرزی پرداختند. آن‌ها از نظریه تابع پتانسیل برای مدل‌سازی میدان جریان و معادله سطح آزاد لاپلاس - پانگ همراه با کشش سطحی استفاده کردند. معادلات حاکم به دست آمده با استفاده از روش‌های مقادیر ویژه جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی و شکل مود تلاطم سیال استفاده گردید. به علاوه برخی از مخازن دارای بافل نیز مورد بررسی قرار گرفت و اثر بافل‌ها بر روی فرکانس‌های تلاطم در شرایط جاذبه کم و صفر بررسی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش گرانش یا کاهش کشش سطحی منجر به افزایش فرکانس طبیعی تلاطم می‌گردد. به علاوه افزایش سطح بافل یا کاهش فاصله تا سطح آزاد سیال اثر قابل

توجهی بر افزایش فرکانس‌های تلاطم دارد.

ژو و همکاران [۱۶]، تلاطم سیال را در یک مخزن مستطیلی با چهار نوع بافل عمودی در محدوده فرکانسی وسیع مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تغییرات فشار تلاطم بر دیواره مخزن و بافل را تحت فرکانس‌های مختلف تحریک برای مخازن بدون بافل، مخازن با بافل‌های عمودی نصب شده در کف مخزن، بافل‌های عمودی نفوذ کننده به سطح آزاد، بافل‌های عمودی نصف کننده مخزن با سوراخ مرکزی و بدون سوراخ، ارزیابی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که در محدوده فرکانسی از 0.4 تا 1.4 فرکانس طبیعی اول، بافل عمودی نفوذ کننده به سطح آزاد ابزاری مؤثرتر در کاهش فشار ضربه در مقایسه با بافل عمودی نصب شده در کف، به ویژه در نزدیکی فرکانس طبیعی اول است. همچنین نتایج تجربی آن‌ها نشان داد تأثیر بافل عمودی در کاهش فشار مخرب نه تنها به رابطه‌ی بین فرکانس تحریک و فرکانس طبیعی بستگی دارد بلکه به پیکربندی و موقعیت آن نیز بستگی دارد. آرورا و همکاران [۱۷] علت عمده‌ی تأثیر تلاطم بر طراحی سازه مخازن سوخت کامیون‌های سنگین را ناشی از حرکت سطح آزاد سوخت در ظروف پر شده دانستند. آن‌ها نشان دادند که در مخازن با ظرفیت بالای ۹۰۰ لیتر، این پدیده می‌تواند باعث ضربه زدن سوخت به مخزن با نیروهای زیاد شده که بخش‌های آسیب پذیر مخزن را در معرض خطر بارهای دینامیکی سنگین قرار می‌دهد. در این راستا آن‌ها یک روش برهمکنش سازه و سیال^۱ با کمک اتصال مدل حجم محدود و اجزای محدود را برای تحلیل این مساله پیشنهاد کردند. چو و همکاران [۱۸] به بررسی عددی اثر تعداد بافل بر خصوصیات پاسخ دینامیکی تلاطم در مخازن استوانه‌ای تحت اثر شتاب محوری گذرا پرداختند. اثر الاستیسیته‌ی مخزن و بافل در این بررسی مورد توجه قرار گرفت. به علاوه تأثیر کاهشی بافل‌ها بر نوسانات تلاطم بر اساس ترم‌های فشار دینامیکی، جابجایی و تنش بررسی شد. به کمک تحلیل‌های عددی نشان داده شد که اضافه کردن بافل‌ها در مخزن پر شده تا عمق دلخواه، دامنه نوسانات سطح آزاد و تنش ایجاد شده در مخزن و بافل را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. به علاوه اثر میرایی با افزایش تعداد بافل به سرعت افزایش می‌یابد. ونگ و همکاران [۱۹] یک روش تحلیلی را جهت بررسی تلاطم سیال در مخازن استوانه‌ای با بافل‌های متعدد حلقوی تحت تحریک چرخشی گسترش دادند. یک مختصات تعمیم یافته جهت تعیین ارتفاع سطح آزاد و پتانسیل سرعت معرفی شد که شامل پتانسیل استوکس-ژوکوفسکی است. بر اساس شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی سطح آزاد سیال، معادله پاسخ دینامیکی تعیین گردید. مدل تحلیلی بدست آمده برای تلاطم سیال با نتایج عددی بدست آمده از نرم افزار تجاری ADINA تأیید گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که دامنه نوسانات با افزایش شعاع داخلی بافل یا دور شدن بافل‌ها از سطح آزاد افزایش می‌یابد. به علاوه هنگامیکه فرکانس تحریک افزایش می‌یابد، نیرو و گشتاور ناشی از تلاطم به میزان زیادی به شتاب زاویه‌ای و تابع پتانسیل استوکس-ژوکوفسکی بستگی دارد. سان و ژو [۲۰] یک مدل مکانیکی جرم و فنر را برای بررسی تلاطم سیال در یک مخزن استوانه‌ای صلب با یک بافل حلقوی ارائه کردند. با استفاده از روش زیر دامنه^۲، دامنه پیچیده سیال به چندین زیر دامنه با شرایط مرزی ساده تبدیل گردید. با ترکیب شرایط سازگاری روی مرزها، پتانسیل سرعت سیال در هر زیر دامنه به صورت تحلیلی تعیین شد. بر اساس مدل معادل جرم و فنر نرمال شده،

¹ Fluid-Solid Interaction

² subdomain method

مهمترین نوآوری های مقاله حاضر را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- بررسی آزمایشگاهی نوسانات تلاطم در یک مخزن با بافل های ترکیبی و مقایسه نتایج نظریه های مختلف با نتایج آزمایشگاهی
- ارائه ترکیبی از بافل های حلقوی و قطاعی جهت افزایش قابل توجه میرایی تلاطم و پایداری مخزن
- ارائه یک مدل عددی جهت پیش بینی فرکانس ها و میرایی تلاطم و مقایسه نتایج با نتایج تجربی

جهت نیل به این هدف یک بستر آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار غیرخطی تلاطم و خواص میرایی تلاطم سیال در مخازن استوانه ای پر شده تا عمق دلخواه طراحی شده است. مخزن تحت آزمایش دارای همه جزئیات مورد نیاز در مخازن سیال بوده و آرایش بافل های ارائه شده تمامی نیازهای طراحی را برآورده می سازد. علاوه بر این ترکیب بافل های حلقوی و قطاعی توانسته است میرایی قابل توجهی به سیستم اضافه کرده و پایداری مخزن را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. ترکیب جدیدی از بافل های حلقوی و قطاعی در تانکر حمل سیال طراحی و در مدل آزمایشگاهی استفاده شده است تا بصورت بهینه تلاطم سطح سیال در هنگام کاهش سیال درون تانکر را کاهش دهد. برای این ترکیب جدید، معادلات تحلیلی حاکم حل شده و با نتایج مدل آزمایشگاهی و حل عددی، مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم

تابع پتانسیل برای جریان غیرچرخشی و غیر قابل تراکم می بایست در معادله لاپلاس [1] صدق کند.

