



Experimental and Numerical Investigating the Effect of Baffle on the Shallow Water Sloshing in a Moving Tank using OpenFOAM Software

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Tahmasebi M.K.¹ MSc,
Shamsoddini R.*¹ PhD,
Abolpour B.² PhD

How to cite this article

Tahmasebi M.K., Shamsoddini R., Abolpour B. Experimental and Numerical Investigating the Effect of Baffle on the Shallow Water Sloshing in a Moving Tank using Open-FOAM Software. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(2):353-359.

¹Mechanical Engineering Faculty, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

²Chemical Engineering Faculty, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran
Phone: -
Fax: +98 (34) 41522000
shamsoddini@sirjantech.ac.ir

Article History

Received: November 7, 2018

Accepted: May 19, 2019

ePublished: February 01, 2020

ABSTRACT

The motion of the liquid free surface in a container (sloshing phenomenon) inserts a momentum on the container walls. This makes a great disorder in the movement of the carrier vehicle or inserts a large force and momentum on the container walls. The reason for this phenomenon is the establishment of destructive waves and hydrodynamic forces. The side effects of this phenomenon in various industries, such as ship industries carrying liquid fuels, liquid fuel rocket industries, fuel tanks or water tanks, increase the importance of predictions of the behaviors of this phenomenon. One way of controlling is to use baffles or plates in the transverse direction of the tank. In this study, the governing equations on this phenomenon have been solved using the OpenFOAM software. This software solves partial differential equations using the finite volume method, which by default considers geometry to be three dimensional. In order to solve the two-phase flow, a modified volume of the fluid model (VOF) is applied and the moving mesh model is used for the movement of the container body. In the VOF method, the phases are expressed as a fraction of one (volume fraction). To determine this parameter, based on the continuity equation, a differential equation is regulated and solved. For the turbulent flow model, a modified $k-\varepsilon$ model is used by considering the effects of free-surface flows. Also, an experimental model of a real moving liquid container has been used for validation of the predictions of the presented simulation. The results show that the experimental and numerical results are in good accordance. In addition, the results show that using vertical baffles up to 50% can reduce the fluctuations caused by this phenomenon.

Keywords Sloshing; Turbulent Flow; Baffle; Openfoam

CITATION LINKS

[1] A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with twodimensional ... [2] The boundary element method applied to the analysis of two-dimensional nonlinear sloshing ... [3] Nonlinear analysis of liquid motion in a container subjected to forced pitching ... [4] Nonlinear finite element analysis of large amplitude sloshing flow in two-dimensional ... [5] Finite element analysis of two-dimensional nonlinear sloshing problems in random ... [6] Numerical simulation of sloshing waves in a 3D tank based on a finite element ... [7] Numerical study on slosh-induced impact pressures on three-dimensional prismatic ... [8] Numerical simulation of sloshing in rectangular tank with VOF based on unstructured ... [9] Development of a DEM-VOF model for the turbulent free-surface flows with particles and its application to stirred mixing ... [10] An experimental and CFD analysis of sloshing in a ... [11] Effect of natural frequency modes on sloshing phenomenon in a rectangular ... [12] Investigation of the effects of baffles on the shallow water sloshing in a rectangular tank using a 2D turbulent ISPH ... [13] Lateral sloshing in partially filled elliptical tanker trucks using a trammel ... [14] Nonlinear modeling of liquid sloshing in a moving rectangular ... [15] Sloshing motions in excited ... [16] Finite-element computation of wave impact load due to a violent ... [17] Numerical studies on effects of slosh coupling on ship motions and derived slosh ... [18] Three-dimensional liquid sloshing in a tank with ... [19] Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid ... [20] Effect of baffles on a partially filled cubic tank: Numerical simulation and experimental ... [21] Effect of dual vertical porous baffles on sloshing reduction in a swaying rectangular ... [22] Numerical simulation of parametric liquid sloshing in a horizontally baffled rectangular ... [23] Evaluating the performance of the two-phase flow solver ... [24] Benchmark numerical simulations of segmented two-phase flows in microchannels using the Volume of Fluid ... [25] A continuum method for modeling surface ... [26] The numerical computation of turbulent ... [27] Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with ...

مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی اثر بافل روی تلاطم سطحی آب کم‌عمق در یک مخزن متحرک با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM

