مطالعه آزمایشگاهی اثر اسلاشینگ بر حرکات یک کشتی حمل مایعات در امواج منظم

فرهود آذرسینا [۱*]، روزبه پناهی [۲]

[۱]استادیار، گروه صنایع دریایی، دانشکده علوم و فنون دریایی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی؛ f.azarsina@srbiau.ac.ir
[۲]استادیار، دانشکده مهندسی محیط زیست و عمران، دانشگاه تربیت مدرس؛ rpanahi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:
شناورهای حمل مایعات
اسلاشینگ
مطالعه آزمایشگاهی
دامنه امواج

چکیده

با توجه به اهمیت روزافزون شناورهای حمل گاز مایع طبیعی، هزینه بالای حوادث دریایی و نیز پروژه های مرتبط با طراحی و ساخت شناورهای حمل گاز مایع طبیعی نیاز بیش از پیش به مطالعه پدیده اسلاشینگ مایع درون مخزن این نوع شناورها بوجود آمده است. مقاله حاضر، بخشی از نتایج آزمایش‌های انجام شده در حوضچه کشش مجهز به موجساز، بر روی مدل یک به ۱۷۶ یک کشتی حمل مایعات دارای مخزن مستطیلی تحت اثر امواج از روبرو، پشت و پهلو است. این نوع آزمایش اسلاشینگ که مخزن داخل مدل کشتی نصب شده است، در ایران برای اولین بار تجربه شده و در دنیا نیز کم نظیر است. دامنه امواج اثر عمده ای بر دامنه جابجایی قائم (حرکت هیو) شناور دارد. از طرفی، نتایج آزمایش در امواج روبرو نشان می دهد که اسلاشینگ درون مخزن، باعث افزایش دامنه حرکات هیو و پیچ (غلتش طولی) شناور شده است. البته، در اغلب محدوده های فرکانسی، با افزایش دامنه امواج، اسلاشینگ مایع درون مخزن به صورت یک اثر میراگر بر حرکت هیو شناور عمل می کند.

Experimental Study of Sloshing Effect on Ship Motions in Regular Waves

Farhood Azarsina[1*], Roozbeh Panahi[2]

[1]Department of Marine Industries, Faculty of Marine Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
[2]Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 12 Mar. 2014
Accepted: 13 Jan. 2015
Available online: 11 Mar. 2015

Keywords:
Liquid carrying vessels
Sloshing
Experimental study
Wave amplitude

ABSTRACT

Given the increasing importance of vessels carrying liquefied natural gas (LNG), the high cost of incidents and also projects related to the design and construction of LNG transport vessels requires further investigation of fluid sloshing inside tanks of these vessels. This paper, reports the towing tank, equipped with a wave-maker, test results on a one-to-176 model of a product carrier with a rectangular tank exposed to head seas. This type of sloshing test in which the tank is installed within the ship model is one of a kind. Wave amplitude has a major effect on the amplitude of the vertical displacement (heaving) of the vessel. On the other hand, the test results show that the sloshing water inside the tank increases the range of heave and pitch motions of the vessel. However, in most frequency ranges, with increased wave amplitude, sloshing effect is such as a damper for the heave motion of the vessel.

۱- مقدمه

پیچیدگی معادلات حاکم بر سیال سبب می گردد که حتی نتایج روشهای عددی در بسیاری از موارد نیازمند تایید و اعتبار سازی به کمک نتایج تجربی باشند.اسلاشینگ پدیده ای است ناشی از حرکت تناوبی سطح آزاد مایع درون مخزن که موجب ایجاد نقاط حداکثر فشار (بارهای ضربه ای) روی دیواره ها می گردد. در تحلیل متداول از حرکات کشتی، معمولاً از اثر اسلاشینگ و سطح آزاد مایع درون مخزن کشتی صرفنظر می شود. حال آنکه مطالعات تجربی و عددی نشان می دهند که اثر اسلاشینگ مایع درون مخزن بر مانور شناور در حالت مخزن نیمه پراهمیت دارد. از جمله

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.6.1]

مهم ترین مطالعات آزمایشگاهی اسلاشینگ می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اندازه گیری دینامیک اسلاشینگ یک مخزن تعبیه شده در یک بارج [۱].
- مطالعه تجربی- آماری بارهای ضربه ای موج اسلاشینگ در مدل مخزن پوسته ای[۱] [۲].
- راستی آزمایی نتایج عددی اسلاشینگ در شناور حمل گاز مایع طبیعی با استفاده از نتایج تجربی روی یک مقطع دو بعدی از مخزن گاز مایع طبیعی با مقیاس ۰/۱ در دو ارتفاع پرشدگی کم و زیاد که طی آزمایش، فشار سنج ها[۲] و ارتفاع سنج ها[۳] و همچنین دو دوربین برای ثبت پدیده اسلاشینگ استفاده شده اند [۳].
- بررسی حداکثر فشارهای بلند مدت اسلاشینگ که بر مخزن پوسته ای وارد می شوند با در نظر گرفتن اثر ارتعاشات ناشی از کوبش شناور[۴] [۴].
- مطالعه توزیع فشار ناشی از اسلاشینگ مایع در یک مخزن مستطیلی به روش تجربی [۵].