$$\nabla^2 \varphi = 0. \quad (1)$$

فرض کنید یک مخزن استوانه ای تحت تحریک عرضی و هارمونیک مرزی سطح آزاد و دیواره های صلب به صورت زیر بدست می آید [۲]:

$$\varphi = \left(\frac{g\eta}{i\omega_1} \right) \frac{\cosh(\lambda_1 z/R)}{\cosh(\lambda_1 H/R)}, \quad (2)$$

که در آن $\omega_j = \frac{\lambda_j g}{R} \tanh\left(\lambda_j \frac{H}{R}\right)$ فرکانس طبیعی تلاطم بوده و $\eta(r, \theta, t)$ ارتفاع سطح آزاد می باشد و از رابطه زیر بدست می آید [۹]

$$\eta(r, \theta, t) = R \left[\sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{1 - (\omega/\omega_j)^2} \frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{J_1(\lambda_j r/R)}{J_1(\lambda_j)} \right] \ddot{x}_0 e^{i\omega t} \cos \theta, \quad (3)$$

در معادله بالا R شعاع مخزن، H ارتفاع سیال، g شتاب گرانش، J_1 تابع بسل نوع اول و λ_j صفرهای تابع $J_1'(R\lambda_j)$ هستند. انرژی تلاطم به کمک نظریه های کلاسیک به صورت زیر بدست می آید [۹]:

$$E = \frac{1}{4} \rho g \eta^2 \left(1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \pi R^2, \quad (4)$$

که در آن ρ چگالی سیال می باشد. میرایی ناشی از تلاطم سیال متناسب با انرژی مستهلک شده در هر سیکل می باشد که به صورت زیر بدست می آید [۹]

پاسخ های دینامیکی سیال در مخازن با توجه به ارتفاع سیال، موقعیت بافل و شعاع داخلی بافل مورد بحث قرار گرفت. مدل ارائه شده به ویژه برای کار با سیستم هایی با ساختار پیچیده مناسب است. به علاوه اعتبار روش پیشنهادی با استفاده از مدل سازی سیستم های چند مخزنی و مقایسه با نتایج تجربی تأیید گردید.

ابراهیمیان و همکاران [۲۱]، ارتفاعات آزاد تلاطم و پارامترهای مدل مکانیکی معادل برای مخازن دو بعدی دارای بافل های متعدد در شرایط گرانش کم با استفاده از روش اجزای مرزی و مدل پتانسیل سیال را مورد بررسی قرار دادند. مدل ارائه شده برای هر مقدار از شتاب گرانش و کشش سطحی و برای مخازن مقطع ثابت با هندسه دلخواه و آرایش شکل های مختلف بافل قابل استفاده است. نتایج این تحقیق نشان داد که جرم معادل از اعداد باند^۱ در محدوده $Bo > 1000$ مستقل هستند. به علاوه محل جرم معادل در محدوده $0 < Bo < 1000$ به شدت متغیر است. همچنین سفتی فنر معادل در اعداد باند $Bo < 0.1$ تقریباً ثابت می باشد. ژنگ و همکاران [۲۲] به بررسی تلاطم سیال در مخازن استوانه ای دارای بافل با استفاده از روش اجزای مرزی ایزوژئومتری پرداختند. به جای توابع مبنای لاگرانژ که در روش اجزای مرزی استاندارد استفاده می شود، توابع پایه با توزیع غیر یکنواخت B-splines برای تقریب هندسه مرزهای مسئله و متغیرهای ناشناخته معرفی گردید. آن ها نشان دادند که در مقایسه با توابع پایه لاگرانژ، توابع پایه بی اسپلاین می توانند مرز هندسی دامنه تجزیه و تحلیل را با دقت و تقریباً بدون خطا بازسازی کنند و کلیه اطلاعات داده های مربوط به توابع پایه را می توان مستقیماً از طریق طراحی به کمک رایانه^۲ بدست آورد. فرکانس های طبیعی تلاطم سیال در یک مخزن استوانه ای مدور با یک لوله دایره ای هم محور و خارج از مرکز، یک مخزن استوانه ای بیضوی با یک لوله بیضوی و یک مخزن استوانه ای مدور با چندین لوله با روش معرفی شده بدست آمد. مقایسه بین نتایج بدست آمده توسط روش پیشنهادی و نتایج موجود در ادبیات موضوع، نشان دهنده دقت مناسب روش پیشنهادی بود. در همین حال، اثرات نسبت شعاع، عمق سیال، تعداد و محل لوله داخلی (لوله ها) بر روی فرکانس های طبیعی تلاطم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یائو و همکاران [۲۲] یک مطالعه پارامتری جهت بررسی اثر دامنه و فرکانس تحریک بر خواص تلاطم مخصوصاً مودهای فرکانسی بالا را مورد بررسی قرار دادند. اثر بافل ها در مهار تلاطم و مکانیسم میرایی بافل ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که بافل های عمودی عملکرد مناسب تری در کاهش تلاطم مخصوصاً در مودهای بالای تحریک دارند. به علاوه با تغییر تعداد و موقعیت بافل ها نتیجه گیری شد که هرچه موقعیت بافل ها به نقاط گرمای شکل مودهای تلاطم نزدیکتر باشد، اثر میرایی بافل ها بیشتر خواهد بود.

مرور فوق به روشنی نشان می دهد که اگرچه حجم زیادی از مطالعات در زمینه تلاطم در مخازن گوناگون دارای بافل انجام شده است، گزارش دقیقی از تاثیر همزمان بافل های حلقوی و قطاعی در مخازن استوانه ای حاوی سیال ارائه نشده است. هدف اصلی مقاله حاضر بررسی آزمایشگاهی اثر چیدمان بافل ها بر میرایی تلاطم، به منظور پیشنهاد یک آرایش کاربردی جهت فراهم آوردن نیازهای طراحی در مخازن نگهداری سیال می باشد. همچنین نتایج آزمایشگاهی حاصل می تواند به عنوان اطلاعات مورد نیاز در مدل سازی عددی مورد استفاده قرار گیرد.

¹ Bond Number

² CAD

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{\pi} \arcsin(d/R) - \frac{1}{2} \frac{d/R}{\eta/R} \\
 & + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_b}{R}\right)^2 \left(1 - \frac{d/R}{(1-r_b/R)\eta}\right) \\
 & - \frac{2}{\pi} \frac{d/R(1-r_b/R)}{\eta/R} \ln \left[\frac{\eta/R + \sqrt{(\eta/R)^2 - \left(\frac{d/R}{1-r_b/R}\right)^2}}{(d/R)/(1-r_b/R)} \right] \\
 & + \frac{1}{\pi} \frac{d/R(1-r_b/R)}{(\eta/a)^2} \sqrt{(\eta/R)^2 - \left(\frac{d/R}{1-r_b/R}\right)^2} \\
 & - \frac{1}{\pi} (1-r_b/R)^2 \arcsin\left(\frac{d/R}{(1-r_b/R)\eta}\right) \\
 & + \frac{1}{2} (1-r_b/R) \frac{d/R}{\eta/R}
 \end{aligned} \quad (11)$$