محمدکاظم طهماسبی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

رحیم شمس‌الدینی PhD*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

بهادر ابول‌پور PhD

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

چکیده

بر اثر ایجاد جابه‌جایی سازه یک مخزن مایع و انتقال این حرکت به مایع، حرکت سطح آزاد مایع داخل آن با به وجود آوردن موج (پدیده اسلاشینگ) باعث وارد شدن ضربات فشاری بر دیوارهای کناری و جانبی مخزن می‌شود. این پدیده با به وجود آوردن موج‌های پر انرژی و مخرب و همچنین ایجاد نیروهای هیدرودینامیکی با دامنه نوسانات بالا باعث اعمال نیروی نوسانی و گاه غیرقابل کنترل بر دیوارهای جانبی و موجب اختلال در حرکت عادی وسیله نقلیه حمل‌کننده مایع می‌شود که اهمیت بررسی و ارایه راهکارهای پیشگیری این پدیده را نشان می‌دهد. وسعت مواجهه با این پدیده در صنایعی دیگر همچون صنایع موشکی با سوخت مایع، کشتی‌های نفت‌کش یا حامل سوخت‌ها و مواد مایع، تانکرهای ماشین‌های سوخت‌رسان (مایع) یا مخازن آب، ایجاب می‌کند با پیش‌بینی رفتار آن اقدامات لازم برای کنترل پدیده اسلاشینگ صورت بگیرد. یکی از راه‌های کنترلی استفاده از بافل یا صفحاتی در راستای عرضی مخزن است. در این مقاله معادلات حاکم بر این پدیده در نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM حل شده است. این نرم‌افزار معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی را با استفاده از روش حجم محدود حل می‌کند که به صورت پیش‌فرض هندسه را سه‌بعدی در نظر می‌گیرد. برای حل جریان دو فاز از مدل اصلاح‌شده حجم‌های مایع (VOF) استفاده شده و از مدل مش متحرک هم برای حرکت بدنه مخزن استفاده شده است. در روش VOF، مقدار فازها به صورت کسری از یک (کسر حجمی) بیان می‌شود که برای تعیین آن براساس معادله پیوستگی، یک معادله دیفرانسیل تنظیم و حل می‌شود. برای مدل جریان مغشوش از مدل اصلاح شده $k-\epsilon$ با در نظر گرفتن اثرات جریان‌های سطح آزاد استفاده شده است. همچنین مدلی تجربی از یک مخزن واقعی برای تایید پیشگویی‌های شبیه‌سازی ارایه شده است. بررسی‌ها، نشان از انطباق قابل قبول نتایج تجربی و عددی دارند. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از بافل‌های عمودی تا ۵۰٪ می‌توان نوسانات ناشی از این پدیده را کاهش داد.

کلیدواژه‌ها: اسلاشینگ، جریان آشفته، بافل، OpenFOAM

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۲۹

*نویسنده مسئول: shamsoddi@sirjantech.ac.ir

۱- مقدمه

پدیده اسلاشینگ (Sloshing) به حرکت سطح آزاد مایع در یک مخزن گفته می‌شود. این پدیده که بر اثر حرکت متناوب مخزن نگهداری مایع با نیروی خاجی پدید می‌آید، باعث می‌شود که حجم قابل توجه‌ای از مایع در سطح آزاد آن به حرکت درآید. در صورت نیمه‌پر بودن این مخزن، بررسی آن بسیار پیچیده‌تر خواهد شد.

امروزه، بررسی و پیش‌بینی رفتار این پدیده به خاطر سطح وسیع کاربرد آن در تاسیسات تامین آب، نفت و گاز یا در صنایع نفت، پتروشیمی و نیروگاه‌ها برای ذخیره‌سازی انواع مواد مایع مانند روغن، مایع گاز طبیعی و صنایع کشتیرانی مانند حمل سوخت‌های مایع یا هوافضا مانند موشک‌های دارای سوخت مایع یا مخازن آب در شهرها که در اثر زلزله به ارتعاش در می‌آید یا مخازن و ماشین‌های حمل سوخت که حامل میعانات نفتی و غیرنفتی است، بسیار حائز اهمیت است. یک مکانیزم کنترل این پدیده استفاده از بافل درون مخزن است.

تا کنون تحقیقات مهمی در زمینه پدیده اسلاشینگ صورت گرفته است. تحقیقات اولیه عمدتاً بر اساس نظریه جریان بالقوه *فالتینزن*^[1] که مرز مدل‌سازی را توسعه داده است، انجام شده است. *ناکایاما* و *واشیزو*^[2] بر اساس همین نظریه به مطالعه پدیده اسلاشینگ در یک مخزن مستطیلی تحت تاثیر فشار اتمسفر و حرکات زمین پرداخته‌اند. آنها همچنین به تجزیه و تحلیل این پدیده به‌وسیله شبیه‌سازی دوبعدی المان محدود یک مایع تحت تاثیر حرکات زمین پرداخته‌اند^[3]. محققانی همچون *چو* و *لی*^[4] و *وانگ* و *خو*^[5] نیز این کار را برای مطالعه اثر حرکات تصادفی توسعه داده‌اند. به دلیل محدودیت نظریه جریان بالقوه و همچنین پیچیدگی‌های سطح آزاد مایع در حرکات بسیار شدید و نوسانی همچون زلزله، مدل‌سازی دوبعدی این مخازن بر اساس این نظریه نمی‌تواند شبیه‌سازی مناسبی از حرکت سیال را نشان دهد^[6]. *کیم* و *همکاران*^[7] پدیده اسلاشینگ را با آزمایشاتی روی یک مدل مقیاسی انجام دادند. *مینگ* و *دون*^[8] نیز روش جدیدی برای شبیه‌سازی این پدیده در یک مخزن در حال نوسان که در آن سطح مشترک دو فاز به‌صورت ناپیوسته عمل می‌کرد، پیشنهاد کردند. *وو* و *همکاران*^[9] رفتار سطح آزاد مایع را در یک مخزن اختلاط با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM شبیه‌سازی کرده‌اند. آنها در این مطالعه به بررسی اثر مش متحرک و همچنین به‌کارگیری روش VOF (حجم اصلاح‌شده مایع بین فازها) مساله، پرداخته‌اند. *برار* و *سینگ*^[10] با استفاده از یک مدل دوبعدی و دو فاز با استفاده از نرم‌افزار COMSOL به بررسی اثر اشکال مختلف بافل‌های کنترل‌کننده نوسانات پرداختند. *جانگ* و *همکاران*^[11] با استفاده از مدل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی به بررسی اثر مدهای فرکانسی طبیعی در پدیده تلاطم آب در مخازن پرداختند. *شمس‌الدینی* و *ابول‌پور*^[12] با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار به بررسی اثر بافل‌ها در پدیده تلاطم آب در آب‌های کم عمق پرداختند. *سالم* و *همکاران*^[13] کنترل پدیده اسلاشینگ در مخزن نسبتاً پر را با استفاده از پاندول بیضی‌شکل مطرح و با استفاده از یک مدل المان محدود بررسی کردند. *سیلیبی* و *آکیلدیز*^[14] پدیده اسلاشینگ غیرخطی را در داخل مخزن مستطیلی نیمه‌پر با فرض مایع همگن، ایزوتروپیک، لزج، نیوتنی و به‌صورت محدود تراکم‌پذیر مورد بررسی قرار دادند. *فراندس*^[15] یک مدل اختلاف محدود غیرخطی کامل را بر اساس معادلات جریان غیرلزج توسعه داد که در آن مخزن هم

