

مطالعات تجربی و عددی فرکانس و میرایی حرکت نوسانی مایع درون یک مخزن

جواد خالصی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۲۳)

محسن گودرزی^۱

دانشکده مهندسی

دانشگاه بوعلی سینا همدان

چکیده

مخازن مایع در صنعت کاربرد زیادی داشته و تکانش ناگهانی این مخازن باعث ایجاد امواج سطحی و تلاطم مایع در آنها می‌شود. در این تحقیق، با ساخت یک وسیله آزمایشگاهی، شامل بستر ثابت، پاندول اعمال ضربه، و یک میز متحرک با کورس حرکت کوچک، از طریق اعمال ضربه ناگهانی به یک مخزن شیشه‌ای حاوی آب که روی میز متحرک نصب شده، فرکانس و نرخ میرایی نوسانات سطح آزاد سیال درون مخزن اندازه‌گیری شده‌اند. در ضمن برای یک مدل واقعی، معادلات حاکم بر جریان با سطح آزاد در طی زمان در یک مخزن نیمه پر به هنگام اعمال یک ضربه جانبی به روش کسر حجمی مایع حل شده‌اند. ضربه وارده به مخزن، از طریق تعریف یک تابع زمانی برای سرعت اولیه در نرم‌افزار مربوطه به عنوان شرط اولیه اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهند که فرکانس نوسان‌های امواج سطحی تابع قدرت ضربه نبوده و با افزایش ارتفاع سیال، به سمت مقدار ثابتی افزایش می‌یابند. پارامتر میرایی نیز، با افزایش ارتفاع مایع به سمت یک مقدار ثابت کاهش می‌یابد. این دو نشان‌دهنده مؤثر نبودن لایه‌های مایع تحتانی مخزن و سکون نسبی آنها در ارتفاع‌های بزرگ است.

واژه‌های کلیدی: جریان با سطح آزاد، ضربه، فرکانس نوسانات، روش کسر حجمی سیال

Experimental and Numerical Studies on Frequency and Damping of Liquid Oscillation in a Storage Tank

M. Goodarzi

Mech. Eng. Dep't.

Hamedan Bu-Ali Sina Univ.

J. Khalesi

Mech. Eng. Dep't.

Iran Univ. of Sci. & Tech.

(Received: 11 Jan., 2010; Accepted: 14 May, 2011)

ABSTRACT

Liquid tanks are frequently used in industrial applications. The liquid free surfaces oscillate when they are subjected to impulses. An experiment was set up to measure the frequency and damping rate of the free surface oscillations caused by different impulses. In addition, a full scale study was numerically performed, using volume of fluid (VOF) method to investigate the details of the flow field. The impulses were applied via initial velocity boundary condition. The results show that the frequency of the free surface oscillations do not depend on the impulse value and is increased up to a certain value for higher liquid heights. Contrary to the oscillation frequency, the damping rate is decreased up to a certain value as the liquid height was increased. Both these results showed that, there was a stagnant sub-region which could not affect the surface oscillation.

Keywords: Free Surface Flow, Impulse, Oscillation Frequency, VOF Method

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): m.goodarzi@basu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: javadkhalesi@mecheng.iust.ac.ir

فهرست علائم

F	کسر حجمی سیال
g	شتاب ثقل، m/s
h	ارتفاع آب درون مخزن، m
l	پهنا یا قطر مخزن، m
P	فشار استاتیک، Pa
t	زمان، sec
\vec{V}	بردار سرعت

علائم یونانی

μ_{eff}	لزجت مؤثر، N.s/m ²
π	عدد پی
ρ	چگالی سیال، Kg/m ³
ω	فرکانس دورانی، 1/s
γ	پارامتر میرایی

۱- مقدمه

مطالعه بارگذاری دینامیکی اجسام در صنعت از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از تجهیزات صنعتی، مخازن نگهداری و یا حمل مایعات هستند. وجود سطح آزاد در این مخازن، باعث می‌شود که هنگام حرکت مخزن، به علت اینرسی مایع درون آن تلاطم سطحی در این مایعات به وجود آید. این تلاطم، توزیع فشار درون سیال را که عامل اصلی تنش‌های موجود در جداره مخزن می‌باشد، به هم زده و بنابراین تنش‌های مذکور بر حسب زمان تغییر می‌کنند. تغییر این تنش‌ها، باعث بروز پدیده خستگی در جداره مخزن می‌شود که حتی در پاره‌ای از موارد می‌تواند به فروپاشی جداره مخزن منتهی شود. دامنه نوسانات القایی، فرکانس نوسانات، و تداوم آنها از جمله کمیت‌هایی هستند که میزان مخرب بودن این جریان‌های نوسانی را مشخص می‌کنند.

عوامل متفاوتی می‌توانند موجب حرکت مایع درون مخازن شوند. لرزش ناگهانی زمین، شتاب ناگهانی یک تانکر حمل سوخت و حرکت القایی ناشی از برخورد امواج دریا به کشتی نفت‌کش از جمله این عوامل هستند. با توجه به سهم عمده مخازن در صنعت، جهت حفظ و تقویت آنها در مقابل اثرات مخرب نوسان‌های سیال درون آنها، کارهای تجربی و عددی خاصی صورت گرفته است. کشور ما نیز یکی از

کشورهای نفت‌خیز دنیا بوده و مهمترین صنعت راهبردی کشور، صنعت نفت می‌باشد. وجود مخازن نفت و توجه به قرارگیری کشور در منطقه زلزله‌خیز جهان، لزوم مطالعه و بررسی رفتار این مخازن را آشکار می‌سازد.