برای مجموعه‌ای از بافل‌ها ضریب میرایی تلاطم با استفاده از اصل جمع آثار رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\gamma_r = 2.83 \sqrt{\frac{\eta_{max}}{R}} \left(\sum_{n=1}^N e^{-4.6 \left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right)} C_n^{1.5} + \sum_{n=1}^N e^{-4.6 \left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)} C_m^{1.5} \right), \quad (12)$$

که در آن N تعداد بافل‌های مستغرق در سیال بوده و M تعداد بافل‌های بیرون از سیال می‌باشد. C_n ضریب سطح موثر برای بافل n ام بوده و در صورتی که $\eta/R \leq d/R + (n-1)D/R$ باشد، از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد

$$C_n = \frac{r_b}{R} \left(2 - \frac{r_b}{R}\right). \quad (13)$$

که در آن D فاصله بافل‌ها از یکدیگر می‌باشد. در صورتی که

$\eta/R(1-r_b/R) < d/R + (n-1)D/R \leq \eta/R$ باشد، ضریب C_n از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد [۲۵]:

$$\begin{aligned}
 C_n &= \frac{r_b}{R} \left(2 - \frac{r_b}{R}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right) \\
 &+ \frac{2}{\pi} \left(\frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right) \ln \left[\frac{\frac{\eta}{R} + \sqrt{\left(\frac{\eta}{R}\right)^2 - \left(\frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right)^2}}{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}} \right] \\
 &- \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}\right)}{\left(\frac{\eta}{R}\right)^2} \sqrt{\left(\frac{\eta}{R}\right)^2 - \left(\frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right)^2} \\
 &+ \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right) \\
 &- \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right).
 \end{aligned} \quad (14)$$

علاوه بر این در صورتی که $d/R + (n-1)D/R \leq \eta/R(1-r_b/R)$ باشد، ضریب C_n به صورت (۱۵) بیان می‌گردد [۲۵]:

$$\gamma = \frac{1}{2\omega} \frac{d\bar{E}/dt}{E}, \quad (5)$$

در معادله (۵)، $\bar{D} = dE/dt$ انرژی میانگین مستهلک شده در هر سیکل از نوسان، ω فرکانس تلاطم و γ نرخ میرایی است. برای مخازن دارای بافل، مراجع گوناگون روابط بسیاری را پیشنهاد کرده‌اند. برای مثال ملکی و ضیایی‌فر [۹] رابطه زیر را برای محاسبه نرخ میرایی ارائه کرده‌اند.

$$\gamma_r = 4C_r \sqrt{\frac{\eta_{max}}{R}} \left(\frac{\sinh(1.84h/R)}{\sinh(1.84H/R)} \right) \tanh(1.84H/R), \quad (6)$$

در معادله (۶) γ_r نرخ میرایی تلاطم با بافل‌های افقی حلقوی بوده، η_{max} حداکثر ارتفاع سطح آزاد، h ارتفاع بافل، r_b شعاع داخلی بافل و C_r تابعی متناسب با عرض بافل است که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$C_r = \left(\frac{r_b}{R}\right)^{1.5} \left(2 - \frac{r_b}{R}\right). \quad (7)$$

مایلز [۲۴] رابطه زیر را برای مخازن متلاطم که در آن‌ها ارتفاع سطح آزاد بیشتر از شعاع مخزن باشد ارائه کرد.

$$\gamma_r = 2.83 e^{-4.6[d/R]} C_1^{1.5} \sqrt{\frac{\eta_{max}}{R}}, \quad (8)$$

که در آن $d = H - h$ فاصله بافل از سطح آزاد سیال بوده و C_1 سطح موثر بافل بوده و در صورتی که بافل کاملاً در سیال غوطه ور باشد، $\eta/R \leq d/R$ از رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$C_1 = \frac{r_b}{R} \left(2 - \frac{r_b}{R}\right). \quad (9)$$

در صورتی که بافل کاملاً در سیال غوطه ور نباشد و در طی تلاطم برای لحظاتی از سیال بیرون باشد، یعنی $\eta/R(1-r_b/R) < d/R \leq \eta/R$ ضریب C_1 از رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد [۲۵]:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{r_b}{R} \left(2 - \frac{r_b}{R}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right) \\
 &+ \frac{2}{\pi} \left(\frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right) \ln \left[\frac{\frac{\eta}{R} + \sqrt{\left(\frac{\eta}{R}\right)^2 - \left(\frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right)^2}}{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}} \right] \\
 &- \frac{1}{\pi} \frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\left(\frac{\eta}{R}\right)^2} \sqrt{\left(\frac{\eta}{R}\right)^2 - \left(\frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right)^2} + \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}\right) \\
 &- \frac{1}{2} \frac{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}}{\frac{\eta}{R}}.
 \end{aligned} \quad (10)$$

علاوه بر این در صورتی که بافل کاملاً از سیال بیرون باشد و تنها برای لحظاتی با سیال در تماس باشد، یعنی، $d/R < \eta/R(1-r_b/R)$ ضریب C_1 به صورت زیر اصلاح می‌گردد [۲۵]:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{r_b}{R} (2 - r_b/R) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d/R}{\eta/R}\right) \\
 &+ \frac{2}{\pi} \frac{d/R}{\eta/R} \ln \left[\frac{\eta/R + (\eta/R)^2 - (d/R)^2}{d/R} \right] \\
 &- \frac{1}{\pi} \frac{d/R}{(\eta/R)^2} \sqrt{(\eta/R)^2 - (d/R)^2}
 \end{aligned}$$

علاوه بر این در صورتی که $mD/R - d/R \leq \eta/R$ ، ضریب C_m به صورت (۱۷) بیان می‌گردد [۲۴]:

$$C_m = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{R} + \frac{mD}{R} \right) - \frac{1}{\pi} \frac{mD - d}{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2} \sqrt{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2 - \left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)^2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{\left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)}{\frac{\eta}{R}} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_b}{R} \right) \left[1 - \frac{\left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)}{\left(1 - \frac{r_b}{R} \right) \frac{\eta}{R}} \right] + \frac{2}{\pi} \left(\frac{\left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right) \left(1 - \frac{r_b}{R} \right)}{\frac{\eta}{R}} \right) \ln \left[\frac{\frac{\eta}{R} + \sqrt{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2 - \left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)^2}}{\left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right) \left(1 - \frac{r_b}{R} \right)} \right] - \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right) \left(1 - \frac{r_b}{R} \right)}{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2} \sqrt{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2 - \left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)^2} + \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{r_b}{R} \right)^2 \arcsin \left(\frac{\left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)}{\left(1 - \frac{r_b}{R} \right) \frac{\eta}{R}} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_b}{R} \right) \left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right) \quad (17)$$

جهت محاسبه نسبت میرایی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. کد تهیه شده ترکیب اثر بافل‌های حلقوی چیده شده در طول تانکر را شامل شده که در هر لحظه از سطح سیال در حال تغییر، اثر تمام بافل‌ها را توسط ترکیب معادلات تعیین میرایی و فرکانس تلاطم، محاسبه می‌نماید. در این مقاله، نتایج هر دو نظریه با نتایج آزمایشگاهی و عددی مقایسه گردیده است.