شناورهای حمل گاز مایع طبیعی معمولاً چهار تا پنج مخزن دارند. شکل ۱ یک شناور حمل گاز مایع طبیعی را با چهار مخزن نشان می دهد. معمولاً مخزنی که از همه جلوتر است (مخزن شماره ۱) از بقیه مخازن کوچکتر است و ممکن است شکل آن قوس دار باشد تا در سینه شناور جا بگیرد. مخازن دیگر معمولاً هم شکل با سطح مقطع عرضی یکسان هستند. در اغلب موارد، مخزن شماره ۲ بیشترین اسلاشینگ را دارد که نتیجه اندازه و فاصله آن از مرکز کشتی (مبدا مختصات) می باشد. در آزمایش مدل و شبیه سازی عددی پدیده اسلاشینگ هندسه و موقعیت مخزن داخل شناور باید با حداکثر دقت ممکن ساخته شود.

ارتفاع پرشدگی مخازن در تحلیل اسلاشینگ در شناور حمل مایعات باید با توجه به راهنمای بارگیریکه توسط طراح شناور تامین شده، انتخاب شود. ارتفاع پرشدگی معمولاً به صورت نسبتی از ارتفاع مخزن H به صورت H ٪ یا نسبتی از طول مخزن L به صورت L ٪ بیان می شود. لازم به توجه است که ابعاد مخزن اندازه های داخلی هستند و اگر از نقشه های شناور برای اندازه گیری ابعاد مخزن استفاده شود، باید ضخامت دیواره ها کم شود. ارتفاع پرشدگی استاندارد[۵] برای شناورهای حمل گاز مایع طبیعی با ظرفیت کمتر از ۱۵۰,۰۰۰ متر مکعب عبارت است از ارتفاعهای بیشتر از H ۷۰٪ و کمتر از L ۱۰٪؛ همچنین در تحلیل اسلاشینگ برج پمپ[۶] ارتفاع پرشدگی L ۱۰٪، H ۷۰٪، H ۸۰٪، H ۹۰٪ و H ۹۵٪ باید لحاظ شود. درباره برج پمپ و اثر اسلاشینگ آن در ادامه توضیحی ارائه خواهد شد. علاوه بر ارتفاع های پرشدگی استاندارد می توان اسلاشینگ در ارتفاع پرشدگی H ۲۵٪، H ۳۰٪، H ۴۰٪، H ۵۰٪ و H ۶۰٪ را نیز بررسی کرد[۶].

آبخور، ارتفاع متاسنتریک و مرکز جرم شناور که پارامترهای مهمی در تحلیل حرکات شناور حمل مایعات در امواج هستند، در ارتفاع پرشدگی های مختلف تغییر می کنند. به طور کلی، تحلیل حرکات شناور در امواج در هر ارتفاع پرشدگی باید با توجه به شرایط بارگیری که در دستورالعمل بارگیری[۷] توسط سازنده شناور ارائه شده است انجام شود. در ارتفاع پرشدگی استاندارد، دو شرایط بارگیری زیر به نمایندگی ارتفاع پرشدگی کم و زیاد معرفی می شوند:

۱- بار پر[۸] هنگام رسیدن به مقصد: ارتفاع پرشدگی برابر یا بیشتر از H ۷۰٪.
۲- شرایط تعادل[۹] در هنگام رسیدن به مقصد: ارتفاع پرشدگی کمتر یا برابر L۱۰٪.

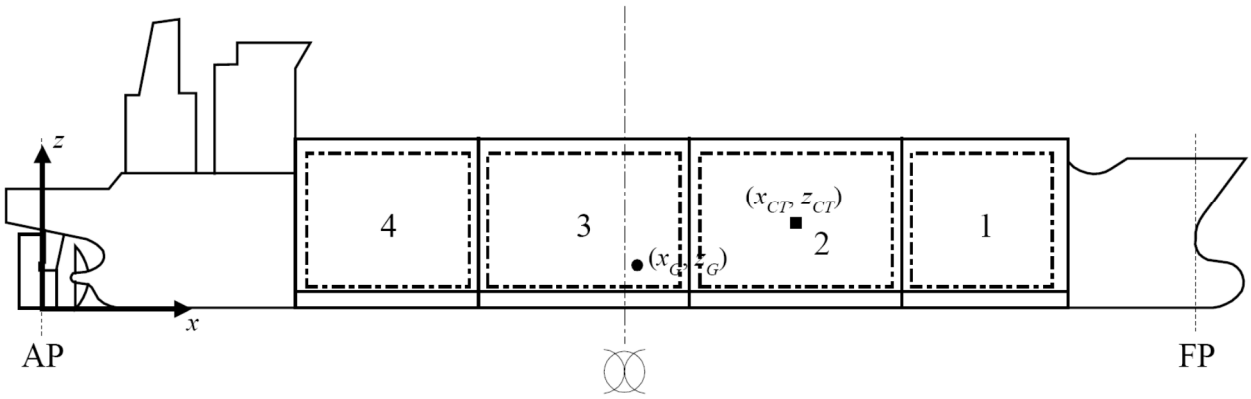
شکل ۲ نمای مخزن پوسته ای و اجزای آن را نشان می دهد. شرح تفصیلی بارگذاری اسلاشینگ و تحلیل سازه برج پمپ در مرجع [۷] ارائه شده است.

