



# Numerical and Experimental Investigation of the Roll Moment due to Free-Surface Anti-Roll Tanks

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Ghamari I. <sup>1\*</sup>,  
Seif M. S. <sup>2</sup>,  
Mahmoodi H. R. <sup>2</sup>

### How to cite this article

Ghamari I, Seif M S, Mahmoodi H R. Numerical and Experimental Investigation of the Roll Moment due to Free-Surface Anti-Roll Tanks. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(9):641-650.

## ABSTRACT

Roll motion is one of the most important and dangerous motions of the ship and can even result in capsizing of the vessel. Therefore, its control has been always of interest for marine industry researchers. Among the various methods and equipment for controlling the roll motion, the use of free surface anti-roll tanks has been one of the most important methods and which used in many cases due to its simplicity in construction and design. The high efficiency of these tanks at all speeds and even without speed is another strength of these tanks. This study investigates the effect of the free surface anti-roll tank on the roll motion numerically and experimentally. In the numerical simulation, a CFD sloshing solver, based on the "Open source Field Operation And Manipulation", known in short as Open-FOAM, and assuming 2D laminar flow conditions, is customized to calculate the sloshing loads from the tank. The predicted roll damping and moments due to the anti-roll tank are validated against experimental results. This simulator could be used as a sloshing simulator to couple with seakeeping solvers.

**Keywords** Free-Surface Anti-Roll Tanks, Sloshing, Roll Moment, OpenFOAM

## CITATION LINKS

[1] Roll damping by free surface tanks. [2] Roll stabilization by anti-roll passive tanks. [3] Nonlinear time domain simulation technology for seakeeping and wave-load analysis for modern ship design. [4] Preventing parametric roll with use of devices and their practical impact. [5] Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks. [6] A nonlinear model of parametric rolling stabilization by anti-roll tanks. [7] Parametric resonance of a fishing vessel with and without anti-roll tank: An experimental and numerical study. [8] Investigation of Parametric Resonance in Roll for Container Carrier Ships. [9] Experimental, numerical and analytical investigation of the effect of screens on sloshing. [10] Sloshing.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Marine Engineering Division, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Phone: -

Fax: -

ghamari@sharif.edu

### Article History

Received: April 15, 2020

Accepted: April 20, 2021

ePublished: August 07, 2021

## شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی ممان رولینگ ناشی از مخازن ضد رول سطح آزاد

ایثار قمری\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

محمد سعید سیف

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

حمیدرضا محمودی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

### چکیده

حرکت رول یکی از مهمترین و خطرناکترین حرکات شناورها می‌باشد و در برخی مواقع حتی می‌تواند عامل اصلی کپسایز شدن و غرق شدن شناور نیز باشد. از این رو کنترل این مد حرکت شناور همیشه مورد توجه محققین صنایع دریایی بوده است. از میان روش‌ها و تجهیزات مختلف برای کنترل این حرکت شناور، استفاده از مخازن رول سطح آزاد یکی از روش‌های مورد توجه بوده است که به دلیل سادگی در ساخت و طراحی در بسیاری موارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. کارآیی بالای این مخازن در همه سرعت‌ها و حتی بدون سرعت شناور از نقاط قوت دیگر این مخازن می‌باشد. این مطالعه به بررسی عددی و آزمایشگاهی اثر مخازن ضد رول سطح آزاد، بر روی ممان رولینگ می‌پردازد. در شبیه‌سازی عددی بخش اسلاشینگ، یک حلگر دینامیک سیالات محاسباتی، بر اساس بسته‌ی نرم‌افزاری "Open source Field Operation And Manipulation"، که مخفف آن Open-FOAM است و با فرض شرایط جریان آرام دو بعدی، به منظور محاسبه‌ی بارهای اسلاشینگ مخزن، تنظیم شده و مورد استفاده قرار گرفت. میرایی و ممان رولینگ پیش‌بینی شده‌ی ناشی از مخزن ضد رول با نتایج آزمایشگاهی، اعتبار سنجی شده است. این شبیه‌ساز را می‌توان به‌عنوان شبیه‌ساز اسلاشینگ به‌صورت جفت شده با حلگرهای دریامانی استفاده کرد.

**کلیدواژه‌ها:** مخازن ضد رول سطح آزاد، اسلاشینگ، ممان رول، OpenFOAM.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

\*نویسنده مسئول: ghamari@sharif.edu

### ۱- مقدمه

اسلاشینگ، جریان سطح آزاد قوی در مخازن نیمه پر است که می‌تواند بارهای ضربه‌ای بزرگی را روی دیواره‌ها و سقف مخازن وارد کند. برای مخازن نصب شده روی کشتی‌ها، در صورتی که حرکات کشتی موجب تحریک و ایجاد اسلاشینگ مخزن در پایین‌ترین فرکانس طبیعی شود، تلاطم بسیار شدید و قوی می‌تواند رخ دهد. از این پدیده، می‌توان برای کنترل حرکت رول کشتی استفاده کرد. شکل مخزن، نسبت پرشدگی (filling ratio)، بزرگی و فرکانس حرکت مخزن، پارامترهای اصلی هستند که تعیین‌کننده‌ی ماهیت جریان سطح آزاد می‌باشند. این پدیده، دارای فیزیک پیچیده‌ای است که به پارامترهای بسیاری بستگی دارد. گشتاور بدست آمده از اسلاشینگ، وابسته به فرکانس است و اگر مخزن در پایین‌ترین فرکانس طبیعی خود تحریک شود،

اختلاف فاز گشتاور بدست آمده در مقایسه با حرکت رول منفی ۹۰ درجه است و متعاقباً آن را می‌توان به‌عنوان یک میرایی اضافی برای سیستم در نظر گرفت.

بسیاری از مطالعات، به بررسی تأثیر مخازن ضد رول روی حرکات رول و پارامتریک رولینگ پرداخته‌اند. بوش و همکاران<sup>[۱]</sup> به بررسی آزمایشگاهی مفهوم مخازن سطح آزاد به‌عنوان ابزاری برای میرایی اضافی در حرکت رول پرداختند. آن‌ها موارد بسیاری از مخزن ضد رول غیرفعال را مطالعه کردند که می‌تواند یک الگو و معیار خوب برای تحلیل مخزن سطح آزاد از حیث ممان رول باشد. وقتی که فرکانس طبیعی اسلاشینگ برابر (یا اندکی کمتر از) فرکانس طبیعی حرکت رول کشتی است، آنگاه ممان رول ناشی از اسلاشینگ مخزن با سرعت رول کشتی هم فاز خواهد شد و به‌عنوان یک میرایی اضافی روی سیستم عمل می‌کند. توضیحات بیشتر در خصوص مکانیزم این نوع مخازن ضد رول در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود.

مطالعه‌ی کاملی در مورد تئوری کار مخازن لوله‌ای U شکل غیرفعال و نیز مباحث مربوط به میرایی مخزن، جرم مخزن، موقعیت نسبت به مرکز ثقل کشتی و تنظیم آن به‌طور مفصل در مقاله‌ی گاواد و همکاران<sup>[۲]</sup> ارائه شده است. آن‌ها نشان دادند که موقعیت بهینه‌ی مخزن، در روی یا بالای CG کشتی برای دستیابی به بالاترین میرایی و کم‌ترین حرکت رول کشتی می‌باشد. آن‌ها بیان داشتند که یک تثبیت‌کننده‌ی سبک ممکن است به اندازه‌ی کافی قوی نباشد و یک تثبیت‌کننده‌ی بسیار قوی، ممکن است به شدت موجب کاهش ارتفاع متاستریک شود و درعین‌حال، فضای زیادی را اشغال کند. آن‌ها پیشنهاد کردند که جرم بهینه مخزن در حدود ۳/۵ درصد جرم کشتی می‌باشد.