سطح مشترک دو فاز با استفاده از حل معادله پیوستگی برای مایع به‌دست می‌آید [23]:

$$\frac{\partial \alpha_{liq}}{\partial t} + \frac{\partial (u_i \alpha_{liq})}{\partial x_i} + \frac{\partial (u_r \alpha_{liq} \alpha_{gas})}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

جمله سوم رابطه فوق تنها در سطح مشترک نمایان می‌شود. سرعت نسبی دو فاز در سطح مشترک (u_r) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [23, 24]:

$$u_r = n_f \min \left(C\gamma \frac{|\phi|}{|S_f|}, \max \frac{|\phi|}{|S_f|} \right) \quad (2)$$

که n_f بردار نرمال سطح، ϕ شار سطحی، S_f مساحت سطح سلول و $C\gamma$ ضریبی بین $^\circ$ و $^\circ$ است. بنابراین، برای محاسبه کسر حجمی فاز مایع در سطح مشترک، باید سرعت سیال در این سطح مشخص باشد. همان‌طور که در ادامه نشان داده می‌شود، برای تعیین این سرعت، باید کسر حجمی در سلول‌های محاسباتی مشخص باشد. از این رو برای تعیین همزمان این دو پارامتر، یک پروسه سعی و خطا نیاز است که با به‌کارگیری یک حلقه محاسباتی قابل تعیین هستند. پس از تعیین کسر حجمی مایع در هر سلول، کسر حجمی فاز گاز مطابق $\alpha_{gas} = 1 - \alpha_{liq}$ حساب می‌شود. با داشتن این کسرهای حجمی می‌توان چگالی مخلوط به‌صورت $(\rho = \alpha_{gas} \rho_{gas} + \alpha_{liq} \rho_{liq})$ و لزجت $(\mu = \alpha_{gas} \mu_{gas} + \alpha_{liq} \mu_{liq})$ سیال در جریان دو فازی را در هر المان به‌صورت خطی محاسبه کرد [25]. با توجه به شدت توربولانس جریان در تانکرهای بدون کنترل پدیده اسلاشینگ، از مدل $k-\epsilon$ جهت مدل‌سازی این جریان مغشوش استفاده شده است. از این رو با استفاده از معادلات زیر می‌توان مقادیر ϵ و k را در هر گره محاسبه نمود [26]:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \left(\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

پس از تعیین ϵ و k ، می‌توان ویسکوزیته آشفتگی را با استفاده از رابطه $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ محاسبه نمود. توجه شود که k انرژی جنبشی جریان مغشوش، ϵ نرخ اتلاف آشفتگی و C_μ ، $C_{1\epsilon}$ ، $C_{2\epsilon}$ و σ_k و σ_ϵ ثوابت مربوط به مدل جریان مغشوش هستند که به‌ترتیب برابر با ۰/۹، ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۱/۳ و ۱ هستند [27]. δ_{ij} نیز دلتای کرونیکر است. حال با داشتن لزجت آشفتگی، می‌توان با استفاده از فرم ساده‌شده معادله ممنوم حاکم بر مساله [25] به محاسبه اجزاء بردار سرعت در هر گره محاسباتی پرداخت:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho g_i + \sigma \kappa \frac{\partial \alpha_{liq}}{\partial x_i} \quad (5)$$