در مقاله حاضر،مدل یک به ۱۷۶ یک کشتی فرآورده‌بر دارای مخزن مستطیلی تحت اثر امواج روبرو، پهلو و پشت ارزیابی گردیده است. در این راستا و به منظور بررسی اثر اسلاشینگ بر عملکرد شناورهای حمل گاز مایع طبیعی، نخستین بار در کشور روشی برای اندازه‌گیری فشارهای اسلاشینگ در مخزن درون شناور و نیز اندازه‌گیری حرکات هیو پیچ شناور ارائه و نمونه سیگنال‌های اندازه‌گیری شده ارائه و تحلیل گردیده اند.

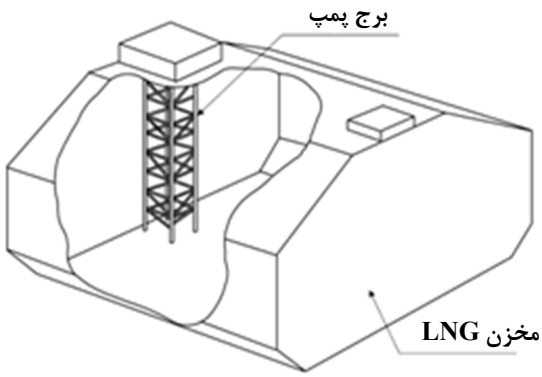
تجهیزات مطالعه فیزیکی در بخش دوم مقاله مرور گردیده است. ساخت مدل شناور و آماده سازی آزمایشگاه در بخش سوم مورد توجه قرار گرفته و در نهایت، برخی از داده های برداشت شده، گزارش گردیده و تحلیل گردیده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

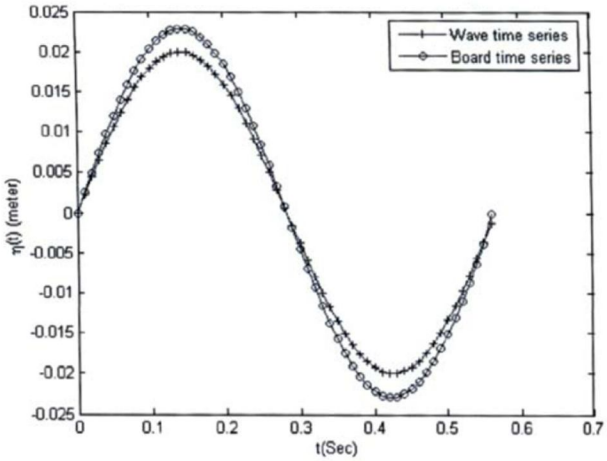
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.6.1]



شکل ۱- شناور حمل گاز مایع طبیعی با چهار مخزن [۶]



شکل ۲- شکل شماتیک برج پمپ در مخزن پوسته ای [۷]



شکل ۳- موج تولید شده در عمق ۱ متر با ارتفاع ۴ و طول موج ۵۰ سانتی متر [۸]

۲- ابزار آزمایش

۲-۱ حوضچه و موجساز

برای انجام آزمایش‌های اسلاشینگ از حوضچه کشش دانشگاه صنعتی شریف با سیستم کشش ارابه ریلی مجهز به دینامومتر با قابلیت اندازه‌گیری حرکات هیو و پیچ کشتی استفاده شده است. طول، عرض و عمق حوضچه به ترتیب ۲۵، ۲/۵ و ۱/۲ متر بوده و سرعت کشش از صفر تا ۴ متر بر ثانیه قابل تنظیم است.

موجساز مورد استفاده درحوضچه کشش از نوع لولایی است و قابلیت تولید امواج منظم و نامنظم دوبعدی با فرم مشخص را داشته و بدین ترتیب، امکان مطالعه تأثیر متقابل امواج و کشتی را فراهم می آورد. نتایج حاصل از آزمایش های عملی و تحلیل درصد خطای ایجاد امواج منظم در [۸] گزارش شده است. در این مطالعه، آزمایش ها برای موجهایی با طول موج ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتیمتر با دامنه های متغیر انجام شد. به عنوان نمونه در شکل ۳ تصویری از موج ایجاد شده با طول موج ۵۰ سانتیمتر و دامنه موج ۲ سانتیمتر، در عمق یک متر به همراه دامنه حرکت صفحه موجساز آورده شده است.

۲-۲- ساخت مدل شناور و نصب تجهیزات در آن

برای ساخت مدل شناور حمل گاز مایع طبیعی، ابتدا اطلاعات مربوط به ویژگی های اصلی و جانمایی کلی چند شناور حمل مایعات مرور و گردآوری و درنهایت، از فرم بدنه یک شناور حمل مایعات به طول کل ۱۷۶ متر، عرض ۳۱ متر، آبخور ۹ متر و ضریب مکعبی ۰/۸ استفاده گردید.