شین و همکاران<sup>[۳]</sup> به مطالعه‌ی تأثیر مخازن ضد رول لوله‌ای U شکل روی حرکت رول در کشتی‌های کانتینر پر پرداختند. آن‌ها از یک برنامه‌ی کامپیوتری استفاده کرده و حداکثر زاویه‌ی رول را در فرکانس‌های مختلف موج در موج‌های منظم محاسبه کردند. نتایج نشان داد که مخازن ضد رول لوله‌ای U شکل غیرفعال می‌توانند دستگاه بسیار مؤثر برای اجتناب از حرکات رول شدید بخصوص پدیده پارامتریک رولینگ در سناریوهای مختلف باشند. کاربرد و استفاده از اسپانسون‌ها و مخازن ضد رول توسط یومدا و همکاران<sup>[۴]</sup> مورد مطالعه قرار گرفته است. اسپانسون‌ها، برخی قطعات اضافی متصل به بدنه‌ی کشتی در خط بارگیری کشتی برای کاهش تغییرات زمانی ممان بازگرداننده رول و در نتیجه، کاهش دامنه حرکت رول هستند. آزمایش‌های مدل آن‌ها روی کشتی کانتینری TEU۶۶۰۰ نشان داد که اسپانسون‌های با عرض ۱۱/۷ درصد پهنای کشتی، می‌توانند موجب کاهش حداکثر دامنه حرکت رول از ۲۰ تا ۱۵ درجه در امواج با نسبت طول موج به طول کشتی برابر با ۱/۶ شوند. همچنین، آن‌ها به‌طور آزمایشگاهی

مقاله، حلگر عددی و مکانیزم مخزن ضد رول جریان آزاد توضیح داده می‌شود. سپس در بخش بعد از آن، نتایج عددی برای سه مورد متفاوت نشان داده شده و با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی می‌شوند. در نهایت در بخش پایانی، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی ارائه می‌شود.

## ۲- طرح مسأله و حلگر عددی اسلاشینگ

اسلاشینگ می‌تواند بارهای ضربه‌ای بزرگی روی دیوارها و سقف مخازن وارد کند. برای مخازن نصب شده روی کشتی‌ها، در صورتی که حرکات کشتی موجب تحریک و ایجاد تلاطم مخزن در پایین‌ترین فرکانس طبیعی شود، تلاطم بسیار شدید و قوی می‌تواند رخ دهد. از این پدیده می‌توان برای کنترل حرکت رول کشتی استفاده کرد. شکل مخزن، نسبت پرشدگی، بزرگی و فرکانس حرکت رول مخزن، پارامترهای اصلی هستند که تعیین‌کننده ماهیت جریان سطح آزاد است. این پدیده، دارای فیزیک پیچیده‌ای است که به پارامترهای بسیاری بستگی دارد. ممان بدست آمده از اسلاشینگ، وابسته به فرکانس است و اگر مخزن در پایین‌ترین فرکانس طبیعی اسلاشینگ خود تحریک شود، اختلاف فاز ممان بدست آمده در مقایسه با حرکت رول، منفی ۹۰ درجه است که نتیجتاً می‌توان آن را به‌عنوان میرایی اضافی برای سیستم لحاظ کرد. به‌منظور شبه‌سازی اثر مخزن ضد رول روی رفتار کشتی به خصوص روی حرکت رول، پدیده اسلاشینگ و بارهای ناشی از آن در ابتدا باید تحلیل و مطالعه شوند.

در این مقاله، از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بر اساس روش حجم محدود برای انجام شبه‌سازی‌های عددی پدیده اسلاشینگ استفاده می‌شود که در آن آب‌وهوا به‌صورت تراکم‌ناپذیر و جریان ویسکوز به‌صورت آرام، فرض می‌شود. تکنیک حجم سیال (VOF) برای مطالعه سطح مشترک هوا-آب استفاده می‌شود. این روش، برای مثال، می‌تواند جزییاتی را در خصوص جریان درون مخزن متلاطم و بارهای محلی و یکپارچه‌ی وارده روی دیوارهای مخزن به دلیل تشدید حرکت سیال ارائه کند. این حلگر بر اساس بسته‌ی نرم‌افزاری "Open source Field Operation And Manipulation" که بصورت مخفف به اسم Open-FOAM شناخته می‌شود می‌باشد که بر اساس نیازهای ما، تنظیم شده است. Open-FOAM، که یک بسته‌ی کد باز می‌باشد و شامل حلگرهایی برای مسائل مختلف در مکانیک سیالات است، در اینجا استفاده شده است. فرمولاسیون کامل مورد استفاده را می‌توان در مرجع [9] یافت. دستگاه مختصاتی جسم ثابت در شکل ۱ نشان داده شده است. معادله‌ی مومنتوم ناویر-استوکس در سیستم مختصات ثابت مخزن به شرح زیر است [10]:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

نشان دادند که نصب مخزن ضد رول به اجتناب کامل از پارامتریک رولینگ برای امواج با نسبت طول‌موج به طول کشتی برابر با ۱/۳ کمک می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که مخزن ضد رول با اندازه‌ی ۱/۶۵ درصد جابه‌جایی کشتی، یک گزینه‌ی مقرون‌به‌صرفه برای کنترل ریسک پدیده پارامتریک رولینگ می‌باشد.

مارزووک و همکاران [5] به آزمایش و بررسی عددی اثربخشی مخازن لوله‌ای U شکل ضد رول غیرفعال و فعال برای کشتی سری ۶۰ در شرایط دریای متلاطم و آشفته پرداختند. آن‌ها پی‌بردند که حرکت رول، در شرایط امواج از روبرو، امواج از پشت و امواج از بغل شدیدتر است، بنابراین آن‌ها تحلیل مخزن ضد رول خود را روی این سه وضعیت متمرکز کردند. مطالعات آنها نشان داد که مخازن ضد رول فعال، عملکرد برتری از مخازن ضد رول غیر فعال دارند. آن‌ها بیان کردند که مخازن ضد رول فعال در کاهش حرکت رول، مؤثرتر هستند و عملکرد آن‌ها به فرکانس‌های طبیعی و طراحی هندسی آن‌ها، غیر حساس است. با این حال، هزینه‌ی نصب و نگهداری سیستم فعال، بسیار بالاتر از مخازن ضد رول غیرفعال است.

نوس و همکاران [6] به بررسی تأثیر مخازن ضد رول لوله‌ی U شکل روی پدیده پارامتریک رولینگ برای یک کشتی کوچک ماهیگیری با پاشنه ترنسام پرداختند. شبه‌سازی‌های عددی برای چهار مخزن با طرح‌های مختلف به‌منظور مطالعه‌ی اثر جرم مخزن، فرکانس طبیعی مخزن و میرایی داخلی مخزن و موقعیت عمودی مخزن روی کنترل پارامتریک رولینگ انجام شد. نتایج آنها نشان داد که استفاده از مخزن ضد رول موجب جلوگیری از افزایش حرکت رول و همچنین پدیده پارامتریک رولینگ در برخی شرایط می‌شود، در عین حال آن‌ها تأکید کردند که مطالعات آزمایشگاهی بیشتری برای تحلیل‌های دقیق‌تر لازم است.