در ایران مطالعات محدودی در این زمینه صورت گرفته است. در این تحقیق، یکی از معمول‌ترین محرک‌های خاص در مدل‌سازی پدیده لرزش زمین- یعنی ضربه جانبی- مورد توجه قرار گرفته و تأثیر آن بر رفتار نوسانی سیال درون یک مخزن بررسی شده است.

زمانی که یک محرک خارجی، حرکتی در یک مخزن حاوی مایع ایجاد می‌کند، سطح آزاد آن تغییر شکل یافته و توزیع فشار در آن نسبت به حالت ایستا تغییر می‌کند. به‌خصوص اگر نیروی محرک خارجی بر حسب زمان متغیر باشد، سطح آزاد مایع درون مخزن حالت نوسانی پیدا می‌کند. فرکانس و مودهای نوسانی این پدیده، در محاسبه و تخمین نیروهای وارد بر جداره مخزن اهمیت بسیاری دارد. کسب اطلاعات کیفی از این پدیده می‌تواند در به‌کارگیری روش‌های کمی دقیق‌تر بسیار مفید باشد. به‌همین دلیل، در اولین مطالعاتی که در این زمینه صورت گرفت، این سیستم ارتعاشی به صورت یک سیستم دینامیکی خطی شامل جرم و فنر با مشخصات ثابت و بدون تأثیر میرایی ناشی از لزجت آب در نظر گرفته شد [۱]. مدل خطی، فرکانس طبیعی نوسانات سطح آزاد آب درون مخزن را پیش‌بینی می‌کرد. شریمالی^۱ و جانگید^۲ [۲] به کمک تجهیزات آزمایشگاهی و بررسی نتایج حاصل از تحریک دوجانبه مخزن، رفتار غیرخطی و میرایی ناشی از عوامل هندسی و رژیم جریان سیال را گزارش کردند. این رفتار غیرخطی، عدم توانایی مدل دینامیکی خطی را در مسائل پیچیده نشان می‌داد.

با پیشرفت فن‌آوری و ظهور رایانه‌های پرسرعت، در کنار پیشرفت روش‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان‌های سیال با سطح آزاد، محققان از این روشها برای مطالعه پدیده تلاطم در مخازن بهره گرفتند. این مدل‌سازی‌ها در ابتدا برای شناسایی پدیده تلاطم مورد استفاده قرار گرفت [۳]. در این مدل‌سازی‌ها برای اندازه‌گیری توزیع فشار لحظه‌ای بر جداره

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \vec{V}. \quad (2)$$

مدل اغتشاشی به کار رفته در روش عددی مدل $k-\varepsilon$ استاندارد [۸] بوده که جهت اختصار از ذکر جزئیات آن صرف نظر شده است.

در سطح آزاد دو شرط دینامیکی و سینماتیکی باید به کار گرفته شوند. شرط دینامیکی مبین تساوی تنش‌های مماسی و عمودی بر سطح آزاد، در غیاب تأثیر کشش سطحی می‌باشد. شرط سینماتیکی نیز بدون پدیده تبخیر سطحی، مبین عدم عبور جرم از سطح آزاد بین دو فاز گاز و مایع است. به عبارت دیگر این شرط، تساوی سرعت ذرات مایع و گاز را در سطح آزاد معرفی می‌کند. برای اعمال شرط مرزی سینماتیکی در سطح مشترک دو سیال، از یک معادله انتقال اسکالر استفاده می‌شود که پس از حل میدان جریان و محاسبه سرعت‌ها به حل آن اقدام می‌شود. کسر حجمی سیال موجود در هر سلول به عنوان اسکالر این معادله انتقالی در نظر گرفته می‌شود. شکل برداری معادله انتقال کسر حجمی به صورت زیر است:

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) F = 0. \quad (3)$$

شرط مرزی دینامیکی در مراحل حل عددی به صورت محاسبه میدان فشار و تنش‌های برشی در کل میدان حل از جمله در سلول‌های محاسباتی مجاور سطح آزاد با در نظر گرفتن خواص فیزیکی سیال به صورت سهم وزنی هر جز از دو سیالی که در آن سلول قرار می‌گیرند، اعمال می‌شود. سهم وزنی هر جز سیال در سلول شامل دو سیال متناسب با کسر حجمی سیال خواهد بود. برای مخزن مایع نیمه‌پر، کسر حجمی مایع، یک و کسر حجمی هوا، صفر در نظر گرفته می‌شود.