اندازه مدل شناور با توجه به امکانات ساخت و انجام آزمایش محدود می شود. به علاوه قوانین تشابه و قانون برابری اعداد فرود نیز باید مورد توجه قرار گیرد. هر چه مدل بزرگتری آزمایش شود امکان نزدیک شدن به شرایط یکسان لایه مرزی بر روی سطوح بدنه شناور اصلی و بدنه مدل بیشتر می شود. از سوی دیگر امکانات ساخت و نیز اثر مرزهای حوضچه آزمایش، باعث محدودیت برای افزایش ابعاد مدل می گردد. بدین ترتیب، طول کل مدل یک متر تعیین و مقیاس یک به ۱۷۶ در نظر گرفته شده است و برای بررسی آنکه نسبت اندازه مدل به سطح مقطع حوضچه آزمایش طوری است که نتایج آزمایش از لایه مرزی دیواره ها تاثیر نمی پذیرند، درستی نامساوی های زیر بررسی شد[۹]:

$$B_m = \frac{31}{176} = 0.176\,\mathrm{m} \le 0.1 \times B_{TT} \qquad (۱)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.6.1]

$$T_m = \frac{9}{176} = 0.0511\,\mathrm{m} \le 0.1 \times h_{TT} \quad (۲)$$

$$S_m = C_m \times B_m \times T_m = 0.009\,\mathrm{m}^2 \le 0.4 \times A_{TT} \quad (۳)$$

که B، T و S به ترتیب عرض، آبخور و سطح مقطع میانی مدل کشتی (با اندیس m) هستند، و B، h و A به ترتیب عرض، عمق و مساحت مقطع آزمایش (با اندیس TT) هستند. همچنین، Cm ضریب سطح مقطع میانی کشتی است. بنابراین طبق روابط (۱) تا (۳) شرایط پیشگیری از اثر دیواره برای این ابعاد مدل برقرار است. همچنین با استفاده از برابری عدد فرود سرعت مدل برای آزمایش کشش در آب آرام بدست می آید. با توجه به آمار موجود از شناورهای حمل گاز مایع طبیعی، با فرض آنکه شناور اصلی با سرعت کاری ۱۸ گره دریایی حرکت کند، سرعت معادل برای مدل به شکل زیر محاسبه می شود:

$$V_m = 18\,\mathrm{kn} \times 0.514 \times \sqrt{\frac{1}{176}} = 0.7\,\mathrm{m/s} \quad (۴)$$

این سرعت شرط عدد رینولدز بحرانی را نیز برآورده می کند. در جمع بندی مشخصات مدل در جدول ۱ دیده می شوند.بدترین شرایط اسلاشینگ برای یک شناور حمل گاز مایع طبیعی، در حالت عمق کم پرشدگی در مخزن شماره ۲ (از سمت سینه کشتی طبق شکل ۱) در موج از پهلو است [۲]. ابعاد مخزن و جانمایی آن در مدل با مقیاس یک به ۱۷۶ طبق جدول ۲ بدست می آیند.

جدول ۱- مشخصات مدل مورد استفاده در آزمایش های اسلاشینگ

طول کل مدل	۱ m
عرض مدل	۰/۱۸ m
آبخور مدل	۰/۰۵ m
سنگینی مدل در آب شیرین	۶/۹ kg
سرعت کشش مدل معادل با سرعت کاری	۰/۷ m/s

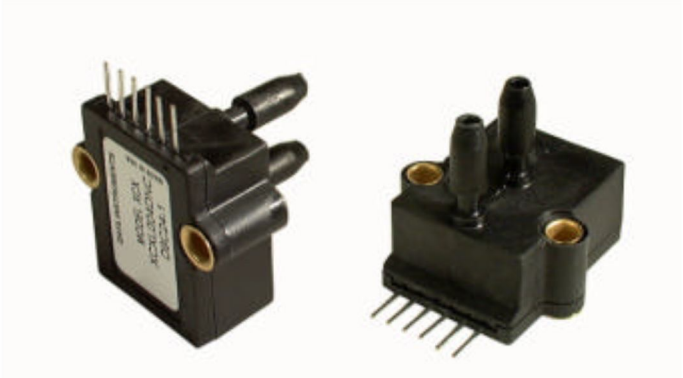
جدول۲- ابعاد مخزن و جانمایی آن در مدل برای آزمایش اسلاشینگ

مشخصات مخزن	مقادیر
طول مخزن $L_T\,(cm)$	۱۸
عرض مخزن $B_T\,(cm)$	۱۴
ارتفاع مخزن $H_T\,(cm)$	۱۲
فاصله صفحه جلویی مخزن از دماغه شناور $d_T\,(cm)$	۲۷
فاصله مخزن از کف شناور $a_T\,(cm)$	۱/۵
وزن آب داخل مخزن در حالت پر $m_T\,(kg)$	۲/۴۳۱