قمری و همکاران [7,8] به مطالعه‌ی پدیده رول کشتی ماهیگیری با و بدون مخازن ضد رول پرداختند. آنها حرکات رول این کشتی را با معادلات ۶ درجه آزادی مدل کردند و پارامترهای موثر در این حرکت و همینطور پدیده پارامتریک رولینگ و اثر مخازن ضد رول روی این حرکت را بررسی و مطالعه کردند. نتایج عددی آنها نیز با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد که حاکی از دقت خوب روش به کار رفته بود.

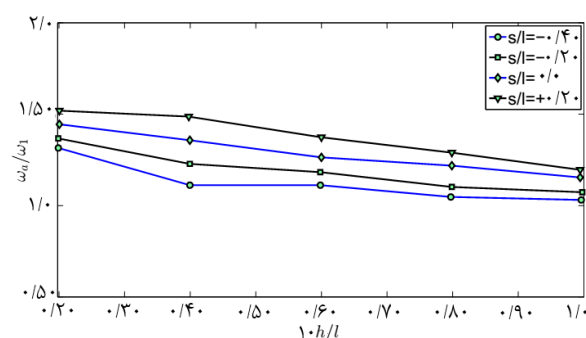
مسئله‌ی اسلاشینگ و محاسبه‌ی بارهای آن در مخزن مستطیلی، در این مقاله مطالعه شده است. مسئله‌ی اسلاشینگ با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی در OpenFOAM حل می‌شود. نتایج با سه سری نتایج آزمایشگاهی متفاوت، صحت‌سنجی می‌شود. از این حلگر می‌توان در تحلیل دریامانی شناورها و با در نظر گرفتن بارهای اسلاشینگ استفاده کرد. کولپینگ این حلگر و حلگر دریامانی بزودی انجام خواهد شد و نتایج آن در آینده‌ی نزدیک کامل شده و ارائه و منتشر خواهد شد. در بخش بعدی این

بسیاری از پارامترها بر حرکت سیال داخل مخزن و در نتیجه ممان رول آن اثر می‌گذارند. برخی از آنها، شکل هندسی و ابعاد مخزن، موقعیت آن نسبت به محور چرخش، مقدار سیال داخل مخزن و حرکات کشتی که مخزن در معرض آن قرار دارد (هم دامنه و هم فرکانس) می‌باشند.

از دیدگاه نظری، در فرکانس طبیعی اسلاشینگ، ممان رول مخزن دارای اختلاف فازی ۹۰- درجه در مقایسه با حرکت نوسانی مخزن است. عمق مخزن، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مخزن است. چون برای طول مشخص مخزن (که برابر با عرض کشتی است)، تنها احتمال تغییر فرکانس طبیعی اسلاشینگ، تغییر عمق آب داخل مخزن است. بدیهی است که در نزدیکی این فرکانس طبیعی، انتقال آب، بیشترین مقدار بوده است و شرایط، برای ایجاد میرایی بیشتر برای حرکت رول بسیار مطلوب است [1].

باین‌حال لازم به ذکر است که این‌یک پدیده پیچیده است و معمولاً، فرکانس طبیعی اسلاشینگ واقعی متفاوت از فرکانس طبیعی تئوری اسلاشینگ است. فرکانس واقعی اسلاشینگ، تابعی از طول مخزن، عمق آب مخزن، ارتفاع مخزن، موقعیت نقطه‌ی چرخش و دامنه‌ی رول است. با افزایش دامنه‌ی رول و کاهش نسبت  $h/l$  (نسبت عمق آب به طول مخزن)، فرکانس تلاطم واقعی از مقدار تئوری منحرف شده و بنابراین، اختلاف فاز ممان رول اسلاشینگ متفاوت از ۹۰- درجه است. بوش و همکاران [1] چندین آزمایش رول اجباری را روی مخزن با طول  $l = 1m$  برای مطالعه‌ی این روابط انجام دادند. فاصله محور چرخش تا کف مخزن با پارامتر  $S$  نشان داده شده است و زمانی که محور چرخش، پایین‌تر از کف مخزن است، علامت  $S$  مثبت می‌باشد. تأثیر نسبت  $h/l$  مخزن و موقعیت نقطه‌ی چرخش نسبت به کف مخزن بر روی فرکانس واقعی اسلاشینگ در شکل ۲ نشان داده شده است.

$\omega_a$ ، فرکانس اسلاشینگ واقعی است که در آن زاویه‌ی فاز  $\varepsilon_r$  برابر ۹۰- درجه و  $\omega_1$  فرکانس تئوری اسلاشینگ می‌باشد.  $S$  فاصله از محور چرخش تا کف مخزن می‌باشد. بر اساس شکل ۲، فرکانس‌های اسلاشینگ واقعی و تئوری، با افزایش نسبت  $h/l$  مخزن، به یک دیگر نزدیک‌تر می‌شوند. از حیث نسبت  $S/l$  مخزن،



شکل ۲) نسبت  $\omega_a/\omega_1$  به صورت تابعی از  $h/l$  و  $S/l$   $\phi_a = 0.10 \text{ rad}$  [1]

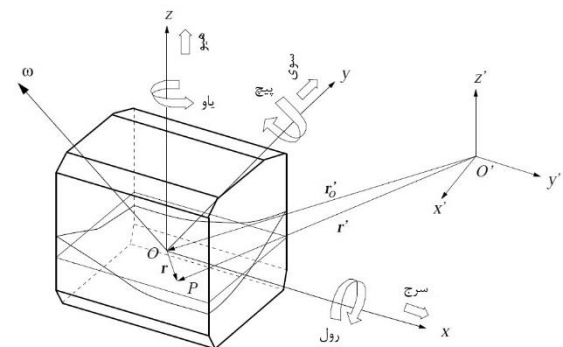
$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}\vec{u}) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \vec{g} + \nu \nabla^2 \vec{u} - \vec{\omega}_0 - (\vec{\omega} \times \vec{v}_0) - \vec{\omega} \times \vec{r} - \nabla(\vec{\omega} \times \vec{u}) - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$$

که در آن بردار سرعت در دستگاه مختصات ثابت مخزن است.  $\vec{\omega}_0$  و  $\vec{v}_0$ ، شتاب و سرعت مبدأ دستگاه مختصات ثابت مخزن نسبت به دستگاه یا سیستم مختصات ثابت زمین می‌باشند.  $\vec{g}$ ، شتاب گرانشی در دستگاه مختصات ثابت مخزن است.  $\vec{\omega}$ ، سرعت چرخشی سیستم مختصات ثابت جسم و بردار  $\vec{r}$ ، بردار مکان در قاب مرجع مخزن است.  $\rho$ ، چگالی سیال  $\nu$  ویسکوزیته‌ی سینماتیک سیال است. دو جمله‌ی آخر در سمت راست معادله، شتاب‌های کوریولیس و گریز از مرکز هستند.