شرط اولیه برای تمامی کمیت‌های وابسته متناظر با حالت سکون مخزن و مایع درون آن، که بالای سطح آزاد مایع هوا با فشار اتمسفریک وجود دارد بوده است. در نرم‌افزار فلوئنت می‌توان ارتفاع مایع درون مخزن را در حالت ابتدایی مشخص کرد. ضربه وارده به مخزن، معادل یک سرعت اولیه در بازه زمانی کوچک در نظر گرفته شده است و برای اعمال

مخزن، جزئیات نوسان‌های سطح آزاد و الگوی جریان تحت تأثیر ضربه مورد بررسی قرار گرفت. با شناسایی رفتار نوسانی و توزیع فشار متناوب بر روی جداره‌های مخزن، محققانی جهت کاهش اثرات مخرب ناشی از خستگی جداره، به‌کارگیری سطوح گسترش یافته درون مخازن را برای افزایش سرعت میرایی دامنه نوسانات پیشنهاد نموده و از طریق آزمایش و شبیه‌سازی عددی تأیید کردند [۴-۶]. به‌عنوان مثال، قرار دادن صفحاتی در مخزن در محدوده‌ای که مایع قرار دارد می‌تواند تأثیر زیادی بر میرایی نوسانات تلاطم ایجاد شده در مخزن داشته باشد.

یکی از مهم‌ترین محرک‌های خارجی که باعث تلاطم در مخازن شده و آن را به یک سیستم ارتعاشی تبدیل می‌کند، تکان ناشی از شتاب لحظه‌ای بدنه مخزن است. پس از اعمال تکان، مایع درون مخزن با فرکانس خاصی شروع به نوسان کرده و به علت اثرات اصطکاکی، دامنه نوسان القایی کاهش می‌یابد. فرکانس نوسانات و میزان میرایی آنها به هندسه مخزن و خواص فیزیکی سیال بستگی دارد.

در این تحقیق، روش‌های تجربی و عددی تلاطم القایی ناشی از تکانش لحظه‌ای یک مخزن بررسی شده است. برای روش تجربی، یک دستگاه آزمایشی توسط محققین ساخته شد. در روش عددی هم به کمک روش کسر حجمی مایع^۱، جریان با سطح آزاد درون یک مخزن شبیه‌سازی شد [۷]. با قابلیت تعریف یک تابع زمانی^۲ در نرم‌افزار فلوئنت^۳، ضربه جانبی وارد بر مخزن به صورت یک سرعت اولیه وارد شرایط مرزی شده و سپس معادلات حاکم بر این جریان در طی زمان به صورت صریح حل شدند [۷].

۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی در روش عددی

معادلات حاکم بر جریان با سطح آزاد همان معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و یک مدل اغتشاشی هستند. شرایط مرزی نیز در تمامی مرزها به جز در سطح مشترک دو سیال به صورت متعارف هستند که برای مخزن نیمه‌پر شرط عدم لغزش در روی دیوارها در نظر گرفته می‌شود. شکل برداری معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به صورت زیر هستند:

1 - Volume of Fluid (VOF)

2- User Define Function (UDF)

3- FLUENT

میز بدون حرکت باقی می‌ماند. در ضمن در ابتدای محل قرارگیری میز، جایی در نظر گرفته شده که پاندول درست در حالت قائم به میز برخورد کرده و پس از آن پاندول متوقف می‌شود. لذا با توجه به زاویه رهاسازی پاندول، ضربه وارد به میز دستگاه بر حسب کیلوگرم نیوتن قابل اندازه‌گیری است. ابعاد مخزن شیشه‌ای $40 \times 20 \times 40$ سانتیمتر است و یک نوار مدرج در کنار آن قرار داده شده تا بتوان ارتفاع آب متلاطم را در کنار دیواره مخزن اندازه‌گیری کرد. دقت اندازه‌گیری نوار مدرج، $0/5$ سانتیمتر است. لذا خطای اندازه‌گیری دامنه نوسانات نیز در همین حد می‌باشد. دوربین فیلم‌برداری در روی یک سه پایه با ارتفاع قابل تنظیم قرار گرفته است. دوربین دیجیتال از نوع معمولی بوده و حساسیت آن مطابق با دوربین‌های آماتور اتوماتیک می‌باشد. در مراحل مختلف آزمایش که ارتفاع آب درون مخزن تغییر می‌کند باید پایه‌های دوربین به گونه‌ای تنظیم شوند که سطح آزاد آب درون مخزن، درست مقابل لنز دوربین قرار گیرد.

در روند انجام آزمایش‌ها هر مرتبه که پاندول رها شده و به میز حامل مخزن برخورد نمود، از نوسانات سطح آزاد آب توسط دوربین فیلم‌برداری شده و فیلم تهیه شده به رایانه انتقال یافت. به کمک یک نرم‌افزار، فیلم تهیه شده با دور کند نمایش داده شده و از طریق شمارش نوسانات و ثبت زمان نوسانات شمارش شده، فرکانس اندازه‌گیری شد. این کار چند مرتبه و با شمارش در زمان‌های متفاوت برای یک آزمایش صورت گرفت تا در صورت متغیر بودن فرکانس در طی میرا شدن آنها مشخص شود که البته تمام شمارش‌ها به یک نتیجه رسید. زمان‌سنج دوربین با دقت $0/1$ ثانیه از مخزن فیلم‌برداری می‌کرد. بنابراین خطای اندازه‌گیری زمان که برای محاسبه پریود نوسانات سطح آزاد آب به کار می‌رفت در حد $0/05$ ثانیه بوده است. در ضمن دامنه نوسانات نیز در طی زمان از روی فیلم تهیه شده اندازه‌گیری می‌شد.