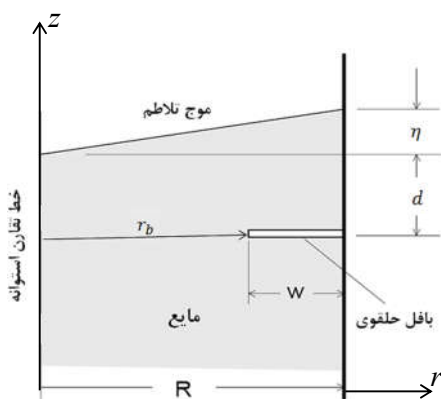
۳- بستر آزمایشگاهی

هندسه مخزن استوانه‌ای همراه با بافل‌های آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در طرح ارائه شده از بافل‌های حلقوی که نسبت به سایر تجهیزات میراگر تلاطم عملکرد بهتری دارند استفاده شده است. همچنین انتهای مخازن نیز با استفاده از تیغه‌های عمود برهم قطاع‌بندی گردیده است که میرایی و فرکانس تلاطم را افزایش خواهد داد.

$$C_n = \frac{r_b}{R} \left(2 - \frac{r_b}{R} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right) + \frac{2}{\pi} \left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right) \ln \left[\frac{\frac{\eta}{R} + \sqrt{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2 - \left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right)^2}}{\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R}} \right] - \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right)}{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2} \sqrt{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2 - \left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right)^2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{\left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right)}{\frac{\eta}{R}} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_b}{R} \right)^2 \left[1 - \frac{\left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right)}{\left(1 - \frac{r_b}{R} \right) \frac{\eta}{R}} \right] - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right) \left(1 - \frac{r_b}{R} \right)}{\frac{\eta}{R}} \right) \ln \left[\frac{\frac{\eta}{R} + \sqrt{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2 - \left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right)^2}}{\left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right) \left(1 - \frac{r_b}{R} \right)} \right] + \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right) \left(1 - \frac{r_b}{R} \right)}{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2} \sqrt{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2 - \left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right)^2} - \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{r_b}{R} \right)^2 \arcsin \left(\frac{\left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right)}{\left(1 - \frac{r_b}{R} \right) \frac{\eta}{R}} \right) - \frac{r_b}{R} \left(\frac{d}{R} + \frac{(n-1)D}{R} \right) \quad (15)$$

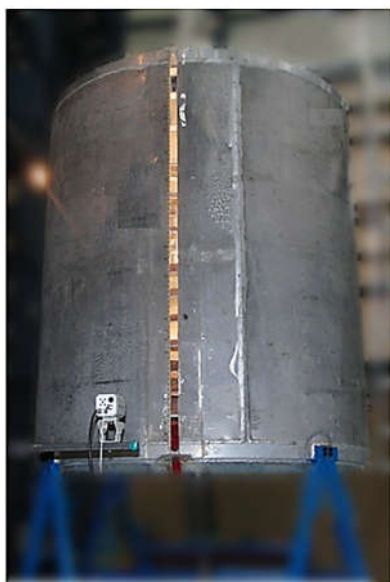
علاوه بر این در صورتی که بافل کاملاً از سیال بیرون باشد و در طول شبیه سازی با سیال در تماس قرار نگیرد، $C_m = 0$ است و در صورتی که $mD/R - d/R \leq \eta/R$ ، ضریب C_m به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۴]:

$$C_m = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{R} + \frac{mD}{R} \right) - \frac{2}{\pi} \left(\frac{mD - d}{\frac{\eta}{R}} \right) \ln \left[\frac{\frac{\eta}{R} + \sqrt{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2 - \left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)^2}}{\frac{mD}{R} - \frac{d}{R}} \right] - \frac{1}{\pi} \frac{mD - d}{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2} \sqrt{\left(\frac{\eta}{R} \right)^2 - \left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)^2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{\left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)}{\frac{\eta}{R}} \right) + \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{mD}{R} - \frac{d}{R} \right)}{\frac{\eta}{R}} \quad (16)$$



شکل ۳- پارامترهای موثر بر محاسبه میرایی.

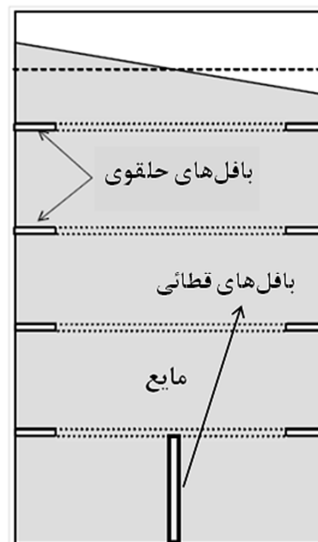
پس از ساخت مخزن و آماده‌سازی تجهیزات تست، مخزن بر روی یک میز متحرک نصب شده است. میز متحرک قابلیت تحریک جابجایی مخزن را به صورت هارمونیک با دامنه و فرکانس دلخواه را دارد. بستر آزمایشگاهی ساخته شده در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴- تانکر حاوی سیال تحت آزمایش.

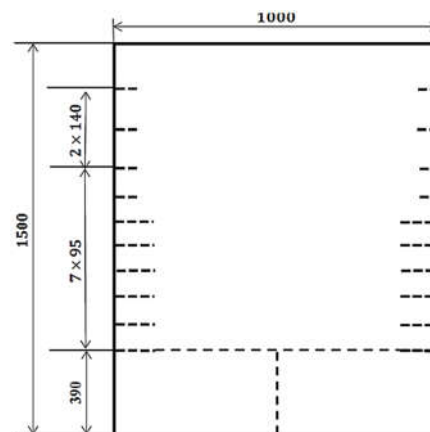
اهداف آزمایش، تعیین فرکانس‌های طبیعی اول و دوم و میرایی تلاطم در چند ارتفاع متفاوت سطح سیال بوده که از پیش تعریف شده است. در واقع، مخزن تا سطوح (ارتفاع‌های) مشخصی پر می‌شود و برای هر یک از این ارتفاع‌ها فرکانس‌ها و نسبت میرایی استخراج می‌گردد. باید توجه داشت که تمام بافل‌های زیر سطح و نزدیک سطح متحرک سیال در تعیین مشخصه‌های تلاطم دخیل هستند. پاسخ تلاطم سیال در هر یک از سطوح سیال در قالب سیگنال‌های نیروی تکیه‌گاهی در کف مخزن، ثبت شده و تصویر نوسان سطح آزاد سیال (دامنه تلاطم) از شیار مدرج شفاف (از جنس پرسپکس^۱) ایجاد شده بر روی مخزن (شکل ۴) توسط دوربین‌های دقیق ثبت می‌گردد. مخزن روی دستگاه تحریک افقی جانبی بصورت سینوسی با دامنه ثابت و فرکانس‌های مختلف از 0.3 Hz تا 2.5 Hz با فواصل فرکانسی 0.1Hz قرار می‌گیرد.

¹ Perspex



شکل ۱- هندسه مخزن استوانه‌ای دارای بافل‌های حلقوی و قطائی.