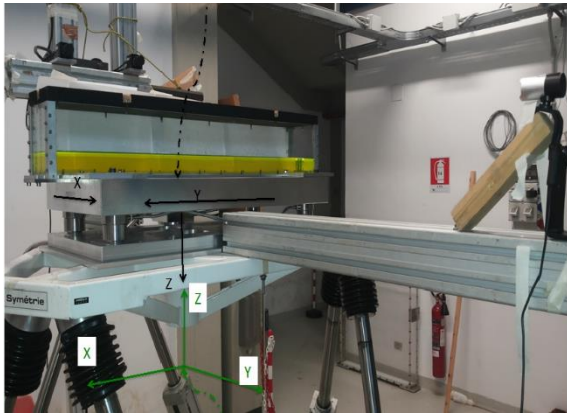
مخزن ضد رول سطح آزاد، میرایی رولینگ اضافی را در فرکانس‌های خاص ایجاد کرده و این به اجتناب از تشدید یا رزونانس در حرکت رول کمک می‌کند. در اینجا، ما به توضیح مکانیزم این سیستم و پارامترهایی که موجب کاهش یا افزایش میرایی می‌شوند، می‌پردازیم. برای ساده‌تر شدن موضوع، فرض می‌کنیم که مخزن تنها حرکت رول را تجربه می‌کند. مکانیزم مخزن ضد رول، این است که از انتقال آب از یک طرف کشتی به طرف دیگر، همراه با یک اختلاف فاز مشخص با توجه به حرکت رول کشتی، به‌عنوان ابزاری برای ایجاد ممان خنثی کننده، استفاده می‌کند. ممان رول ناشی از حرکت سیال داخل مخزن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$M_r = M_r \sin(\omega t + \varepsilon_r) \quad (2)$$

در اینجا،  $M_r$  و  $\varepsilon_r$  به ترتیب دامنه ممان رول مخزن و اختلاف فاز با توجه به حرکت مخزن (در اینجا می‌توان به آن حرکت رول کشتی گفت) می‌باشند.  $\omega$  نیز، فرکانس حرکت رول مخزن است.  $M_r \sin \varepsilon_r$  بزرگی مؤلفه‌ی ممان رول مخزن و دارای اختلاف فاز با حرکت رول مخزن و  $M_r \cos \varepsilon_r$ ، بزرگی مؤلفه ممان رول مخزن هم فاز با حرکت رول مخزن است. مؤلفه‌ی ناهم فاز حرکت مخزن را می‌توان به‌عنوان یک مؤلفه‌ی میرایی در نظر گرفت. برای داشتن میرایی حداکثر از مخزن، بهتر است تا زاویه‌ی اختلاف فاز  $|\varepsilon_r|$  برابر با ۹۰ درجه باشد.



شکل ۱) دستگاه مختصات ثابت بدنه (Body-fixed coordinate system) مورد استفاده در حلگر اسلاشینگ [10].



شکل ۴) مخزن اسلاشینگ و شرایط آزمایش برای تست‌های اسلاشینگ مجزا در CNR-INSEAN، رم، ایتالیا.

اجباری رول در فرکانس طبیعی اسلاشینگ مخزن و در دامنه‌های مختلف رول انجام شده است که در جدول ۱ نشان داده شده است. در جدول ۱،  $\omega_1$  اولین فرکانس اسلاشینگ طبیعی مخزن و برابر با  $21.923$  رادیان بر ثانیه است. مقایسه بخش‌های حالت پایدار نیروی عرضی و ممان رول در نتایج آزمایشگاهی و عددی در  $\omega = \omega_1$  و در دامنه‌ی رول متفاوت در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

$F_y$ ، نیرو در امتداد طول مخزن (نیروی سووی در صورتی که مخزن روی کشتی نصب شده باشد) و  $M_x$ ، ممان حول محور عرضی مخزن است. این ممان در صورتی که مخزن روی کشتی نصب شده باشد، متناظر با ممان رول می‌باشد. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، ممان رول در نتایج عددی تا حدود ۱۸ درصد کم‌تر از میزان واقعی در نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد، در حالی که نتایج نیروی عرضی، همخوانی بهتری را نشان می‌دهند. این اختلاف در نتایج برای ممان حرکت رول احتمالاً ناشی از این است که این تست‌ها، در فرکانس طبیعی اسلاشینگ انجام می‌شوند و همان‌طور که در آزمایش‌ها مشاهده شده است، برخورد‌های شدید سیال با سقف مخزن باعث آشفتنگی بیشتر جریان و ایجاد قابل توجه جریان‌های غیر خطی می‌شود که در حلگر اسلاشینگ بدرستی قابل مدل شدن نیستند. به عنوان نمونه، تصویر جریان غیر خطی و برخورد سیال با سقف مخزن در آزمایش برای تست شماره ۰۶ در شکل ۸ نشان داده شده است. به علاوه، فشار در سقف مخزن اثر مستقیمی روی ممان رول دارد ولی روی نیروی عرضی مستقیماً اثر نمی‌گذارد. این می‌تواند وجود همخوانی بهتر مشاهده شده برای نیروی عرضی را توجیه کند.

جدول ۱) تست‌های حرکت رول اجباری مخزن

شماره تست	$\frac{\omega}{\omega_1}$	$\phi_a$ (deg)
تست ۰۶	۱	۶
تست ۲۰	۱	۴
تست ۳۰	۱	۲

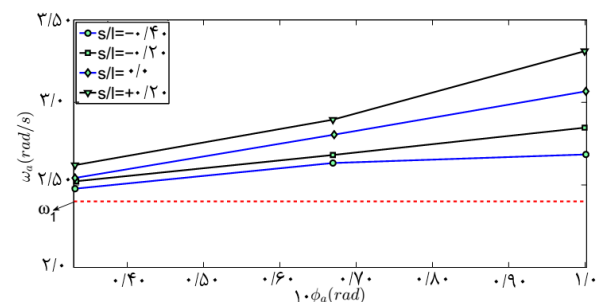
به نظر می‌رسد که  $\omega_a$  و  $\omega_1$  در صورتی به یک دیگر نزدیک‌تر هستند که مخزن در زیر محور چرخش باشند. نسبت  $\omega_a/\omega_1$  با افزایش مقدار  $|S/l|$ ، به ۱ نزدیک‌تر می‌شود. دامنه حرکت رول نیز روی نسبت  $\omega_a/\omega_1$  که در شکل ۳ نشان داده شده است، تأثیر می‌گذارد. شکل ۳ نشان می‌دهد که  $\omega_a$  از  $\omega_1$  با افزایش دامنه حرکت رول، دورتر می‌شود. اثر  $S/l$  نیز به شکل مشابهی می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و عددی و راستی آزمایشی نتایج