۴- بررسی نتایج

تامسون^۱ در کتاب تئوری هیدرودینامیک [۹] فرکانس طبیعی نوسانات مایع در یک مخزن مستطیلی را در غیاب نیروهای مستهلک کننده با رابطه زیر پیش‌بینی می‌کند:

آن در نرم‌افزار فلونتت از یک ماکرو که به زبان C نوشته شده استفاده شده است. در تعیین سرعت اولیه ناشی از اعمال ضربه، فرض شده که نیرویی در یک صدم ثانیه به کل مجموعه مخزن حاوی آب و هوای بالای آب وارد شود.

۳- شرح دستگاه و روش آزمایش

شکل ۱ نمایی از دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد که توسط نگارندگان در کارگاه آموزشی دانشگاه با امکانات اندک ساخته شده است.

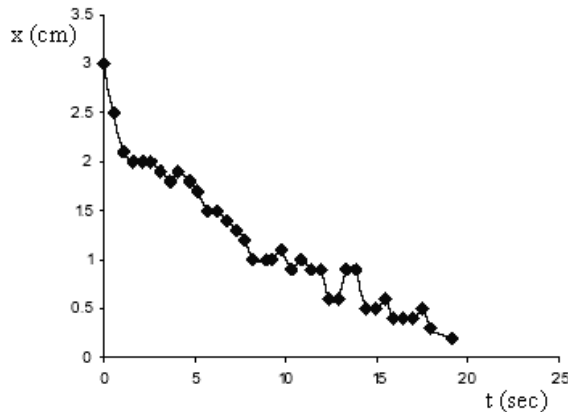


شکل (۱): نمای دستگاه آزمایش.

این دستگاه از پنج قسمت اصلی تشکیل شده است:

- ۱- بستر و پایه دستگاه،
 - ۲- میز متحرک دستگاه،
 - ۳- پاندول ضربه،
 - ۴- مخزن آب و
 - ۵- دوربین فیلم‌برداری الکترونیکی و سه پایه آن.
- بستر و پایه دستگاه در محل به صورت تراز نصب و ثابت می‌شود. این بستر شامل دو پایه عمودی برای نگهداری محور پاندول ضربه است. پاندول ضربه شامل یک میله و یک صفحه فلزی متصل به آن است که می‌توان صفحات تخت دیگری را به آن نصب کرده و اندازه ضربه وارد به مخزن را افزایش داد. در محل محور پاندول از یک نقاله استفاده شده تا بتوان زاویه رهاسازی پاندول را اندازه‌گیری کرد. میز متحرک توسط بلبرینگ‌هایی قابلیت حرکت روی بستر را دارد. طول مسیر حرکت میز متحرک ۲ سانتیمتر است. پس از رسیدن میز به انتهای مسیر خود، یک زبانه فلزی حرکت میز را قفل کرده و

تغییرات تأثیرگذار است. لازم به ذکر است که نمونه‌های آزمایش با ارتفاع خیلی کم و یا ضربات بسیار شدید که منجر به تشکیل موج‌های شکسته می‌شدند از نتایج قابل بررسی و مقایسه با نتایج عددی حذف شدند. زیرا شکسته شدن امواج سطحی و ریزش آنها باعث تولید امواج متعددی با اختلاف فازهای متغیر در سطح می‌شد که فرض رفتارخطی نوسانات سطح آزاد را بی‌اعتبار می‌کرد.



شکل (۲): روند تغییرات سطح آب درون مخزن در مجاورت دیواره بر حسب زمان.

جدول (۱): مقادیر فرکانس نوسانات ω (rad/s) برای ارتفاع‌های مختلف آب.

h (Cm) mV (Kg.m)	۱۲	۱۷	۲۳
۴/۶۷	۱۱/۹۴	۱۲/۰۶	۱۲/۱۲
۴/۹۷	۱۱/۹۴	۱۲/۱۲	۱۲/۱۹
۵/۲۸	۱۱/۹۴	۱۲/۱۹	۱۲/۱۹
۵/۵۸	۱۱/۹۴	۱۲/۱۹	۱۲/۱۹
۵/۸۸	۱۱/۹۴	۱۲/۱۹	۱۲/۱۹

فرکانس اندازه‌گیری شده برای چند ضربه و ارتفاع‌های مختلف آب در جدول ۱ ثبت شده‌اند. نتایج این جدول نشان می‌دهند که فرکانس نوسانات، به قدرت ضربه وارد به مخزن وابسته نبوده و فقط تابع ارتفاع آب درون مخزن می‌باشد. با افزایش ارتفاع مایع، فرکانس نوسانات نیز به علت افزایش اینرسی مایع افزایش یافته ولی نرخ افزایش فرکانس با ارتفاع،

$$\omega_n = \sqrt{g \frac{\pi}{l} \tanh\left(\frac{\pi}{l} h\right)}, \quad (۴)$$

که در آن، h ارتفاع مایع و l پهناى مخزن می‌باشند. این رابطه، بعددار بوده و بهتر است به صورت زیر بی‌بعد گردد:

$$\omega_n \sqrt{\frac{l}{g}} = \sqrt{\pi \tanh\left(\frac{\pi}{l} h\right)}. \quad (۵)$$