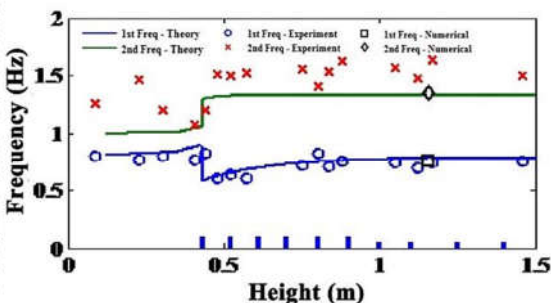
ابعاد مخزن، چیدمان بافل‌ها و فاصله‌ی آن‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- چیدمان و فاصله بافل‌ها.

ضخامت بدنه مخزن حدود ۳ میلی‌متر است که می‌توان آن را صلب فرض کرد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تعداد ۴ بافل حلقوی با عرض ۵۰ میلی‌متر و ۶ بافل حلقوی با عرض ۱۰۰ میلی‌متر در مخزن قرار داده شده است. ضخامت بافل‌های حلقوی ۱ میلی‌متر می‌باشد که به دلیل طول کوتاه آن‌ها عملاً صلب هستند. کف تانکر نیز به کمک دو ورق به ضخامت ۳ میلی‌متر به چهار قسمت تقسیم شده است که حدود ۳۹۰ میلی‌متر ارتفاع دارند. پارامترهای مورد استفاده در محاسبه میرایی در شکل ۳ نمایش داده شده است.

شده است. بنابراین فرکانس طبیعی‌های تئوری در شتاب گرانس ۱g محاسبه شده‌اند. فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده در شکل ۶ نشان داده شده است ($\omega_j = \frac{\lambda_j g}{R} \tanh(\lambda_j \frac{H}{R})$). در همین شکل، فرکانس‌های تجربی مربوط به سطوح از پیش تعریف شده از طریق آزمایش تعیین شده‌اند.

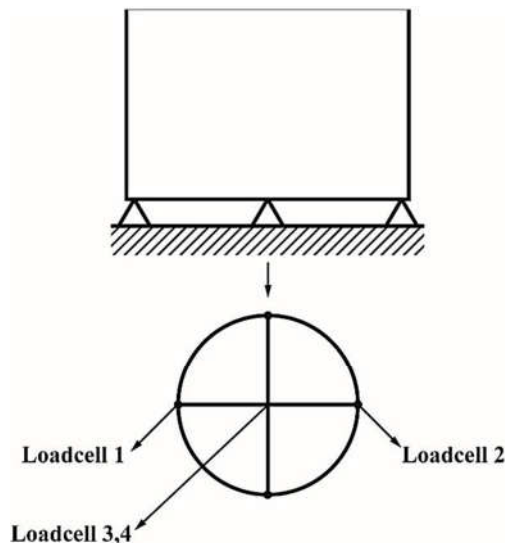


شکل ۶- منحنی تئوری و تجربی فرکانس اول و دوم تلاطم سیال در سطوح مختلف.

همانگونه که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین فرکانس‌های نظری و فرکانس‌های تجربی وجود دارد. داده‌های تجربی تغییرات منحنی نظری را دنبال می‌کنند. از ارتفاع‌های بالا تا ارتفاع حدود ۴۵ سانتیمتر، تغییرات هر دو فرکانس به صورت تقریباً کاهشی بوده و به کاهش ارتفاع سطح آزاد سیال از کف مخزن نیز مربوط می‌شود. فرکانس‌های تجربی در نقاطی که از بافل‌ها فاصله دارند (برای مثال بین دو بافل) به فرکانس نظری نزدیک‌ترند اما در نقاطی که نزدیک به بافل هستند، از فرکانس‌های نظری بیشتر شده‌اند. این امر می‌تواند به دلیل اثرات سطحی بافل‌ها باشد که در نظریه استفاده شده از آن صرفه نظر شده است. از ارتفاع حدود ۴۵ سانتیمتر به پایین، فرکانس اول افزایش و فرکانس دوم کاهش می‌یابند. این تغییرات که به دلیل اثر بافل‌های قطاعی می‌باشد، به خوبی اثر خود را در داده‌های تجربی نشان داده است. در اکثر سطوح تست، فرکانس‌های اول تجربی و نظری به مقدار کمتر از ۱۵ درصد و فرکانس‌های دوم تجربی و نظری کمتر از ۲۰ درصد اختلاف دارند.

به منظور مطالعه عددی فرکانس‌های طبیعی تلاطم، برای ارتفاع ۱/۱۵ متر که نتایج آن در شکل ۶ نیز نمایش داده شده است، بسته نرم افزاری تجاری Ansys به کار گرفته شده است. سیال با المان هشت گرهی سیالاتی FLUID80 مدل‌سازی شده است. هر گره این المان دارای ۳ درجه آزادی است. در قسمت تماس سیال با دیواره مخزن، تمامی درجات آزادی سیال گرفته شده است. المان فلوید ۸۰ از مدل کاهش یافته^۱ برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی استفاده می‌کند. تحلیل اجزاء محدود جهت محاسبه سه فرکانس اول تلاطم به کار گرفته شده است.

دامنه توقف در هر فرکانس ۶۰ ثانیه می‌باشد. دامنه تحریک باید چنان باشد که دامنه تلاطمی برابر با $4 \leq \eta \leq 6 \text{ cm}$ ایجاد نماید. در فرکانس‌های مورد نظر باید دامنه تلاطم سیال به کمک فشار سنج‌های دینامیکی و نیروی جانبی ناشی از سیال به کمک نیروسنج‌های نصب شده در اطراف تکیه گاه مخزن و دامنه نیروی تحریک ثبت گردند (شکل ۵). پس از این مرحله با مشاهده نتایج آن در محدوده فرکانسی که دامنه نیروی جانبی و دامنه تلاطم به حداکثر مقدار خود رسیده‌اند، تست با فواصل فرکانسی 0.02Hz تکرار می‌گردد. در این مرحله نیز زمان توقف در هر فرکانس ۶۰ ثانیه می‌باشد. بر این اساس با ثبت فرکانس‌هایی که در آن‌ها دامنه به حداکثر مقدار خود رسیده است، فرکانس‌های طبیعی سیستم در محدوده تحریک بدست می‌آید.



شکل ۵- نحوه نصب نیروسنج‌ها.