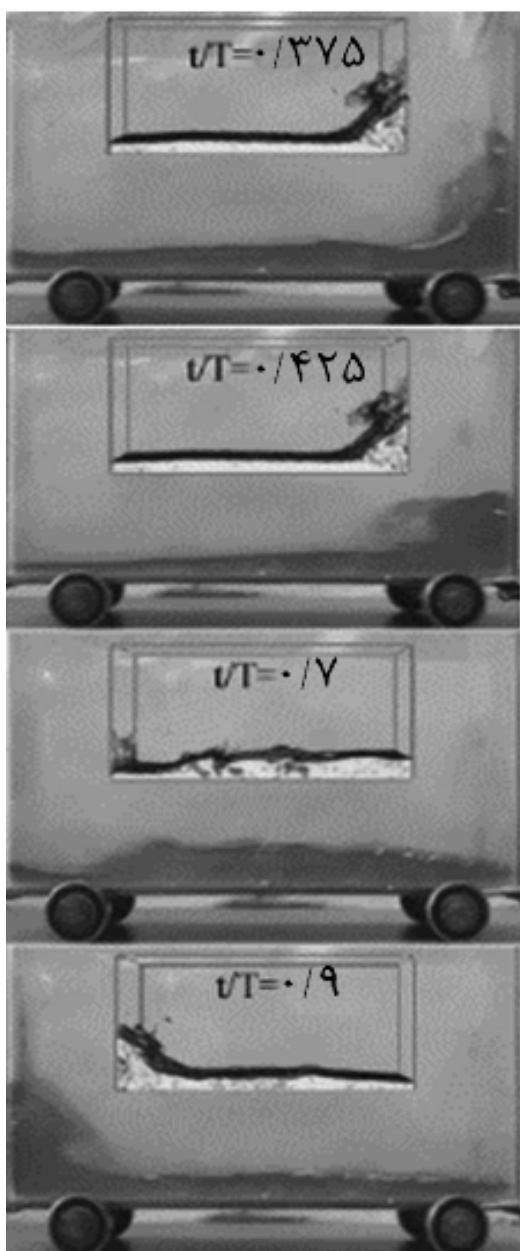
به‌صورت افقی و هم به‌صورت عمودی تحریک می‌شد. کپانگ و همکاران [16] نیروی برخورد موج به سازه را با اعمال شرایط دقیق سطح آزاد غیرخطی و در مقایسه با آنچه که توسط فرمول موریسون پیش‌بینی شده، به‌دست آوردند. به‌تازگی، ساریپیلی و سن [17] به بررسی اثر نیروهای پدیده اسلاشینگ بر حرکت کشتی با استفاده از یک الگوریتم حل همزمان پرداختند. یکی از راه‌های کنترل پدیده اسلاشینگ استفاده از بافل (مانع) است. از جمله این کارها می‌توان به کارلیو و لین [18] اشاره کرد. ایشان یک مدل عددی برای مطالعه سه‌بعدی مایع در یک مخزن با بافل در نظر گرفتند. زو و لین [19] با بسط عددی یک مدل سه‌بعدی به بررسی اثر بافل و شکل آن بر پدیده اسلاشینگ پرداختند. /سواران و همکاران [20] با استفاده از یک مدل VOF، امواج ناشی از پدیده اسلاشینگ را در یک مخزن بافل‌دار و یک مخزن بدون بافل مورد بررسی قرار دادند. چو و کیم [21] به بررسی اثر بافل متخلخل بر پدیده اسلاشینگ پرداختند. ساناپالا و همکاران [22] به بررسی اثر بافل در تحریک هارمونیک افقی و عمودی سازه بر پدیده اسلاشینگ پرداختند و محل بهینه بافل را تخمین زدند.

هدف اصلی این مطالعه، بررسی اثر بافل‌ها روی کنترل پدیده اسلاشینگ در مایعات با حجم کم در مخزن‌های مکعب‌مستطیلی در حال حرکت نوسانی است. برای بررسی رفتار این پدیده، مدلی تجربی از مخزن ساخته شده و با همان ابعاد و ویژگی‌ها در نرم‌افزار OpenFOAM (یک نرم‌افزار متن باز که روی C^{++} توسعه یافته و معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی را با استفاده از روش حجم محدود، جهت برنامه‌نویسی شی‌گرا، حل می‌کند) به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. در این پروژه یک مخزن مکعب‌مستطیل در ابعاد $14 \times 41 \times 20$ سانتی‌متر و سطح مایع با ارتفاع $2/5$ سانتی‌متر در دو حالت بدون بافل و با بافل (با بافل‌های سه تایی، دو تایی و تکی در دو ارتفاع مختلف و ۱ و $2/2$ سانتی‌متر) مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت نوسان خطی اعمال‌شده جهت حرکت تناوبی این مخزن در نرم‌افزار $3/14$ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های مدل‌سازی، دقت این شبیه‌سازی را تایید خواهد کرد. در نهایت اثر بافل‌ها بر کنترل پدیده اسلاشینگ در این مخزن بررسی می‌شود.

۲- مدل‌سازی

روش VOF، مرز مشترک میان دو فاز تراکم‌ناپذیر و غیرحل‌شونده را به‌وسیله مجموعه‌ای از معادلات بقاء جرم و ممنوم برای هر دو فاز مدل‌سازی می‌کند. این معادلات به‌وسیله کسر حجمی (α) به هر یک از این دو فاز مرتبط می‌شود [23]. در این مطالعه تنها دو فاز مایع (آب با α_{liq}) و گاز (هوا با α_{gas}) تعریف می‌شود. بنابراین، تنها سه امکان وجود دارد که در هر المان محاسباتی اتفاق افتد: $\alpha_{liq} = 0$ که به معنی این است که المان مورد نظر عاری از مایع است، $\alpha_{liq} = 1$ که به معنی این المان پر از مایع است و $0 < \alpha_{liq} < 1$ که یعنی هر دو فاز درون این المان محاسباتی موجود هستند. رفتار دینامیکی

که این شکل‌ها نشان می‌دهند، مدل ارایه شده توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی رفتار سطح آزاد مایع درون این مخزن دارد. نحوه حرکت آب درون مخزن بدون بافل (در حال حرکت افقی و نوسانی) در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در اثر این حرکت مخزن، مایع درون مخزن به صورت پیوسته همراه با مخزن به سمت چپ و راست حرکت کرده و به محض رسیدن به یک دیواره عمودی مخزن به آن ضربه زده، از آن بالا رفته و مجدداً به سمت مقابل باز می‌شود. اینگونه حرکت آزادانه سیال بسیار شدید بوده و موجب وارد آمدن نیرویی شدید در بازه زمانی کوتاه به دیواره‌های عمودی مهارکننده سیال در انتهای حرکت آن می‌شود. این حرکت‌های رفت و برگشتی متناوباً تکرار شده و در مواردی مرتباً بر دامنه آنها افزوده می‌شود.