طبق این رابطه، فرکانس طبیعی نوسانات در مخزن به ارتفاع مایع و عرض مخزن ارتباط دارد. لذا در یک مخزن مشخص با عرض ثابت، تنها عامل تغییر فرکانس نوسانات، ارتفاع مایع درون مخزن می‌باشد. در ضمن از نظر تئوری هیدرودینامیک که در آن اثرات استهلاکی در نظر گرفته نمی‌شود، جنس مایع در فرکانس نوسانات دخالت ندارد. از نظر تحلیل ارتعاشات خطی میرا شونده، لزجت مایع در اندازه پارامتر میرایی نوسانات (ζ) تأثیر دارد. علاوه بر این، لزجت مایع فرکانس نوسانات میرا شونده را طبق رابطه زیر کاهش می‌دهد [۱۰]:

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (۶)$$

البته، لازم به توضیح است که اصولاً رفتار هیدرودینامیک سیستم مخازن مایع همراه با سطح آزاد غیرخطی است، اما برای نوسانات کوچک و به خصوص با فرکانس کم، این رفتارها به رفتارهای خطی نزدیک می‌شوند. لذا در این تحقیق، موارد آزمایش و شبیه‌سازی شده در فرکانس‌های کم و با فرض رفتار خطی بررسی شده‌اند.

ضربات وارده به مخزن بر حسب اندازه حرکت پاندول هنگام برخورد به میز دستگاه آزمایش تعیین شدند. نمونه‌ای از تغییرات ثبت شده بالا آمدن سطح آزاد آب در مجاورت دیواره سمت چپ مخزن بر حسب گذر زمان در شکل ۲ برای ارتفاع ۱۷ سانتیمتر و ضربه متناظر به اندازه حرکت ۵/۵۸ کیلوگرم‌متر نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در برخی زمان‌ها، سطح آب بالا آمده از مقدار زمان قبلی آن بیشتر است. علت این امر، فعالیت مودهای دیگری از نوسانات سطح آزاد آب هستند که البته در مقایسه با مود نوسانی اول دامنه بسیار کوچکی دارند اما در این زمان‌ها به علت هم‌فاز بودن با مود نوسان اول، باعث تشدید موضعی نوسان مود اول شده‌اند. البته اندکی خطا که ناشی از خطای لنز دوربین و لرزش‌های جانبی دستگاه آزمایش است نیز در ثبت این

می‌شود که تأثیر ضربه در به حرکت درآوردن لایه‌های تحتانی ستون مایع، با تأخیر زمانی بیشتری نسبت به لایه‌های بالایی همراه بوده است. به عبارت دیگر لایه‌های سیال در مجاورت کف مخزن در ابتدا به حرکت در نمی‌آیند و پس از چند تلاطم، سطح آزاد این ناحیه متأثر از این تلاطم به حرکت در می‌آید. تشکیل خطوط جریان بیشتر در ثانیه‌های چهارم و پنجم، نشان‌دهنده این مطلب است.

در شکل‌های ۶-۵ کانتورهای کسر حجمی و خطوط جریان برای ضربه ۲,۰۰۰ کیلو نیوتن مشابه قبل نشان داده شده‌اند. این شکل‌ها نیز مانند دو شکل قبل هستند با این تفاوت که بر اثر بزرگ شدن ضربه اعمالی، دامنه اولیه نوسان سطح آزاد بیشتر شده و در ضمن تأخیر زمانی متأثر شدن لایه‌های مجاور کف مخزن نسبت به حالت قبل، که ضربه کوچک‌تر بود، کمتر شده است. همین امر باعث شده که مکانیزم تنش‌های اصطکاکی در این حالت زودتر در کل میدان فعال شده و نوسانات با سرعت بیشتری نسبت به حالت قبل میرا شوند.

برای حالت سه‌بعدی، مخزن به صورت استوانه مدل شد. ارتفاع مایع درون مخزن، مقادیر مختلفی انتخاب شد که در این متن تنها ارتفاع مشابه حالت دوبعدی توضیح داده شده است. شکل ۷ کسر حجمی سیال یا به عبارتی سطح آزاد جریان را در ثانیه‌های اول و چهارم پس از اعمال ضربه‌های ناشی از نیروهای ۲,۰۰۰، ۳,۰۰۰، ۴,۰۰۰ و ۵,۰۰۰ کیلونیوتن در صفحه اعمال ضربه نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که افزایش اندازه ضربه، باعث افزایش دامنه اولیه نوسان سطح آزاد شده، اما دوره تناوب نوسان سطح آزاد، به اندازه ضربه اعمالی وابسته نیست. زیرا دامنه‌های نوسانی با مقادیر متفاوت در زمان‌های یکسان، الگوی مشابه دارند. بنا بر این می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس یا پررود نوسانات ناشی از ضربه‌های اعمال شده به سیستم مخزن، به اندازه ضربه وابسته نیست. اندازه‌گیری نتایج عددی، پررود نوسانات تمام حالات توضیح داده شده را که دارای ارتفاع یکسانی هستند تقریباً یک مقدار $\frac{2}{3}$ ثانیه نشان داد. این پررود، متناظر با فرکانس دورانی $\frac{2}{73}$ است. برای مخازن دو و سه‌بعدی توصیف شده رابطه (۴) مقدار فرکانس دورانی را $\frac{2}{77}$ پیش‌بینی می‌کند.