همچنین برای اندازه‌گیری میرایی تلاطم، تحریک جانبی افقی با فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی مود اول $0.95f_1 \leq f \leq 1.05f_2 \text{ Hz}$ که از مرحله قبل تخمین زده شده است، به مخزن اعمال می‌گردد. مودهای بالاتر به سرعت میرا می‌گردند و از لحاظ میرایی حالت بحرانی ایجاد نمی‌کنند. در این تست دامنه تحریک باید به گونه‌ای باشد که تلاطمی با دامنه نوسان قرار گرفته در محدوده $5 \leq \eta \leq 7 \text{ cm}$ ایجاد نماید. پس از رسیدن تلاطم سیال به حالت پایدار، تحریک قطع می‌گردد. طی کاهش دامنه بر اثر میرایی، نیروی جانبی وارد بر مخزن و همچنین دامنه تلاطم سیال در نقطه‌ای روی دیواره در حوزه زمان ثبت می‌گردد. سپس به کمک رابطه کاهش دامنه لگاریتمی (۱۸)، میرایی محاسبه می‌گردد. ثبت داده‌ها باید تا زمانی که تلاطم کاملاً از بین برود صورت پذیرد. به منظور میانگیری و اطمینان بیشتر، این روند آزمایش سه بار تکرار می‌شود. همچنین، توجه به این نکته ضروری است که استفاده از فیلتر (پائین‌گذر یا بالاگذر) برای حذف نویز یا حذف فرکانس‌های بالاتر موجب تغییر ماهیت میرایی سیگنال می‌شود و استفاده از فیلتر مجاز نمی‌باشد. لازم به ذکر است رابطه‌های تئوری تخمین میرایی که برای بافل‌های میراگر ارائه شده‌اند، بر حسب دامنه تلاطم سطح آزاد بیان شده‌اند.

۴- نتایج

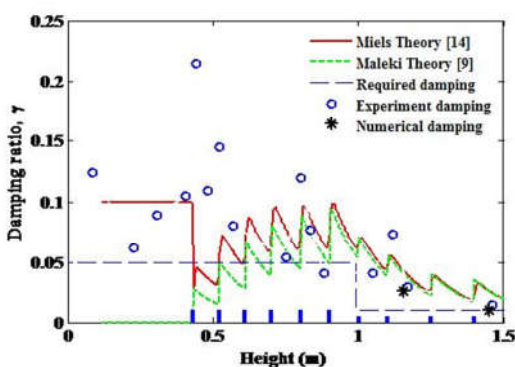
۴-۱- بررسی فرکانس‌های تلاطم

تست تلاطم در شتاب گرانس متناظر به جاذبه سطح زمین انجام

¹ Reduced model

است. میرایی نظری نسبت به سطح سیال (ارتفاع‌های مختلف) برای مخزن در شکل ۱۰ رسم شده است. نتایج محاسبه میرایی با استفاده از دو نظریه و نتایج تجربی برای مخزن در این شکل آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میرایی بر حسب ارتفاع سیال از کف مخزن به صورت دندان‌اره‌ای تغییر می‌کند. میرایی تجربی به صورت تقریبی روند نظری را دنبال می‌کند. این مقدار اختلاف احتمالاً به برآورد بیش از حد^۱ روابط نظری یا به عدم برقراری فرض جمع آثار^۲ میرایی بافل‌هایی که به صورت ردیفی زیر هم قرار گرفته‌اند، مربوط می‌شود. همچنین میرایی تجربی نوسانات موضعی شدیدی در گذر سطح سیال از بافل نشان می‌دهد.

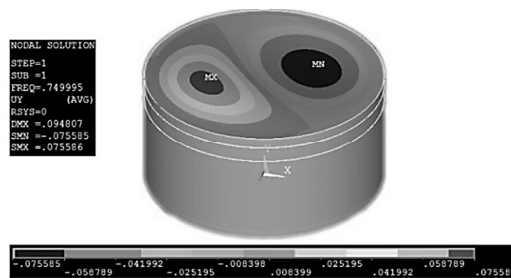
نظریه مایلز [۲۴] و نظریه ملکی [۹] در ناحیه نزدیک به کف مخزن (در فاصله حدود ۰/۵ متر از کف مخزن)، پیش‌بینی مناسبی از میزان میرایی ندارند و منحنی نظری پیش‌بینی می‌کند که میرایی افت کلی پیدا می‌کند، در صورتی که میرایی تجربی نه تنها کاهش پیدا نمی‌کند بلکه به صورت میانگین روند افزایشی از خود نشان می‌دهد. این امر به دلیل اثر میراگر بافل‌های عمودی در ترکیب با بافل‌های حلقوی است که در این نظریه‌ها نادیده گرفته شده است. بطور کلی نظریه ملکی [۹] مقدار میرایی کمتری از نظریه مایلز [۲۴] پیش‌بینی می‌کند که در ناحیه دور از بافل‌ها، به نتایج تجربی نزدیکتر است. در حالیکه در ناحیه نزدیک به بافل‌های حلقوی پیش‌بینی نظریه مایلز [۲۴] به نتایج تجربی نزدیکتر می‌باشد. با مقایسه میرایی تجربی و میرایی حداقلی موردنظر می‌توان ادعا کرد که مجموعه بافل‌ها الزام میرایی را ارضا نموده است. دلیل اختلاف زیاد بین نتایج نظری و تجربی در مکان حدود ۰/۵ متر، ناشی از عدم لحاظ نمودن اثر بافل‌های قطاعی بر میرایی بافل‌های حلقوی بالای قطاع در فرمول نظری است. بنابراین نتایج آزمایشگاهی به خوبی نشان می‌دهند که روابط نظری به دلیل عدم وجود رابطه‌ی مناسب جهت ترکیب اثر بافل‌های حلقوی و قطاعی، پیش‌بینی نادرستی از میزان میرایی در نقاط نزدیک به بافل‌های عمودی دارند. همچنین ترکیب بافل‌های حلقوی و قطاعی می‌تواند در افزایش میرایی و در نتیجه پایداری مخزن بسیار موثر باشد.



شکل ۱۰- منحنی نظری میرایی تلاطم در مخزن و میرایی تجربی در سطوح مختلف.

در آخر جهت شبیه‌سازی عددی پاسخ زمانی نوسانات سطح آزاد سیال و محاسبه‌ی عددی ضریب میرایی از نرم افزار Fluent استفاده شد. برای این منظور مخزن با جزئیات کامل در نرم افزار Fluent مدل‌سازی گردید. ناحیه داخلی مخزن به دو بخش هوا و سیال تقسیم

^۱ Over Estimation
^۲ Superposition principle



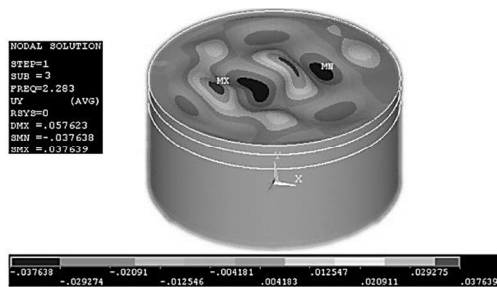
شکل ۷- شکل مود و فرکانس اول تلاطم سیال در مخزن استوانه‌ای.

مدل‌سازی تلاطم در شتاب گرانش متناظر به جاذبه سطح زمین انجام شده است. بنابراین فرکانس‌های طبیعی تئوری در شتاب گرانش محاسبه شده‌اند. شکل مودهای متناظر در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، فرکانس‌های طبیعی که از طریق مدل‌سازی عددی تعیین شده‌اند، نیز نشان داده شده است.



شکل ۸- شکل مود و فرکانس دوم تلاطم سیال در مخزن استوانه‌ای.

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین فرکانس‌های نظری و فرکانس‌های عددی وجود دارد.



شکل ۹- شکل مود و فرکانس سوم تلاطم سیال در مخزن استوانه‌ای.