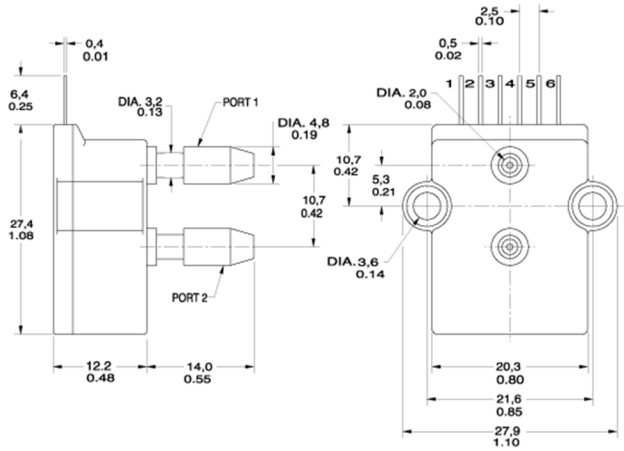
لازم به توجه است که ابعاد مخزن در جدول ۲، ابعاد بیرونی است و ضخامت دیواره ها از جنس پلکسی گلاس برابر ۰/۵ سانتیمتر می باشد. لازم به تذکر است که با توجه به ابعاد کوچک مخزن، در مقایسه با مخزن واقعی، عدد رینولدز غیر مغشوش ممکن است باعث ایجاد اختلاف در نتایج گردد.

۲-۳- ابزار اندازه گیری فشار اسلاشینگ

حسگر فشار مورد استفاده در این آزمایشها از نوع XCX05DN می باشد که توانایی اندازه گیری فشار در محدوده صفر تا ۵psiرا دارد. در شکل ۴ نمایی از این حسگر و در شکل ۵ ابعاد آن به طور شماتیک دیده می شود.



شکل ۴- نمایی از حسگر فشار مورد استفاده در آزمایش های اسلاشینگ



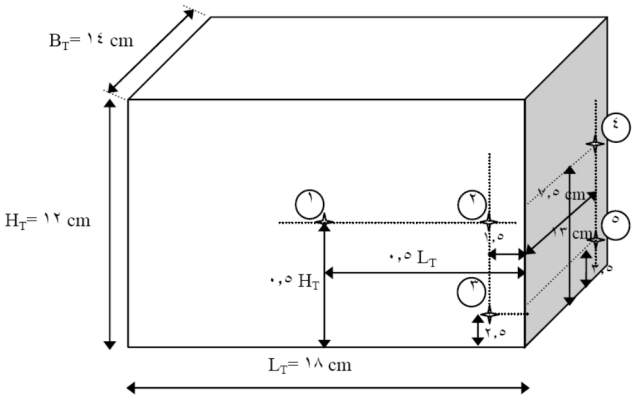
شکل ۵- ابعاد حسگر فشار مورد استفاده در آزمایش های اسلاشینگ

تعداد پنج عدد از این سنسور تهیه و در مخزن شناور جهت اندازه گیری فشار نصب می گردد. برای مطالعه فشار اسلاشینگ طبق گزارش مراجع [۲]، [۳] و [۴] به طور معمول با تعداد بیشتری حسگر که در نقاط تمرکز فشار اسلاشینگ نصب می شوند انجام می گیرد. در شکل ۶ نقاط مورد نظر برای اندازه گیری فشار، مشابه مرجع [۲] –با این تفاوت که در [۲] از صفحات کوچک متشکل از فشارسنج های متعدد روی هر صفحه استفاده شده است– در کنج های بالا و پایین مخزن تعبیه می گردند. یک حسگر نیز در وسط صفحه طولی مخزن تعبیه می گردد؛ لازم به تذکر است که بدترین

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.6.1]

شرایط اسلاشینگ در امواج از پهلو فشار به دیواره طولی مخزن و کنج ها وارد می آید. همچنین، قطر خروجی حسگر طبق شکل ۵، ۴/۸ میلیمتر معادل با ۰/۱۹ اینچ می باشد که مرکز این خروجی در شکل ۶ با علامت ستاره برای حسگرهای ۱ تا ۵ مشخص شده است.



شکل ۶- نقاط مورد نظر برای اندازه گیری فشار؛ تمام اندازه ها از بیرون هستند و ضخامت هر وجه پلکسی ۰/۵ سانتیمتر است.

۳- نتایج

بررسی آزمایشگاهی پدیده اسلاشینگ طی سه بخش زیر انجام شد:

- برخورد با امواج از روبرو
- برخورد با امواج از پشت
- برخورد با امواج از پهلوبازاویه ۳۰ درجه

در هر سه حالت بالا، یک مجموعه از شرایط فرکانس برخورد امواج، ارتفاع و طول موج با مخزن خالی، یک مجموعه از شرایط مشابه با ۲۰ درصد ارتفاع پرشدگی و یک مجموعه با ارتفاع ۷۰ درصد ارتفاع پرشدگی مخزن آزمایش شده اند. بنابراین ورودی های هر آزمایش فرکانس برخورد امواج، ارتفاع و طول موج و ارتفاع پرشدگی آب درون مخزن می باشند. همانگونه که معرفی شد، انتظار می رود در هر آزمایش در امواج روبرو مقادیر حرکت هیو و حرکت پیچ شناور به عنوان خروجی ثبت شوند. مسلماً، در حالت مخزن نیمه پر فشارهای اسلاشینگ مایع درون مخزن نیز ثبت می شوند.