نزولی بوده و با افزایش ارتفاع آب فرکانس نوسانات به سمت عدد $\frac{12}{19}$ رادیان بر ثانیه میل می‌کند. در حقیقت، زمانی که ارتفاع مایع افزایش می‌یابد بخش زیرین مایع در نوسانات سطح آزاد دخالت نداشته و ساکن باقی می‌ماند. لذا این بخش از مایع، مانند یک حجم صلب فرضی عمل می‌کند.

مدل آزمایشی از ابعاد کوچکی برخوردار بوده و جزئیات درونی جریان را نشان نمی‌داد. به همین علت، یک مخزن با ابعاد واقعی در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی استوانه‌ای به صورت عددی شبیه‌سازی شد. مسئله نوسان مایع درون مخزن تحت تأثیر ضربه‌های مختلف، برای اعماق متفاوت مایع در دو حالت توصیف شده بررسی شد. در هر حالت، مطالعه شبکه جهت حصول اطمینان از عدم وابستگی دقت جواب‌های حاصله در یک بازه زمانی کم انجام شد. سپس با انتخاب شبکه بهینه، حل عددی در بازه‌های زمانی بزرگ‌تر صورت گرفت. شبکه مورد استفاده در هر مورد، یک شبکه سازمان‌یافته با تمرکز لازم در مجاورت دیواره‌های مخزن و سطح آزاد مایع بوده است. در این متن جهت اختصار تنها جزئیات حاصل شده برای یک نمونه از کلیه موارد شبیه‌سازی شده ارائه شده و بقیه به صورت فرکانس بی‌بعد بر حسب ارتفاع بی‌بعد شده با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. این حالت، مخزنی با ارتفاع ۸ و عرض ۴ متر است که دو سوم ارتفاع کل مخزن، از آب پر شده است. در حالت سه‌بعدی، قطر مخزن ۴ متر می‌باشد.

در حالت دوبعدی، از میان ضربه‌های وارده به مخزن، ضربه‌های اعمالی توسط نیروهای ۴۰۰ و ۲,۰۰۰ کیلو نیوتن مورد توجه قرار گرفته است. لازم به توضیح است که در حل عددی، ضربه وارد به مخزن با نیروی مولد ضربه مشخص شده است.

شکل ۳ کانتورهای کسر حجمی سیال را در لحظه صفر و لحظات ۱، ۲، ۳، ۴، و ۵ ثانیه پس از اعمال ضربه ۴۰۰ کیلونیوتن، که از حل عددی حاصل شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت کوچک بودن ضربه، دامنه نوسان سطح آزاد مایع در مقایسه با ارتفاع آن بسیار کوچک می‌باشد.

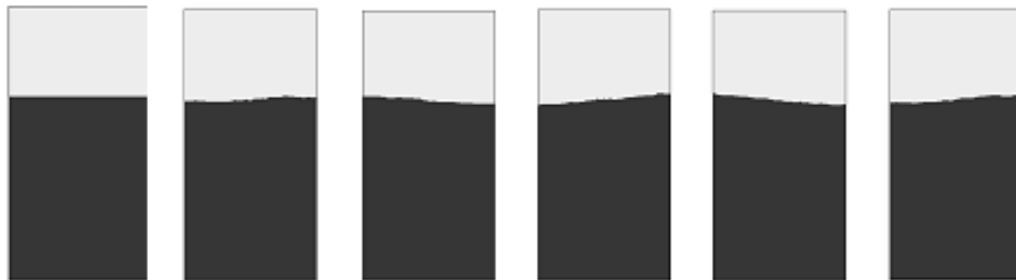
شکل ۴ خطوط جریان را در پنج ثانیه بعد از اعمال ضربه و فقط در ستون مایع نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه



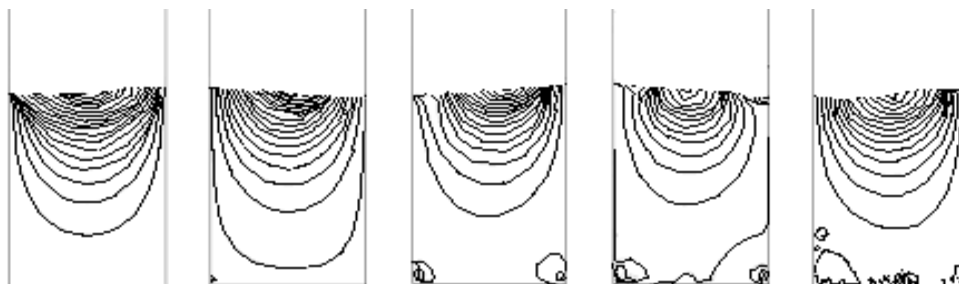
شکل (۳): سطح آزاد مایع در لحظات مختلف در اثر اعمال ضربه ناشی از نیروی ۴۰۰ کیلونیوتن، از چپ به راست لحظات صفر، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ ثانیه.