۴-۲- بررسی میرایی

میرایی نظری ناشی از مجموعه بافل‌های میراگر طراحی شده، با توجه به معیار تامین میرایی $\eta/R \cong 0.02$ محاسبه شده است. میرایی تجربی نیز برای دامنه تلاطم سطح سیال $\eta \cong 0.02R$ محاسبه می‌گردد. به طور کلی، معادله کاهش لگاریتمی [24] برای محاسبه نرخ میرایی تجربی معادله (۱۸) مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\gamma = \frac{1}{2\pi k} \ln \left(\frac{\eta_j}{\eta_{j+k}} \right), \quad (18)$$

در این معادله η_j و η_{j+k} دامنه تلاطم در سیکل j ام و $j+k$ ام

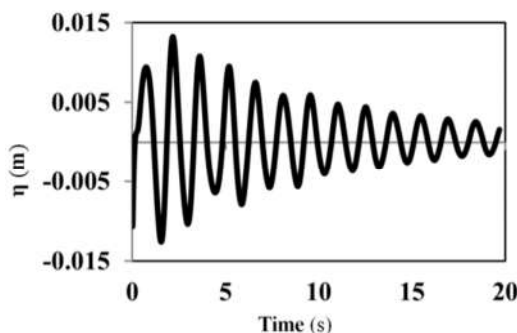
شده در شکل ۱۰ به صورت دو نقطه نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، میرایی محاسبه شده همگرایی فوق العاده‌ای با نتایج آزمایشگاهی دارد. به علاوه سیگنال زمانی نمایش داده شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ حاوی اطلاعات فرکانسی نوسانات سطح آزاد سیال می‌باشد. با اعمال تبدیل فوریه سریع^۵ و محاسبه فرکانس تلاطم مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از روش المان محدود (نرم افزار انسیس)، حجم محدود (نرم افزار Fluent) و فرکانس‌های تجربی، از تطابق بسیار بالایی برخوردار می‌باشند.

۵- نتیجه‌گیری

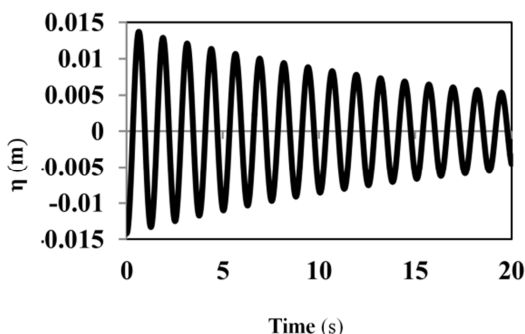
در این مقاله به بررسی تجربی تلاطم غیرخطی با در نظر گرفتن میرایی هیدرودینامیک بافل‌های میراگر پرداخته شد. همچنین پاسخ‌ها با نتایج نظری مانند روابط کاهش لگاریتمی برای شناسایی میرایی غیرخطی بافل‌ها مقایسه گردید. با استفاده از پاسخ غیرخطی ناشی از میرایی هیدرودینامیک و پاسخ خطی سیستم با میرایی لزجی معیاری برای معادل‌سازی میرایی بافل‌ها و میرایی لزجی الزام شده بدست آمد که با استفاده از این معیار می‌توان میرایی الزام شده را با استفاده از بافل‌های هیدرودینامیک تامین نمود. مهمترین نتایج مشاهده شده به ترتیب زیر خلاصه می‌گردد:

- فرکانس‌های تجربی در نقاطی که از بافل‌ها فاصله دارند (برای مثال بین دو بافل) از فرکانس تئوری کم‌ترند، اما در نقاطی که نزدیک به بافل هستند افزایش می‌یابند و حتی از فرکانس‌های نظری بیشتر شده‌اند.
- با کاهش ارتفاع سیال، فرکانس اول افزایش و فرکانس دوم کاهش می‌یابند. این تغییرات به دلیل اثر بافل‌های قطاعی می‌باشد.
- میرایی بر حسب ارتفاع سیال از کف مخزن به صورت دندان آزه‌ای تغییر می‌کند. میرایی تجربی به صورت تقریبی روند نظری را دنبال می‌کند.
- بطور کلی نظریه ملکی [۹] مقدار میرایی کم‌تری از نظریه مایلز [۲۴] پیش‌بینی می‌کند که در ناحیه دور از بافل‌ها، به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. در حالیکه در ناحیه نزدیک به بافل‌های حلقوی پیش‌بینی نظریه مایلز [۲۴] به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌باشد.
- در ارتفاع‌های نزدیک به کف مخزن و نرسیده به بافل‌های قطاعی، منحنی تئوری پیش‌بینی می‌کند که فرکانس افت کلی پیدا کند، در صورتی که فرکانس تجربی نه تنها کاهش پیدا نمی‌کند بلکه به صورت میانگین روند افزایشی از خود نشان داده است. این افزایش به اثر بافل‌های قطاعی به ارتفاع‌های بالاتر از خودش مربوط می‌شود که نظریه در تشخیص آن ضعف دارد.
- نرم افزارهای شبیه‌سازی عددی اجزاء محدود و حجم محدود به خوبی قادر به پیش‌بینی فرکانس‌ها و میرایی تلاطم بوده و استفاده از آن‌ها علاوه بر کاهش هزینه‌ی ناشی از آزمایش‌های تجربی، به میزان زیادی پیش‌بینی خصوصیات تلاطم را تسهیل می‌کند.
- نتایج حاصل از روش المان محدود (نرم افزار Ansys)، حجم محدود (نرم افزار Fluent) و فرکانس‌های تجربی، از تطابق بسیار بالایی برخوردار می‌باشند.

گردید تا با استفاده از مدل دو فاز VOF سطح آزاد سیال ایجاد شود و خواص سیال تعریف گردد. به علاوه جهت ایجاد تحریک خارجی هارمونیک از تابع نوشته شده به زمان C استفاده شد (UDF)^۱ و به کمک قابلیت مش دینامیکی این حرکت به مخزن اضافه گردید. همچنین در حلگر مسئله از افزایش زمانی غیر تکرار شونده (NITA) با استفاده از روش گام کسری^۲ (FSM) استفاده شد. دیگر پارامترهای مدل‌سازی عبارتند از: هندسه سه بعدی، دقت دو برابر^۳، مدل فشار پایه، گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه. مش‌بندی حجمی حوزه سه بعدی مسئله به کمک فاصله‌های برابر و ثابت صورت پذیرفته است. المان مورد استفاده از نوع چهار گره‌ای TGrid به کمک نرم افزار Gambit ساخته شد. در حدود ۹۷۰۰۰ المان برای مدل‌سازی با در نظر گرفتن زمان حل و دقت مدل‌سازی انتخاب شده است. زمان تحلیل مسئله حدود ۱۲ ساعت برای هر ۱۰۰۰ گام زمانی می‌باشد (تحلیل با کامپیوتر شخصی با هسته core i7). سپس مخزن تحت تحریک سینوسی با دامنه یک سانتی متر و فرکانس طبیعی اول قرار گرفت. بعد از حدود ۵۰ ثانیه تحریک قطع شده و نمودارهای زمانی برای مدت ۲۰ ثانیه استخراج شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی عددی نوسانات سطح آزاد سیال برای نقطه تماس سیال با دیواره، در دو عمق ۱/۵ و ۱/۵ متر، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ رسم شده است.