شکل ۷، مدل را که با زاویه ۳۰ درجه رو به موجساز به دینامومتر نصب شده در حین آزمایش نشان می دهد. در آزمایش امواج از پهلو، مدل در حوضچه ثابت نگهداشته شده و موج به سمت آن فرستاده می شود. در شکل ۸ از نمایی نزدیکتر، بورد ثبت فشار روی عرشه مدل دیده می شود.

در مجموع، آزمایش‌های اسلاشینگ طبق دسته‌بندی جدول ۳ انجام شده‌اند. همانطور که مشخص است در مجموع ۶۶ آزمایش اسلاشینگ در سه حالت موج از روبرو، از پشت و پهلو در این تحقیق انجام شده‌اند. در ادامه نمونه‌ای از نتایج بدست آمده ارائه می‌شوند.

نمونه ای از سیگنال‌ها، که هر ۱۰ میلی ثانیه مقدار سرعت کشش ارابه، و حرکات هیو و پیچ مدل کشتی را ثبت می کنند، در شکل‌های ۹ تا ۱۱ برای آزمایش مدل در امواج منظم روبرو به ارتفاع ۲/۱ سانتی متر، طول موج ۰/۸ متر و سرعت کشش مدل ۰/۵ متر بر ثانیه معادل با فرکانس برخورد با امواج ۲ سیکل بر ثانیه با ارتفاع پرشدگی مخزن ۲۰ درصد نمایش داده شده اند. در جدول ۴ مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی آزمایش در امواج روبرو ارائه شده اند؛ به ترتیب از راست به چپ: سرعت کشش مدل، دامنه موج، طول موج، دامنه نوسان هیو، مقدار میانگین هیو ثبت شده،دامنه نوسان پیچ، مقدار میانگین پیچ ثبت شده. دو مجموعه ۱۰ تایی با همین ورودی ها اما یکی با ۲ سانتی متر و دیگری با ۷ سانتی متر آب درون مخزن نیز انجام شدو نتایج کل این ۳۰ آزمایش در امواج روبرو در ادامه در شکلهای ۱۲ و ۱۳ ارئه شده اند. در جدول ۴، برای هیو و پیچ مقدار متوسط و دامنه به ترتیب با اندیس av و amp محاسبه شده اند (شکلهای ۷ و ۸ را ببینید).

جدول ۴- تست مدل به وزن ۶/۹ کیلوگرم با آبخور ۵ سانتیمتر در امواج روبرو

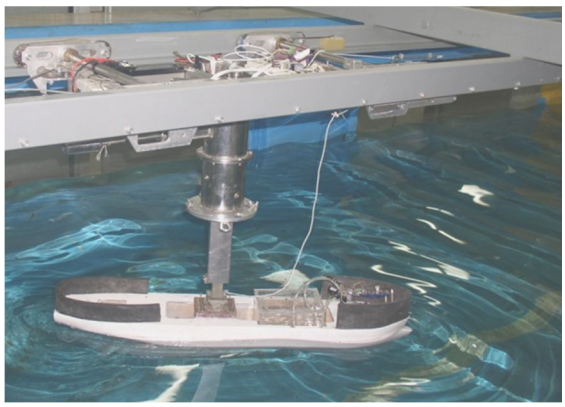
شماره تست	U (m/s)	A (cm)	L (m)	z_{amp} (cm)	z_{av} (cm)	θ_{amp} (deg)	θ_{av} (deg)
۱	۰/۵	۱/۶	۰/۸	۰/۲	۰/۴	۰/۲۵	-۰/۱۵
۲	۰/۵	۱/۶	۱/۱۷	۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۸	-۰/۱۵
۳	۰/۵	۱/۶	۰/۵	۰/۲	۰/۳	۰/۱	-۰/۱
۴	۰/۲۵	۱/۶	۰/۸	۰/۳	۰	۰/۴	-۰/۱
۵	۰/۷۵	۱/۶	۰/۸	۰/۲	۰/۷	۰/۱۵	-۰/۳
۶	۰/۵	۲/۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴۵	۰/۹۵	-۰/۱۵
۷	۰/۵	۲/۱	۱/۱۷	۲	۰/۴	۲/۵	-۰/۴۵
۸	۰/۵	۲/۱	۰/۵	۰/۶	۰/۲	۰/۳	-۰/۱
۹	۰/۲۵	۲/۱	۰/۸	۱/۲۵	-۰/۱	۲/۵	-۰/۳
۱۰	۰/۷۵	۲/۱	۰/۸	۰/۴	۰/۷	۰/۷	-۰/۱۵