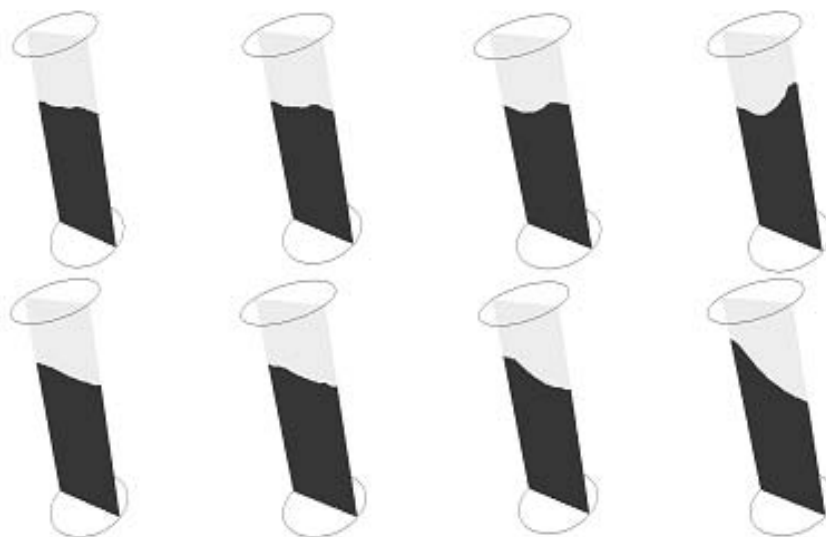
شکل (۴): خطوط جریان در لحظات مختلف در اثر اعمال ضربه ناشی از نیروی ۴۰۰ کیلونیوتن، از چپ به راست لحظات ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ ثانیه.



شکل (۵): سطح آزاد مایع در لحظات مختلف در اثر اعمال ضربه ناشی از نیروی ۲,۰۰۰ کیلو نیوتن، از چپ به راست لحظات صفر، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ ثانیه.



شکل (۶): خطوط جریان در لحظات مختلف در اثر اعمال ضربه ناشی از نیروی ۲,۰۰۰ کیلو نیوتن، از چپ به راست لحظات ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ ثانیه.



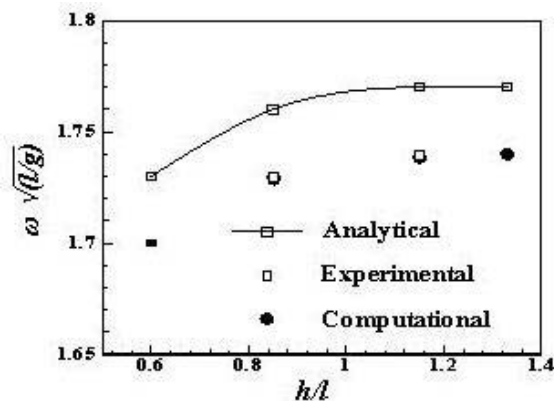
شکل (۷): شکل سطح آزاد مایع متلاطم شده تحت تأثیر ضربات مختلف، از چپ به راست ضربات ناشی از نیروهای ۲,۰۰۰، ۳,۰۰۰، ۴,۰۰۰ و ۵,۰۰۰ کیلو نیوتن، سطر بالا ثانیه اول و سطر دوم ثانیه چهارم.

شکل ۸ نمونه‌ای از نتایج تجربی و عددی را برای یک حالت آزمایش شده در ثانیه دوم پس از اعمال یک ضربه بزرگ نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر شکل، سطح آزاد در حل عددی در نمای مقابل نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که تطابق نسبتاً کاملی بین دو شکل وجود دارد. برای مقایسه نتایج عددی و تجربی، فرکانس‌های اندازه‌گیری شده بر حسب ارتفاع آب به صورت بی‌بعد به همراه نتایج تحلیلی ناشی از رابطه (۴) در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.

در تمام موارد تجربی و عددی، فرکانس‌ها از مقدار تحلیلی کوچکتر هستند. همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، علت این تفاوت وجود لزجت و تنشهای برشی در سیال حقیقی است. اصولاً در سیستم‌های نوسانی و اینرسیال وجود میراکننده باعث کوچکتر بودن فرکانس میرا شونده نسبت به فرکانس نامیرا یا فرکانس طبیعی سیستم می‌شود. طبق رابطه (۶) وجود پارامتر میرایی که یک عدد مثبت و البته کوچکتر از یک است، عبارت زیر رادیکال را به یک عدد کوچکتر از یک تبدیل کرده و بنابراین فرکانس میرا شونده از حاصل ضرب فرکانس طبیعی سیستم نوسانی در یک ضریب کوچکتر از یک بدست می‌آید. البته در تحلیل مبتنی بر رابطه (۶)، اثرات غیرخطی که عموماً از پیچیدگی‌های



شکل (۸): مقایسه شکل سطح آزاد مایع متلاطم شده حاصل از روش تجربی و حل عددی تحت تأثیر ضربه ناشی از نیروی ۵,۰۰۰ کیلو نیوتن در ثانیه دوم.



شکل (۹): فرکانس بی بعد بر حسب ارتفاعهای مختلف آب.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با ساخت یک وسیله آزمایشگاهی، شامل بستر ثابت، پاندول اعمال ضربه، و یک میز متحرک با کورس حرکت کوچک، از طریق اعمال ضربه ناگهانی به یک مخزن شیشه‌ای حاوی آب که روی میز متحرک نصب شده، فرکانس و نسبت میرایی نوسانات سطح آزاد سیال درون مخزن اندازه‌گیری شده‌اند.