شکل ۲) نتایج تجربی و پیشگویی‌های مدل از تلاطم سطح آزاد مایع درون مخزن بدون بافل در بازه‌های زمانی مختلف از حرکت آن

u_i المان بردار سرعت در سه جهت x, y, z و P فشار، g شتاب جاذبه، σ کشش سطحی سیال و K انحنای سطح مشترک است که با استفاده از کسر حجمی فاز مایع اصلاح شده ($\frac{\sum \alpha_{sk} s_k}{s_k}$) $\tilde{\alpha}_{liq.} =$ که α_{sk} مقدار درون‌یابی خطی شده از کسر حجمی فاز مایع در سطح شماره k و s مساحت این سطح از المان محاسباتی مربوطه است [24]، قابل محاسبه است $(K = \nabla \cdot (\frac{\nabla \tilde{\alpha}_{liq.}}{|\nabla \tilde{\alpha}_{liq.}|}))$ [27]. سطوح جانبی و کف مخزن از نوع دیواره جامد و سطح فوقانی این مخزن مکعب‌مستطیل از نوع اتمسفر تعریف شده‌اند. در این محاسبات از روش حل صریح جهت حل معادلات دیفرانسیل به روش عددی استفاده شده است.

۳- آزمایش

جهت ارزیابی مدل ارایه شده، یک سیستم آزمایشگاهی متشکل از یک موتور الکتریکی با قابلیت تنظیم دور بر دقیقه، یک سیستم تبدیل حرکت چرخشی موتور به حرکت رفت و برگشتی و یک جعبه شیشه‌ای با ابعاد $14 \times 41 \times 20$ سانتی‌متر (محتوی $2/5$ سانتی‌متر ارتفاع آب ساکن مرئی شده توسط رنگ قرمز) که روی یک شاسی قرار گرفته و روی چهارچرخ نصب شده، طراحی و ساخته شده است. اجزاء این سیستم در شکل ۱ ارایه شده است.



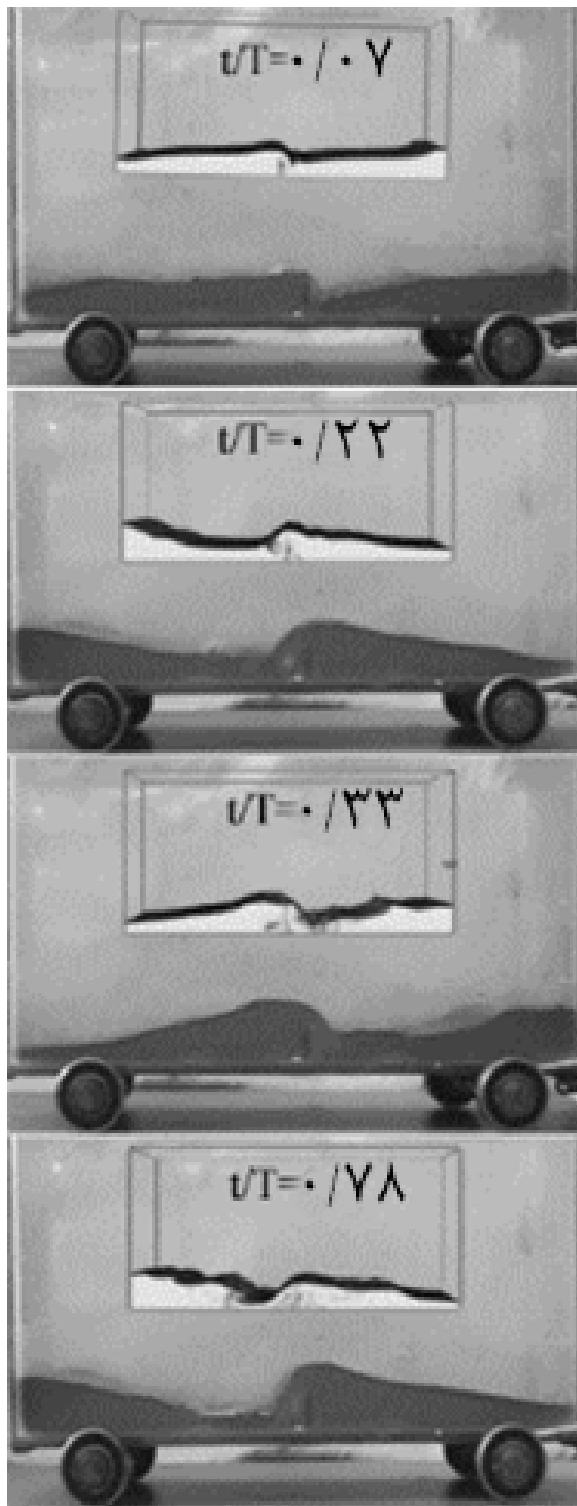
شکل ۱) تصویری از سیستم آزمایشگاهی ساخته شده