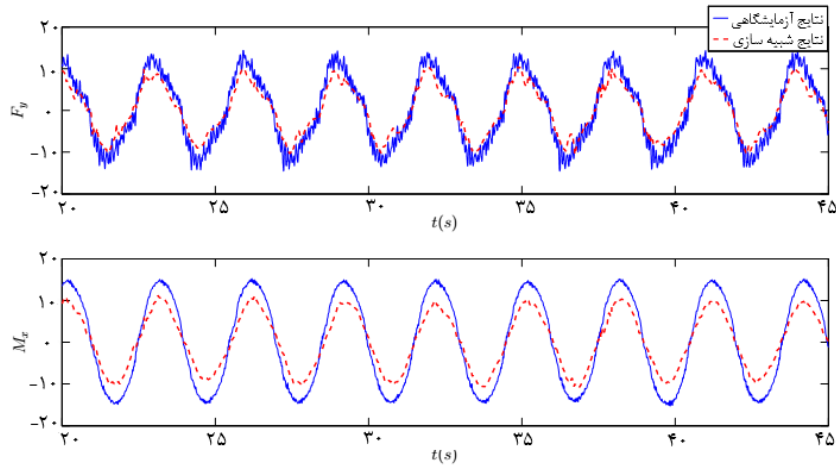
به‌منظور ارزیابی بیشتر حلگر عددی اسلاشینگ دو بعدی، سه مورد متفاوت مطالعه خواهند شد و نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی متفاوت صحت سنجی خواهند شد. در اولین مورد، نتایج عددی برای ممان رول و نیروی عرضی در حوزه زمان و برای اسلاشینگ یک مخزن دو بعدی با حرکت رول اجباری با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. در دومین مورد، ارتفاع سطح آزاد سیال در یک مخزن دو بعدی با حرکت عرضی اجباری بررسی می‌شود. و در آخرین مورد، ممان رول برای یک مخزن دو بعدی با حرکت رول اجباری در حوزه فرکانس محاسبه شده و با نتایج آزمایشگاهی، صحت سنجی خواهد شد.

#### ۳-۱- ممان رول و نیروی عرضی در حوزه زمان برای مخزن دو بعدی

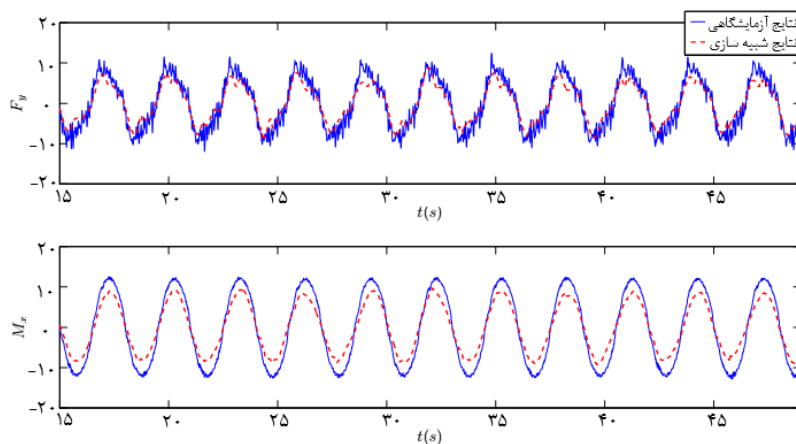
برای ارزیابی و اعتبارسنجی حلگر عددی، از داده‌های آزمایشگاهی منتشر شده در [7,8] استفاده کردیم. مخزن ضد رول برای نصب روی مدل کشتی ماهیگیری در مرکز CNR-INSEAN رم ایتالیا طراحی و ساخته شد. آزمایش‌های حرکت اجباری رول روی این مخزن مجزا انجام شدند. شکل مخزن و دستگاه آزمایشی در شکل ۴ نشان داده شده است [8]. مخزن دارای طول ۹۴ سانتی‌متر، ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر و عرض ۱۳ سانتی‌متر است، در حالی که عمق آب، ۴ سانتی‌متر است. در تست‌های مخزن مجزا، مرکز غلتش، ۰/۴ متر پایین‌تر از کف مخزن قرار داده شد و نیروها و ممانها در دستگاه مختصات متصل به کف مخزن اندازه‌گیری شدند. همان‌طور که در این شکل می‌توان دید، برای اندازه‌گیری نیرو و ممان در دستگاه مختصات ذکر شده، مخزن روی سطحی خاص و با استفاده از ۴ سنسور سنجش فشار در چهار نقطه‌ی اتصال، نصب شده است. چندین تست برای حرکت



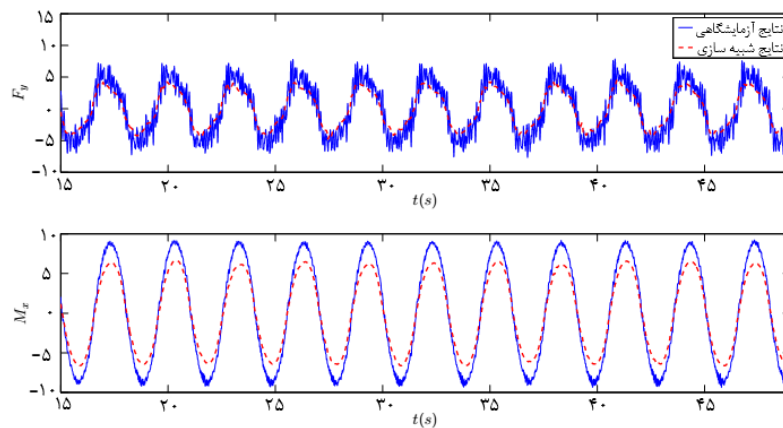
شکل ۳)  $\omega_a$  به‌صورت تابعی از  $\phi_a$  و  $S/l$  و  $h/l = 0.06$  [1].



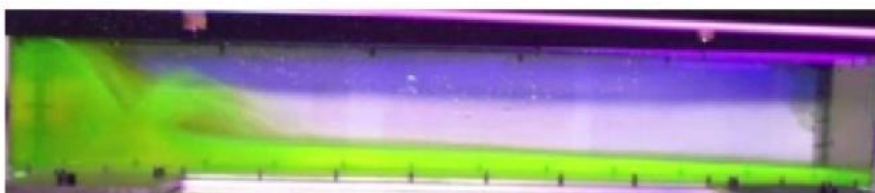
شکل ۵) مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی نیروی عرضی و ممان رول در تست  $0.6^\circ$  و  $\phi_a = 6.0^\circ$  و  $\frac{\omega}{\omega_1} = 1.0$



شکل ۶) مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی نیروی عرضی و ممان رول در تست  $0.20$  و  $\phi_a = 20.0^\circ$  و  $\frac{\omega}{\omega_1} = 1.0$

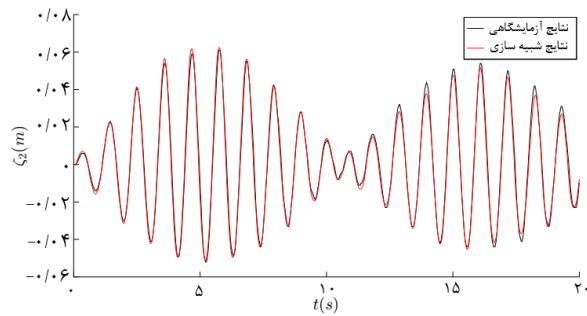


شکل ۷) مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی نیروی عرضی و ممان رول در تست  $0.30$  و  $\phi_a = 30.0^\circ$  و  $\frac{\omega}{\omega_1} = 1.0$



شکل ۸) برخورد سیال با سقف مخزن و جریان غیر خطی مشاهده شده در آزمایش‌ها در تست  $0.6$