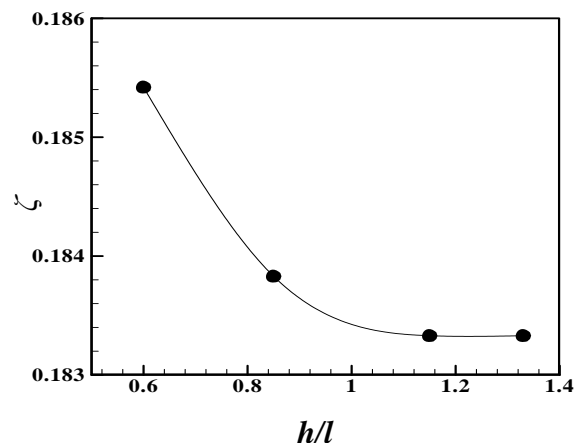
نتایج به‌دست آمده نشان داد که فرکانس نوسانات مایع درون مخزن با ابعاد و مایع معین، فقط تابع ارتفاع مایع درون آن بوده و مستقل از دامنه ضربه اعمالی به مخزن می‌باشد. این فرکانس، با افزایش ارتفاع مایع به سمت مقدار ثابتی افزایش می‌یابد. پارامتر میرایی نیز با افزایش ارتفاع مایع به سمت یک مقدار ثابت، کاهش می‌یابد. این دو مطلب، نشان‌دهنده مؤثر نبودن لایه‌های تحتانی مایع مخزن و سکون نسبی آنها در ارتفاع‌های بزرگ هستند.

مراجع

1. Abramson, H.N. "The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers", NASA, SP106, 1966.
2. Shrimali, M.K. and Jangid, R.S. "Non-linear Seismic Response of Base-Isolated Liquid Tank to Bi-directional Excitation", Nuclear Eng. and Design, Vol. 217, No's. 1-2, pp. 1-20, 2002.
3. Kim, Y. "Numerical Simulation of Sloshing Flows with Impact Load", Appl. Ocean Research, Vol. 23, No. 1, pp. 53-62, 2001.
4. Hakan, A.N. and Unal, E. "Sloshing in a Three-dimensional Rectangular Tank: Numerical Simulation and Experimental Validation", Ocean Eng., Vol. 33, No. 16, pp. 2135- 2149, 2006.
5. Mitra, S. and Sinhamahapatra, K.P. "Slosh Dynamics of Liquid Filled Containers with Submerged Components, Using Pressure-Based Finite Element Method", J. Sound and Vibration, Vol. 304, No's. 1-2, pp. 361-381, 2007.
6. Jin, Q., Li, X., Sun, N., Zhao, J., and Guan, J. "Experimental and Numerical Study on Tuned Liquid Damper for Controlling Earthquake Response of Jacket Offshore Platform", Marine Structures, Vol. 20, No. 4, pp. 238-254, 2007.
7. Hirt, C.W. and Nichols, B.D. "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", J. Comp. Phys., Vol. 39, No. 1, pp. 201- 225, 1981.
8. Launder, B.E. and Spalding, D.B. "The Numerical Computations of Turbulent Flows", Comp. Meth.

هندسی به‌وجود می‌آیند دیده نمی‌شود. در مخازن بررسی شده در این تحقیق، پیچیدگی‌های هندسی از قبیل سطوح گسترش یافته وجود نداشته و به همین دلیل، روند نمودارهای شکل ۹ تقریباً به موزات یکدیگر است. به‌علاوه شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع آب، فرکانس نوسانات به سمت عدد ثابتی میل می‌کند. این مطلب نشان‌دهنده وجود لایه‌های تقریباً ساکن در کف مخزن در این موارد است. خطوط جریان ضعیف در شکل‌های ۴ و ۶ نیز این مطلب را نشان می‌دهند. همچنین این شکل نشان می‌دهد که نتایج عددی حاصل شده به درستی روند تغییرات نتایج تجربی را دنبال می‌کند.

با فرض رفتار خطی برای نوسانات مایع و معلوم بودن ω_n ، که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود و اندازه‌گیری ω به روش تجربی یا عددی، پارامتر میرایی از رابطه (۶) قابل محاسبه است. در شکل ۱۰ تغییرات پارامتر میرایی بر حسب ارتفاع آب نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع آب، مقدار این پارامتر کاهش یافته و البته به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. این نتیجه نیز عدم تأثیر لایه‌های مجاور کف مخزن را بر فرکانس نوسان سطح آزاد و الگوی جریان در ارتفاع‌های بیشتر تأیید می‌کند.



شکل (۱۰): پارامتر میرایی بر حسب ارتفاع‌های مختلف آب.

in Appl. Mech. and Eng., Vol. 3, No. 2, pp. 269-289, 1974.

9. Milne Thomson, L.M. "Theoretical Hydrodynamics", 5th Ed. Macmillan Press, London, 1968.
10. Nikkhah-Bahrami, M., "Theory of Vibration and Its Application in Engineering", Vol. 1, Tehran Univ. Pub., 2nd Ed., Tehran, 1990 (In Persian).