جدول ۳-مجموع آزمایش‌های اسلاشینگ که در این تحقیق انجام شدند

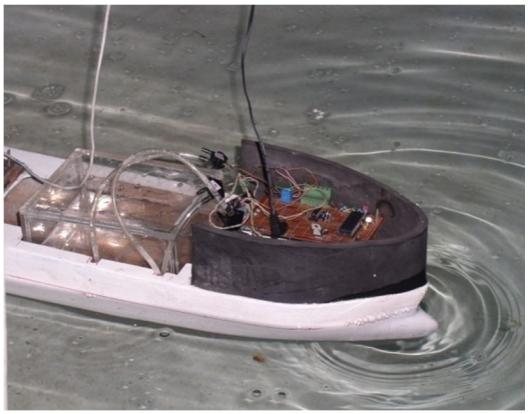
شرایط امواج	تعداد آزمایش	دامنه امواج (cm)	فرکانس برخورد (cyc/s)	سرعت کشش (m/s)	ارتفاع آب درون مخزن (cm)	خروجی‌های ثبت شده
امواج روبرو	۳۰	۱/۶ و ۲/۱	۱/۵ تا ۲/۸	۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵	۰، ۲ و ۷	حرکات هیو و پیچ
امواج از پشت	۱۸	۱/۶	۱ تا ۱/۸	۰	۰، ۲ و ۷	حرکات هیو و پیچ
امواج از پهلو	۱۸	۱	۱ تا ۱/۸	۰	۰، ۲ و ۷	حرکات هیو و پیچ

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

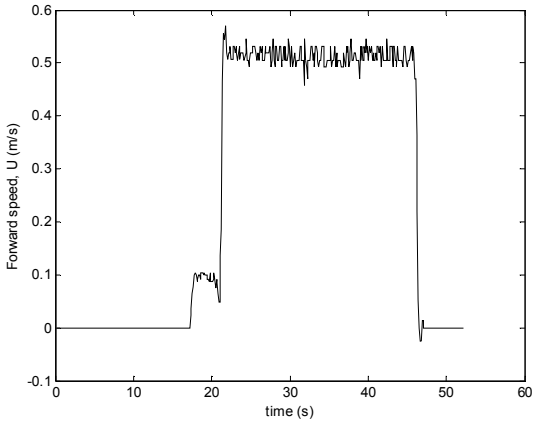
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.6.1]



شکل۷- مدل شناور در آزمایش اسلاشینگ در امواج از پهلو با زاویه ۳۰ درجه زیر دینامومتر و ارابه کشش بسته شده است

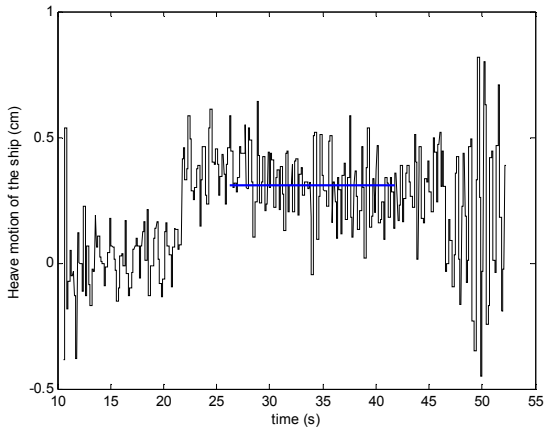


شکل۸- مدل شناور در آزمایش اسلاشینگ؛ حسگرهای فشار به بورد الکترونیکی و از سمت دیگر به مخزن وصل شده اند.

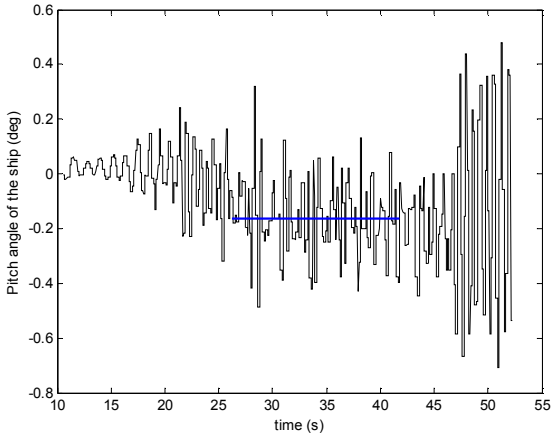


شکل ۹- سرعت رو به جلوی مدل نسبت به زمان در آزمایش امواج روبرو، آب درون مخزن ۲ سانتیمتر

مسلماً، بخشی از سیگنال ها که متناظر با قسمت سرعت ثابت در شکل ۹ است، یعنی از حدود ۲۰ تا ۴۵ ثانیه، مورد نظر است. خط آبی در شکل های ۱۰ و ۱۱ نمایانگر میانگین سیگنال ثبت شده است.