از یک دوربین فیلم‌برداری با کیفیت ۲۱ مگاپیکسل نیز برای تصویربرداری از تغییرات سطح آزاد آب درون مخزن استفاده شده است. سه حالت در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است: ۱- مخزن بدون بافل، ۲- مخزن دارای یک بافل در مرکز صفحه کفی آن و ۳- مخزن دارای دو بافل با فواصل یک سوم طول کف مخزن از دیواره‌ها و همچنین از یکدیگر. طول تمامی بافل‌های اشاره شده $2/2$ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در این مجموعه از آزمایش‌ها، حرکت رفت و برگشتی مخزن به صورت تابعی سینوسی $(x = A \sin(\frac{2\pi t}{T}))$ با دامنه $(A = 0.45 \text{ m})$ و دوره تناوبی $(T = 1 \text{ s})$ مشخص در راستای افق تعریف شده است.

۴- نتایج و بحث

شکل‌های ۲ تا ۴ مقایسه‌ای میان نتایج پیش‌بینی شده از مدل عددی و تصاویر گرفته شده از آزمایش‌ها در بازه‌های زمانی مشخص از تلاطم مایع درون مخزن، با شرایط مختلف از نقطه نظر تعداد بافل‌های نصب شده، دارای حرکت رفت و برگشتی است. همان طور

همان طور که انتظار می‌رفت، با افزایش تعداد بافل‌ها تغییرات فشار در پایه دیواره مهارکننده حرکت مایع در انتهای بازه حرکتی‌اش کاهش یافته است. نمودار ۱ نشان می‌دهد که در این نقطه، تغییرات فشار برای حالت با یک بافل حدود ۲۵٪ و برای حالت با دو بافل حدود ۵۰٪ نسبت به حالت مشابه بدون بافل مطالعه‌شده، محدودتر شده است.



شکل ۳) نتایج تجربی و پیشگویی‌های مدل از تلاطم سطح آزاد مایع درون مخزن با یک بافل در بازه‌های زمانی مختلف از حرکت آن

این ضربات می‌توانند موجب ایجاد ممنوم شدید در وسیله و ایجاد مشکل در کنترل آن شود. در چنین شرایطی، ممکن است وسایل نقلیه حامل سیال در اثر این نیروهای ناخواسته و پیش‌بینی‌نشده، تعادل حرکتی خود را از دست داده و دچار سانحه و مشکل شود. به‌خصوص که این نیروها در پیچ‌ها، ترمزهای شدید و تغییرات ناگهانی به‌طور تشدیدشونده، افزایش می‌یابند. یکی از راهکارهای مهم و اساسی در این مسائل استفاده از بافل‌ها (موانع) است. پیش‌بینی می‌شود که با وجود بافل‌ها، دامنه حرکتی سیال کنترل شده که نتیجه آن کاهش نوسانات فشار در سیال است. لذا در این مطالعه میزان تقلیل این نیروها بر اثر اضافه‌شدن بافل به ساختار مخزن مطالعه می‌شود.

میزان کنترل جریان آزاد سیال درون مخزن در اثر اضافه‌شدن یک بافل عمودی در وسط صفحه تحتانی مخزن (کف مخزن) در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، افزوده‌شدن این بافل اثر قابل توجهی بر کنترل دامنه نوسانات جریان سیال دارد که نتیجه آن یکنواخت‌شدن و کاهش میزان تلاطم سیال درون مخزن تحت همان حرکت نوسانی است. بنابراین، افزودن این بافل به مخزن، به‌صورت قابل توجهی از میزان نیروهای واردشده از طرف مایع به دیواره‌های مخزن می‌کاهد. محاسبه میزان دامنه حرکتی سیال روی دیواره‌های عمودی در حضور مانع در مقایسه با حالتی که مانع وجود ندارد، نشان از کاهش بیش از ۴۰ درصدی میزان دامنه نوسانات سیال روی دیواره مخزن دارد که نشان از تاثیر مثبت حضور بافل در کنترل قابل ملاحظه میزان نوسانات در داخل مخازن حمل سیال دارد.

حال انتظار می‌رود که افزوده‌شدن تعداد بافل‌ها در کف این مخزن، از شدت تلاطم جریان آزاد مایع درون مخزن و در نتیجه ارتفاع مایع بالارونده در انتهای حرکت خود در کناره دیواره‌ها، بیشتر بکاهد. بنابراین در ادامه به بررسی اثر دو بافل نصب‌شده بر کف مخزن با فواصل یکسان از یکدیگر و همچنین دیواره‌های چپ و راست مخزن پرداخته شده است. شکل ۴ نمایشی از تلاطم سطح آزاد آب درون مخزن در اثر این حرکت نوسانی است. همان طور که انتظار می‌رفت، مخزن مجهز به دو بافل عملکرد بسیار بهتری نسبت به کنترل آشفتگی سطحی این جریان آزاد مایع داشته است. در این حالت میزان دامنه نوسانات به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته که نشان از افزایش قابل ملاحظه سطح کنترل نوسانات با استفاده از افزایش تعداد بافل‌ها دارد.