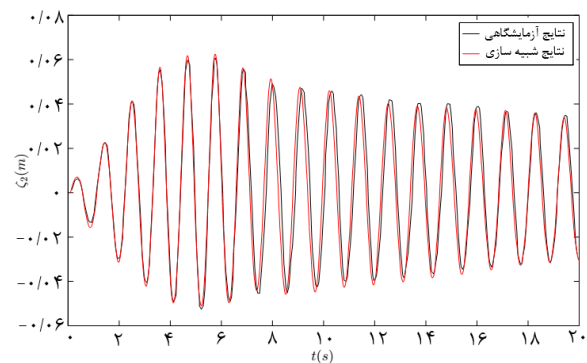




**شکل ۱۰** مقایسه‌ی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برای ارتفاع موج در فاصله‌ی ۵ میلی‌متری از دیواره‌های عمودی برای  $h/l = 883/10, \eta_{2a} = 0.0465/0.01, \omega/\omega_1 = 1/1$

سیال را از حجم کنترل در یک گام زمانی در جهت خاص می‌دهد یعنی  $u_i, v_i$  و  $\Delta x_i$  و  $\Delta t$ ، به ترتیب سرعت سیال، طول لبه‌ی سلول در جهت  $i$  و گام زمانی حل است [9]. بر طبق مطالعه‌ی حساسیت روی عدد CFL در [9]،  $CFL = 25/0$ ، با در نظر گرفتن نتایج، به‌اندازه‌ی کافی کوچک است. منبع میرایی در شبه‌سازی عددی، پراکندگی عددی است که با کاهش عدد CFL کاهش می‌یابد. بنابراین، اعداد CFL کوچک‌تر ایجاد امواج غیر میرا می‌کنند که با آزمایش‌ها همخوانی ندارند. نتایج عددی با استفاده از پارامترهای فوق‌الذکر با نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارند. برای مقایسه‌ی سطح میرایی در نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی، نتایج برای یک تست free-decay و برای مخزن فوق‌الذکر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که سطح میرایی در نتایج عددی (برای  $CFL = 0.25$ ) و نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی با هم دارند.

**۳-۳- ممان رول و اختلاف فاز در حوزه فرکانس برای مخزن دو بعدی**  
در یک مورد دیگر برای صحت‌سنجی نتایج حلگر اسلاشینگ، مطالعه روی ممان رول اسلاشینگ ناشی از حرکت رول اجباری یک مخزن دو بعدی سطح آزاد انجام می‌شود. Bosch و Vugts [1] مطالعه‌های آزمایشگاهی در این مورد انجام دادند که نتایج آن در این بخش استفاده می‌شود. آزمایش‌ها روی یک مخزن با طول ۱



**شکل ۱۱** تجزیه‌ی آزاد امواج متلاطم. مقایسه‌ی بین نتایج عددی و آزمایشی [9] برای ارتفاع موج در فاصله‌ی ۵ میلی‌متری از دیواره‌های عمودی به ازای  $h/l = 883/10, \eta_{2a} = 0.0465/0.01, \omega/\omega_1 = 1/1$ . حرکت عرضی اجباری در زمان ۷/۴ ثانیه متوقف می‌شود.

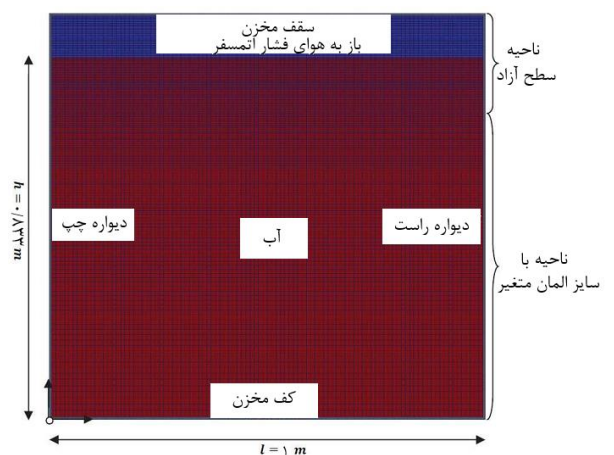
**۳-۲- جریان سطح آزاد در مخزن دو بعدی تحت حرکت عرضی اجباری**

اکنون مخزن مستطیلی را با طول ۱ متر، عرض ۰/۱ متر و ارتفاع ۰/۹۸ متر و با ارتفاع آب تا عمق ۰/۸۳۳ متر در نظر می‌گیریم. مخزن، تحت نوسان هارمونیک در حرکت عرضی اجباری به شرح زیر قرار می‌گیرد:

$$\eta_2 = \eta_{2a}(1 - \cos(\omega t)) \quad (3)$$

که  $\eta_{2a} = 0.0465/0.01$  و  $\omega = 0.75/6 \text{ rad/s}$  بوده و متناظر با  $1/1$  برابر اولین فرکانس طبیعی اسلاشینگ ( $\omega_1$ ) است. نمای شماتیک از حوزه‌ی محاسباتی در شکل ۹ نشان داده شده است [9]. شبه‌سازی عددی برای مخزن نشان داده شده به صورت مخزن دو بعدی، انجام شده است. مطالعه‌ی همگرایی برای اندازه‌ی شبکه، انجام شده و اندازه‌ی شبکه بر طبق مطالعه‌ی [9] انتخاب شده است. در روش میدان حجم محدود، در امتداد طول مخزن، دامنه‌ی سیال با استفاده از ۱۰۰ حجم کنترل (CVs)، که دارای توزیع یکنواخت است، گسسته‌سازی می‌شود. این بدین معنی است که اندازه‌ی شبکه در جهت طول مخزن، در مقایسه با طول موج با پایین‌ترین حالت طبیعی، کوچک است. در منطقه‌ی سطح آزاد، شبکه‌های یکنواخت استفاده شدند (۶۰ cv که ضخامت هر یک ۳ میلی‌متر است)، در حالی که پایین‌تر از سطح آزاد، cv ها به سمت انتهای مخزن و با ضریب رشد  $1/0.164$  بزرگتر شده‌اند. مقایسه‌ی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی [9] برای ارتفاع موج در فاصله‌ی ۵ میلی‌متری از دیواره‌های عمودی، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

اندازه‌ی گام زمانی نیز تا حدودی روی نتایج اثر دارد. کنترل گسسته‌سازی زمان، از طریق تغییر عدد کوارنت انجام می‌شود که به صورت CFL در پلتفرم OpenFOAM نشان داده می‌شود. این عدد CFL با استفاده از شار میانگین که نیروهای هر حجم کنترل را انتقال می‌دهند، محاسبه می‌شود. بر اساس تعریف مربوط به مورد یک بعدی، عدد CFL برابر با  $\frac{u_i \Delta t}{\Delta x_i}$  است و امکان عبور ذرات



**شکل ۹** دامنه‌ی محاسباتی برای مخزن با توضیحاتی برای بخش‌های مختلف در شکل

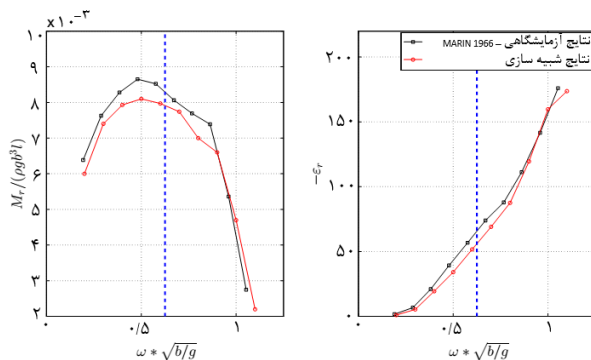
محور چرخش، کف مخزن است. در شکل ۱۵، عمق آب ۸ سانتی‌متر و محور چرخشی که حول آن ممان اندازه‌گیری می‌شود، ۲۰ سانتی‌متر پایین‌تر از کف مخزن است. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، ممان رول ناشی از اسلاشینگ داخل مخزن، به‌طور خطی با دامنه حرکت رول افزایش نمی‌یابد. این ممان، رفتار غیر خطی‌ای را نشان می‌دهد که متناسب با  $\sqrt{\phi_a}$  افزایش می‌یابد [1].