شکل ۱۱- تغییر ارتفاع سطح آزاد بر حسب زمان در عمق ۱/۵ متر.



شکل ۱۲- تغییر ارتفاع سطح آزاد بر حسب زمان در عمق ۱/۵ متر.

همانطور که مشاهده می‌گردد دامنه نوسانات به دلیل میرایی ناشی از بافل‌ها به سرعت کاهش می‌یابد. برای محاسبه نسبت میرایی از نسبت دامنه‌ها در زمان‌های مختلف و رابطه کاهش دامنه‌ی لگاریتمی (۱۸) استفاده شده است. سپس میرایی محاسبه شده برای دو عمق ذکر

^۱ User Define Function

^۲ Non-Iterative Time Advancement

^۳ Fractional Step

^۴ Double precision

^۵ Fast Furrier Transform

with baffles, Journal of Fluids and Structures, Vol. 44, No. 1, p. 97, 2014.

[14] Noorian M., Haddadpour H., Firouz-Abadi R., Investigation of panel flutter under the effect of liquid sloshing, Journal of Aerospace Engineering, Vol. 28, No. 2, p. 401, 2015.

[15] Ebrahimi M., Noorian M., Haddadpour H., Free vibration sloshing analysis in axisymmetric baffled containers under low-gravity condition, Microgravity Science and Technology, Vol. 27, No. 2, p. 97, 2015.

[16] Xue M.-A., Zheng J., Lin P., Yuan X., Experimental study on vertical baffles of different configurations in suppressing sloshing pressure, Ocean Engineering, Vol. 136, No. 1, p. 178, 2017.

[17] Arora S., Vasudevan S., Analysis of sloshing-induced loads on the fuel tank structure, Gteborg: Chalmers University of Technology (Diploma work-Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gteborg, Sweden, No: 2017: 77, 2017.

[18] Cho J., Lee S., Song M., Dynamic response characteristics of cylindrical baffled liquid storage tank to the baffle number, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, No. 12, p. 5979, 2019.

[19] Wang J., Wang C., Liu J., Sloshing reduction in a pitching circular cylindrical container by multiple rigid annular baffles, Ocean Engineering, Vol. 171, No. 1, p. 241, 2019.

[20] Sun Y., Zhou D., Wang J., An equivalent mechanical model for fluid sloshing in a rigid cylindrical tank equipped with a rigid annular baffle, Applied Mathematical Modelling, Vol. 72, No. 1, p. 569, 2019.

[21] Ebrahimi M., Noorian M., Javadi M., Sloshing Dynamics in 2D Multi-Baffled Containers Under Low-Gravity Conditions, Microgravity Science and Technology, Vol. 35, No. 2, p. 983, 2020.

[22] Zang Q., Liu J., Zhou Y., Lin G., On Investigation of Liquid Sloshing in Cylindrical Tanks With Single and Multiply Connected Domains Using Isogeometric Boundary Element Method, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 143, No. 2, p. 1, 2020.

[23] Yu L., Xue M.-A., Jiang Z., Experimental investigation of parametric sloshing in a tank with vertical baffles, Ocean Engineering, Vol. 213, No. 1, p. 107783, 2020.

[24] Miles J.W., Ring damping of free surface oscillations in a circular tank, Applied Mechanic, Vol. 25, No. 2, p. 274, 1958.

[25] Bauer H.F., Theory of the fluid oscillations in a circular cylindrical ring tank partially filled with liquid, National Aeronautics and Space Administration, 1960.

- با مقایسه میرایی تجربی و میرایی الزام شده می‌توان ادعا کرد که مجموعه بافل‌ها الزام میرایی را ارضا نموده است.

۶- نمادها

C_r	عرض نسبی بافل (m)
d	فاصله بافل از سطح آزاد (m)
D	نرخ اتلاف انرژی (J/s)
E	انرژی کلی موج تلاطم (J)
g	شتاب گرانش (m/s^2)
h	ارتفاع بافل (m)
H	ارتفاع سیال (m)
j, k	نماد مودال
r	مختصات فیزیکی
r_b	عرض بافل (m)
R	شعاع مخزن (m)
t	زمان (s)
$\ddot{x}_0$	دامنه شتاب عرضی (m/s^2)
z	مولفه عرضی
γ	نرخ میرایی تلاطم
η	ارتفاع سطح آزاد سیال (m)
θ	مختصات فیزیکی
λ	مقادیر ویژه
ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
φ	تابع پتانسیل (m^2s^{-1})

۷- مراجع

- [1] Ibrahim, R.A., Liquid sloshing dynamics: theory and applications, Cambridge University Press, 2005.
- [2] Budiansky B., Sloshing of liquids in circular canals and spherical tanks, Journal of the Aerospace Sciences, Vol. 27, No. 3, p. 161, 1960.
- [3] Ibrahim R.A., Pilipchuk V., Ikeda T., Recent advances in liquid sloshing dynamics, 2001.
- [4] Strandberg, L., lateral stability of road tankers., MAIN REPORT., APPENDICES, Vol. 1, No. 138a, Monograph, 1978.
- [5] Evans D., McIver P., Resonant frequencies in a container with a vertical baffle, Journal of Fluid Mechanics, , Vol. 175, No. 1, p. 295, 1987.
- [6] Cho J., Lee H., Kim K., Free vibration analysis of baffled liquid-storage tanks by the structural-acoustic finite element formulation, Journal of Sound and Vibration, Vol. 258, No. 5, p. 847, 2002.
- [7] Modaressi-Tehrani K., Rakheja S., Stiharu I., Three-dimensional analysis of transient slosh within a partly-filled tank equipped with baffles, Vehicle System Dynamics, , Vol. 45, No. 6, p. 525, 2007.
- [8] Firouz-Abadi R., Haddadpour H., Noorian M., Ghasemi M., A 3D BEM model for liquid sloshing in baffled tanks, International journal for numerical methods in engineering, Vol. 76, No. 9, p. 1419, 2008.
- [9] Maleki A., Ziyaeifar M., Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles, Journal of Sound and Vibration Vol. 311, No. 1-2, p. 372, 2008.
- [10] Eswaran M., Saha U., Maity D., Effect of baffles on a partially filled cubic tank: Numerical simulation and experimental validation, Computers & Structures, Vol. 87, No. 3-4, p. 198, 2009.
- [11] Goudarzi, M. Sabbagh-Yazdi, S. Marx W., Investigation of sloshing damping in baffled rectangular tanks subjected to the dynamic excitation, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 4, p. 1055, 2010.
- [12] Akyıldız H., Ünal N.E., Aksoy H., An experimental investigation of the effects of the ring baffles on liquid sloshing in a rigid cylindrical tank, Ocean Engineering, Vol. 59, No.1, p. 190, 2013.
- [13] Hasheminejad S.M., Mohammadi M., Jarrahi M., Liquid sloshing in partly-filled laterally-excited circular tanks equipped