به‌منظور یک بررسی دقیق‌تر و کمی در رابطه با میزان اثر نصب بافل‌ها در کاهش شدت تلاطم آب درون مخزن و همچنین شدت ضربات وارده به دیواره‌های عمودی مهارکننده حرکت آب در انتهای حرکت نوسانی آن، در نمودار ۱ مقایسه‌ای میان تغییرات زمانی فشار یکی از چهارگوشه کف مخزن برای شرایط مختلف از لحاظ تعداد بافل، ارائه شده است. همان طور که در شکل‌های ۲ تا ۴ مشاهده شد، حرکت سینوسی اعمال‌شده به مخزن، به آب درون آن منتقل شده و موجب شکل‌گیری یک حرکت تناوبی در این سیال شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، یک مدل دو فاز اویلری بر اساس مدل VOF برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد تراکم‌ناپذیر استفاده شده است. این مدل جهت شبیه‌سازی تلاطم سطح آزاد مایع درون یک مخزن مکعب‌مستطیلی در حال حرکت نوسانی رفت و برگشتی به‌کار گرفته شده است. این روش از یک مدل پیشرفته و تصحیح‌شده برای بهره‌مندی هرچه بیشتر تاثیر مدل جریان آشفته $k-\epsilon$ بر جریان سطح آزاد بهره می‌جوید که در نرم‌افزار متن‌باز OpenFoam پیاده‌سازی و اجرا شده است. همزمان، سیستمی برای مطالعه آزمایشگاهی این پدیده، طراحی و ساخته شده است.

مقایسه میان نتایج مدل و مشاهدات تجربی دقت مدل‌سازی را تایید می‌کند. هدف اصلی این مطالعه، بررسی میزان اثر افزایش بافل‌های عمودی در کف مخزن برای کاهش تلاطم آب درون آن در اثر حرکت مخزن بوده است. بنابراین، سه حالت مختلف با شرایط متفاوت از ساختار بافل درون مخزن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که آب درون مخزن بدون بافل در اثر حرکت رفت و برگشت تناوبی مخزن به‌شدت دچار تلاطم سطحی شده و افزودن بافل‌ها به این مخزن توانسته در کنترل شدت این نوسانات به‌طور قابل توجهی موثر باشد. نشان داده شده که افزودن یک بافل عمودی در وسط مخزن تا ۲۵٪ و افزودن دو بافل با فواصل یکسان از یکدیگر و همچنین از دیواره‌های مخزن، تا ۵۰٪ از تغییرات فشار مایع در گوشه‌های کف مخزن (که گیرنده ضربات مایع در حال حرکت درون مخزن است) نسبت به حالت بدون بافل می‌کاهد. این، به معنی یکنواختی بیشتر سطح سیال درون این مخزن با افزودن بر تعداد این بافل‌ها است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

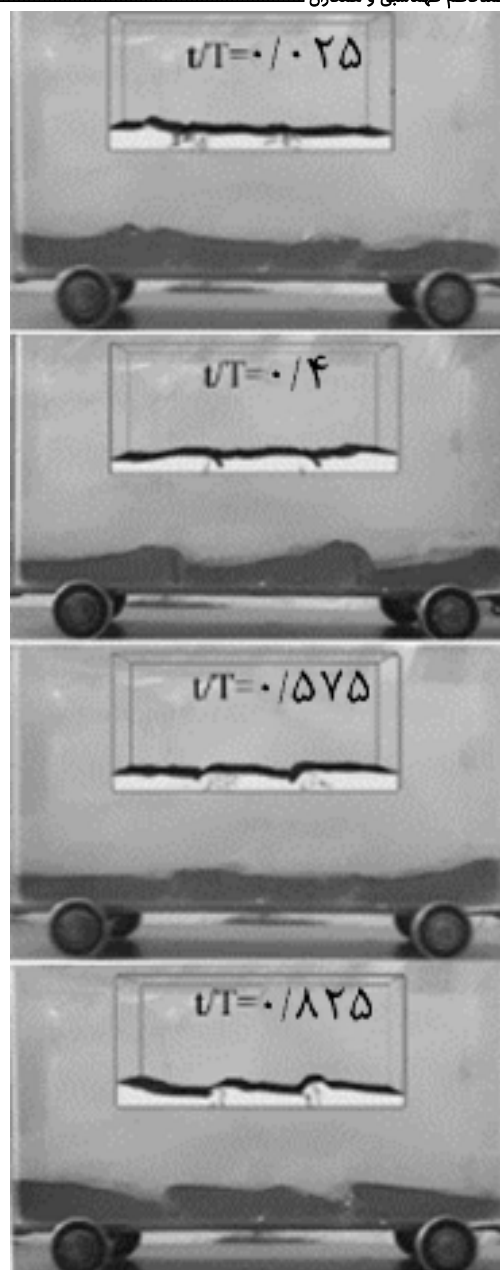
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: محمدکاظم طهماسبی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۴٪)؛ رحیم شمس‌الدینی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۳٪)؛ بهادر ابول‌پور (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس (۳۳٪)