#### ۴- تفسیر نتایج و نتیجه‌گیری

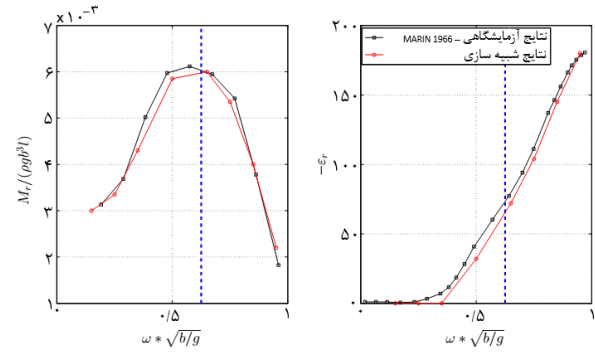
آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی به‌منظور بررسی ممان رول ناشی از حرکت رول در مخزن ضد رول سطح آزاد انجام و ارائه شدند. اثرات پارامترهای مختلف روی ممان رول ناشی از اسلاشینگ مخزن توضیح داده شد. سه نمونه‌ی آزمایشگاهی متفاوت به‌صورت عددی بررسی شده و نتایج عددی بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و صحت‌سنجی گردید. در اولین سری آزمایش‌ها، مخزن مستطیلی تحت حرکت رول هارمونیک اجباری قرار گرفت و سپس ممان رول و نیروی عرضی ناشی از

متر، ارتفاع ۰/۵ متر، عرض ۰/۱ متر و عمق آب  $h$  انجام شدند. وقتی که حرکت رول اجباری به صورت سینوسی با دامنه‌ی  $\phi_a$  و فرکانس  $\omega$ ، روی مخزن وارد می‌شود، ممان رول ایجاد شده حول محور چرخش با بزرگی  $M_r$  و فاز  $\varepsilon_r$  با توجه به حرکت رول مخزن اندازه‌گیری می‌شود. فاصله از محور چرخش به کف مخزن، موسوم به  $s$  است و وقتی محور چرخش پایین‌تر از کف مخزن است، مثبت می‌باشد. دامنه حرکت رول، بین  $1/9$  تا  $5/7$  درجه، متغیر است. چهار مورد برای مطالعه در این بخش انتخاب شدند و شبیه‌سازی‌های عددی برای مخازن دو بعدی متناظر انجام شد. شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ مقایسه‌ی بین دامنه بدون بعد و فاز ممان‌های اندازه‌گیری شده حول محور چرخش برای چهار مورد را نشان می‌دهند.

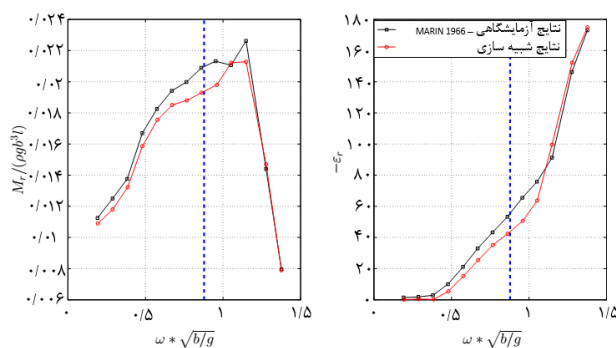
همان‌طور که در این موارد نشان داده شده است، روند تغییرات و مقادیر کلی در ممان رول مخزن و مقدار اختلاف فاز، در نتایج آزمایشگاهی و عددی، مشابه است. با این حال، تفاوت‌های آشکاری بین آن‌ها دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل ویژگی‌های غیر خطی در جریان باشد که توسط حلگر عددی نمی‌تواند بدرستی مدل شود. برای سه مورد اول، عمق آب ۴ سانتی‌متر و



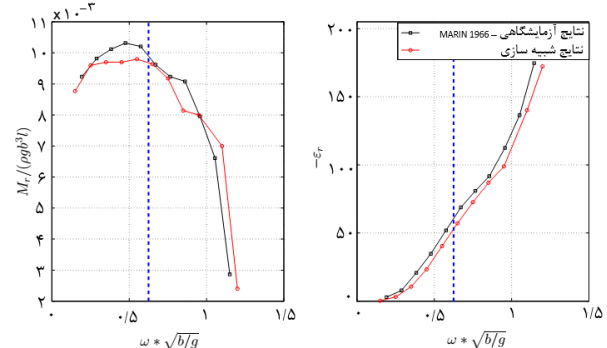
**شکل ۱۳** مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی ممان رول (سمت چپ: دامنه بدون بعد ممان. سمت راست: اختلاف فاز) حول محور چرخش به ازای  $\phi_a = 9/10^\circ, h/b = 0.4/0, s = 0$ . خط چین آبی، فرکانس طبیعی اسلاشینگ بصورت تئوری را نشان می‌دهد.



**شکل ۱۴** مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی ممان رول (سمت چپ: دامنه بدون بعد ممان. سمت راست: اختلاف فاز) حول محور چرخش به ازای  $\phi_a = 9/10^\circ, h/b = 0.4/0, s = 0$ . خط چین آبی، فرکانس طبیعی اسلاشینگ بصورت تئوری را نشان می‌دهد.



**شکل ۱۵** مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی ممان رول (سمت چپ: دامنه بدون بعد ممان. سمت راست: اختلاف فاز) حول محور چرخش به ازای  $\phi_a = 5/7^\circ, h/b = 0.4/0, s = 0$ . خط چین آبی، فرکانس طبیعی اسلاشینگ بصورت تئوری را نشان می‌دهد.



**شکل ۱۶** مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی ممان رول (سمت چپ: دامنه بدون بعد ممان. سمت راست: اختلاف فاز) حول محور چرخش به ازای  $\phi_a = 7/5^\circ, h/b = 0.4/0, s = 0$ . خط چین آبی، فرکانس طبیعی اسلاشینگ بصورت تئوری را نشان می‌دهد.



با مخزن ضد رول نصب شده، تلفیق کرد. این هدف بعدی این تحقیق است و در حال انجام است که نتایج آن پس از اتمام پژوهش، در مقاله‌ی دیگری منتشر خواهد شد. همچنین، این مقاله نشان می‌دهد که مخزن سطح آزاد، سطح میرایی خوبی را برای حرکت رول کشتی فراهم می‌کند. به علاوه، داده‌های عددی و آزمایشگاهی کامل ارائه شده، می‌تواند داده‌های خوبی برای بررسی اسلاشینگ در مخازن ضد رول سطح آزاد برای ارزیابی و مقایسه نتایج ابزارهای عددی برای سایر محققان فراهم کند.