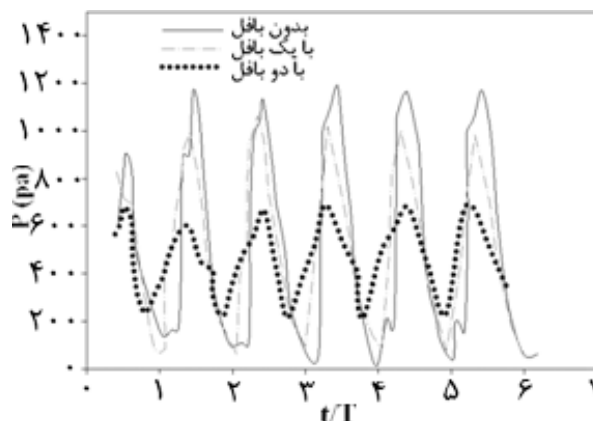
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Faltinsen OM. A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with twodimensional flow. Journal of Ship Research. 1978;22(3):193-202.
- 2- 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. 1981;17(11):1631-1646.
- 3- Nakayama T, Washizu K. Nonlinear analysis of liquid motion in a container subjected to forced pitching oscillation. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1980;15(8):1207-1220.



شکل ۴) نتایج تجربی و پیشگویی‌های مدل از تلاطم سطح آزاد مایع درون مخزن با دو بافل در بازه‌های زمانی مختلف از حرکت آن



نمودار ۱) میزان اثر بافل‌ها در کاهش تغییرات فشار مایع در یکی از چهارگوشه کف مخزن

- 16- Kyoung JH, Hong SY, Kim JW, Bai KJ. Finite-element computation of wave impact load due to a violent sloshing. *Ocean Engineering*. 2005;32(17-18):2020-2039.
- 17- Saripilli JR, Sen D. Numerical studies on effects of slosh coupling on ship motions and derived slosh loads. *Applied Ocean Research*. 2018;76:71-87.
- 18- Liu D, Lin P. Three-dimensional liquid sloshing in a tank with baffles. *Ocean Engineering*. 2009;36(2):202-212.
- 19- Xue MA, Lin P. Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing. *Computers & Fluids*. 2011;52:116-129.
- 20- Eswaran M, Saha UK, Maity D. Effect of baffles on a partially filled cubic tank: Numerical simulation and experimental validation. *Computers and Structures*. 2008;87(3-4):198-205.
- 21- Cho IH, Kim MH. Effect of dual vertical porous baffles on sloshing reduction in a swaying rectangular tank. *Ocean Engineering*. 2016;126:364-373.
- 22- Sanapala VS, Rajkumar M, Velusamy K, Patnaik BSV. Numerical simulation of parametric liquid sloshing in a horizontally baffled rectangular container. *Journal of Fluids and Structures*. 2018;76:229-250.
- 23- Deshpande SS, Anumolu L, Trujillo MF. Evaluating the performance of the two-phase flow solver InterFoam. *Computational Science & Discovery*. 2012;5(1).
- 24- Hoang DA, van Steijn V, Portela LM, Kreutzer MT, Kleijn CR. Benchmark numerical simulations of segmented two-phase flows in microchannels using the Volume of Fluid method. *Computer & Fluids*. 2013;86:28-36.
- 25- Brackbill JU, Kothe DB, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*. 1992;100(2):335-354.
- 26- Launder BE, Spalding DB. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974;3(2):269-289.
- 27- Lafaurie B, Nardone C, Scardovelli R, Zaleski S, Zanetti G. Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with SURFER. *Journal of Computational Physics*. 1994;113(1):134-147.
- 4- Cho JR, Lee HW. Non-linear finite element analysis of large amplitude sloshing flow in two-dimensional tank. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004;61(4):514-531.
- 5- Wang CZ, Khoo BC. Finite element analysis of two-dimensional nonlinear sloshing problems in random excitations. *Ocean Engineering*. 2005;32(2):107-133.
- 6- Wu GX, Ma QW, Taylor RE. Numerical simulation of sloshing waves in a 3D tank based on a finite element method. *Applied Ocean Research*. 1998;20(6):337-355.
- 7- Kim Y, Shin YS, Lee KH. Numerical study on slosh-induced impact pressures on three-dimensional prismatic tanks. *Applied Ocean Research*. 2004;26(5):213-226.
- 8- Ming PJ, Duan WY. Numerical simulation of sloshing in rectangular tank with VOF based on unstructured grids. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. 2010;22(6):856-864.
- 9- Wu L, Gong M, Wanga J. Development of a DEM-VOF model for the turbulent free-surface flows with particles and its application to stirred mixing system. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018;57(5):1714-1725.
- 10- Brar GS, Singh S. An experimental and CFD analysis of sloshing in a tanker. *Procedia Technology*. 2014;14:490-496.
- 11- Jung JH, Yoon HS, Lee CY. Effect of natural frequency modes on sloshing phenomenon in a rectangular tank. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2015;7(3):580-594.
- 12- Shamsoddini R, Abolpour B. Investigation of the effects of baffles on the shallow water sloshing in a rectangular tank using a 2D turbulent ISPH method. *China Ocean Engineering*. 2019;33(1):94-102.
- 13- Salem MI, Mucino VH, Saunders E, Gautam M, Lozano-Guzman A. Lateral sloshing in partially filled elliptical tanker trucks using a trammel pendulum. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2009;16(1-2):207-224.
- 14- Celebi MS, Akyildiz H. Nonlinear modeling of liquid sloshing in a moving rectangular tank. *Ocean Engineering*. 2002;29(12):1527-1553.
- 15- Frandsen BJ. Sloshing motions in excited tanks. *Journal of Computational Physics*. 2004;196(1):53-87.