### فهرست علائم و نشانه‌ها

$\bar{u}$	بردار سرعت در دستگاه مختصات ثابت مخزن
$\bar{a}_0$	شتاب مبدأ دستگاه مختصات ثابت مخزن نسبت به دستگاه یا سیستم مختصات ثابت زمین
$\bar{v}_0$	سرعت مبدأ دستگاه مختصات ثابت مخزن نسبت به دستگاه یا سیستم مختصات ثابت زمین
$\bar{g}$	شتاب گرانشی در دستگاه مختصات ثابت مخزن
$\bar{\omega}$	سرعت چرخشی سیستم مختصات ثابت جسم
$\bar{\tau}$	بردار مکان در قاب مرجع مخزن
$\rho$	چگالی سیال
$v$	ویسکوزیته ی سینماتیک سیال
$M_r$	دامنه ممان رول مخزن با توجه به حرکت مخزن
$\varepsilon_r$	اختلاف فاز ممان رول مخزن با توجه به حرکت مخزن
$h/l$	نسبت عمق آب به طول مخزن
$S$	فاصله محور چرخش تا کف مخزن
$\omega_a$	فرکانس اسلاشینگ واقعی مخزن
$\omega_1$	فرکانس طبیعی اسلاشینگ تئوری مخزن
$F_y$	نیرو در امتداد طول مخزن (نیروی سووی در صورتی که مخزن روی کشتی نصب شده باشد)
$M_x$	ممان حول محور عرضی مخزن
$\eta_{ra}$	دامنه حرکت عرضی اجباری مخزن
$\phi_a$	دامنه حرکت رول اجباری مخزن

**تشکر و قدردانی:** در پایان از دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف و همینطور کارکنان آزمایشگاه دریا دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف کمال تشکر و قدردانی را داریم.

**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان تایید می‌کنند که تمامی نتایج ذکر شده در این مقاله صرفاً حاصل فعالیت‌های پژوهشی نویسندگان مقاله است.

**تعارض منافع:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**سهم نویسندگان:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**منابع مالی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

### منابع

- 1- Van Den Bosch JJ, Vugts JH. Roll damping by free surface tanks. TNO-Report. 1966.
- 2- Gawad AF, Ragab SA, Nayfeh AH, Mook DT. Roll stabilization by anti-roll passive tanks. Ocean Engineering. 2001;28(5):457-69.
- 3- Shin YS, Belenky VL, Lin WM, Weems KM, Engle AH. Nonlinear time domain simulation technology for seakeeping and wave-load analysis for modern ship design. Authors' closure. Transactions-Society of

اسلاشینگ داخل مخزن در دستگاه مختصات غیرلخت متصل به کف مخزن اندازه‌گیری شدند. مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نیروی عرضی هم از نظر فرکانس و هم از نظر دامنه همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. در حالی که برای ممان رول، دامنه محاسبه شده به صورت عددی، اختلافی در حدود ۱۸ درصد با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. ویژگی‌های غیر خطی بسیار مرتبط با پدیده‌ی اسلاشینگ درون مخزن وجود دارد. چون نسبت عمق آب مخزن به طول مخزن  $h/l = 0.4/10$  کوچک است، ضربه‌ی سیال به سقف مخزن و کف مخزن خشک، تقریباً در همه‌ی آزمایش‌ها مشاهده شد. به علاوه، موارد آزمایش در فرکانس طبیعی اسلاشینگ مخزن انجام شد و بر طبق آزمایش‌ها، اثرات برخورد سیال با سقف مخزن (tank roof impact) که باعث تشدید جریان می‌شود و منجر به ایجاد جریان‌های متلاطم و غیر خطی می‌گردد، شدید بود. این موارد به طور کامل توسط حلگر اسلاشینگ CFD قابلیت مدل شدن ندارند. نمونه‌ای از ضربه سیال به سقف مخزن که در آزمایش‌ها مشاهده شد، در شکل ۸ نشان داده شده است. دومین سری از نتایج مربوط به یک مخزن دو بعدی تحت حرکت عرضی اجباری بود که در آن سطح آزاد جریان در فاصله ۵ میلی‌متر از دیواره محاسبه شده است. مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی در این مورد نشان می‌دهد که نتایج حاصله همخوانی خوبی با هم دارند. فرکانس نوسان، ۱۰ درصد بیشتر از فرکانس تلاطم است. علاوه بر این، دامنه‌ی حرکت عرضی بسیار کوچک و نسبت عمق آب به طول مخزن بسیار بزرگ است، لذا جریان درون مخزن، عمدتاً به صورت آرام است و ویژگی‌های غیرخطی که باعث ایجاد تفاوت بین نتایج آزمایشگاهی و عددی می‌شوند، مشاهده نشده است.

در آخرین مورد مطالعه، تست‌های انجام شده توسط [1] روی مخزن مستطیلی، به صورت عددی تکرار شده است. این تست‌ها در شرایط مشابه (نه دقیقاً مشابه) با سری اولین آزمایش‌ها انجام شده‌اند و نتایج در حوزه فرکانس ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی، همخوانی قابل قبولی بین دامنه ممان رول اسلاشینگ و اختلاف فاز آن، را نشان می‌دهند. شبه‌سازی‌ها برای ۴ مورد متفاوت با دامنه‌ی رول متفاوت انجام شده است. سطح همخوانی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، با افزایش دامنه‌ی رول اندکی کاهش یافته است و احتمالاً این روند به دلیل ویژگی‌های غیر خطی است که با افزایش دامنه حرکت رول، افزایش می‌یابد. اختلاف فاز، همخوانی خوبی را برای همه‌ی موارد و در همه فرکانس‌های تست شده نشان می‌دهد.

مطالعات انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که حلگر اسلاشینگ ما قادر به شبه‌سازی بارهای اسلاشینگ درون مخزن ضد رول سطح آزاد با دقت قابل قبولی است. این حلگر را می‌توان با حلگر دریامانی برای مطالعه و شبه‌سازی دریامانی کشتی‌های

- Naval Architects and Marine Engineers. 2003;111:557-83.
- 4- Umeda N. Preventing parametric roll with use of devices and their practical impact. In Proceedings of the 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2007 2007.
- 5- Marzouk OA, Nayfeh AH. Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks. Ocean engineering. 2009;36(9-10):661-71.
- 6- Neves MA, Merino JA, Rodríguez CA. A nonlinear model of parametric rolling stabilization by anti-roll tanks. Ocean engineering. 2009;36(14):1048-59.
- 7- Ghamari I, Faltinsen OM, Greco M, Lugni C. Parametric resonance of a fishing vessel with and without anti-roll tank: an experimental and numerical study. In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2017 (Vol. 57731, p. V07AT06A012). American Society of Mechanical Engineers.
- 8- Ghamari I, Faltinsen OM, Greco M. Investigation of parametric resonance in roll for container carrier ships. In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2015 (Vol. 56598, p. V011T12A044). American Society of Mechanical Engineers.
- 9- Firoozkoobi R. Experimental, numerical and analytical investigation of the effect of screens on sloshing. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway, 2013.
- 10- Faltinsen OM, Timokha AN. Sloshing. Cambridge: Cambridge university press; 2009.