شکل ۱۰- حرکت هیو مدل نسبت به زمان در آزمایش امواج روبرو، آب درون مخزن ۲ سانتیمتر



شکل ۱۱- حرکت پیچ مدل نسبت به زمان در آزمایش امواج روبرو، آب درون مخزن ۲ سانتیمتر

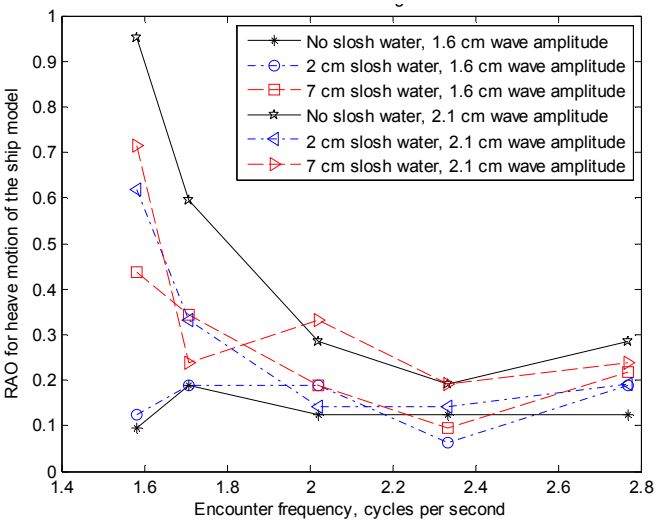
طبق داده های بدست آمده می توان تاثیر اسلاشینگ بر دامنه حرکات کشتی را بررسی نمود. در شکل ۱۲ نمودار رائوی حرکت هیو شناور در امواج روبرو در سه حالت مخزن خالی، با ۲ سانتی متر آب اسلاشینگ و با ۷ سانتی متر آب اسلاشینگ مقایسه شده اند. لازم به تذکر است که آزمایش در امواج روبرو شامل دو مجموعه ارتفاع موج یکی ۱/۶ و دیگری ۲/۱ cm هستند. در شکل ۱۳ نمودار رائوی حرکت پیچ شناور در امواج روبرو در سه حالت مخزن خالی، با ۲ سانتی متر آب اسلاشینگ و با ۷ سانتی متر آب اسلاشینگ مقایسه شده اند. لازم به توضیح است که رائوی هیو از تقسیم دامنه هیو شناورکه در هر آزمایش ثبت شد تقسیم بر دامنه موج آن آزمایش بدست می آید.از طرفی، شیب موج از تقسیم زاویه پیچ کشتی θ به شیب موج β طبق رابطه زیر بدست می آید:

$$RAO_{pitch} = \theta/\beta \qquad (۵)$$

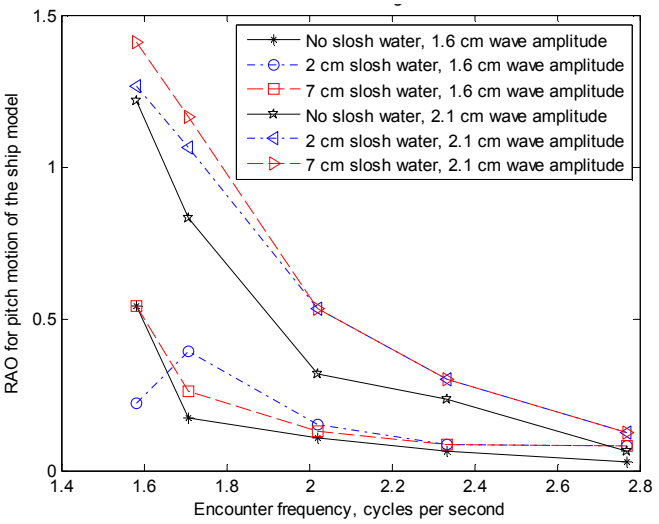
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.6.1]

که شیب موج از تقسیم ارتفاع موج (دو برابر دامنه) بـر طـول مـوج حساب می شود. باید توجه داشت که زاویـه پـیچ کشـتی در رابطـه (۵) بر حسب رادیان استفاده شود.



شکل ۱۲- نمودار رائوی حرکت هیو شناور در سه حالت مخزن خالی، با ۲ سانتی متر آب اسلاشینگ و با ۷ سانتی متر آب اسلاشینگ در امواج منظم روبرو با ارتفاع ۱/۶ و ۲/۱ سانتی متر



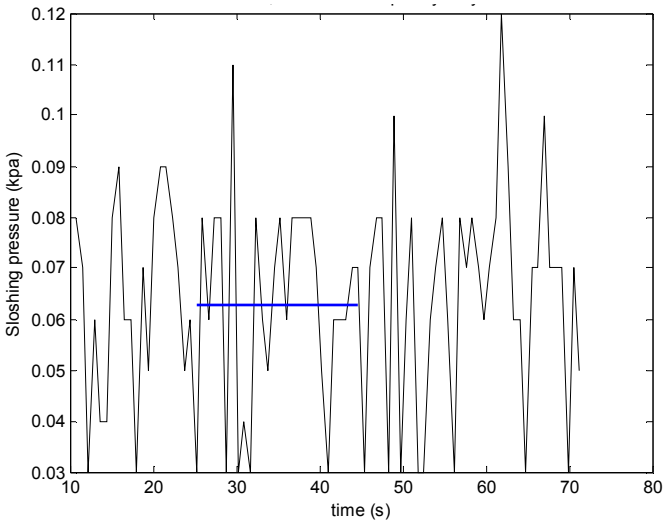
شکل ۱۳- نمودار رائوی حرکت پیچ شناور در سه حالت مخزن خالی، با ۲ سانتی متر آب اسلاشینگ و با ۷ سانتی متر آب اسلاشینگ در امواج منظم روبرو با ارتفاع ۱/۶ و ۲/۱ سانتی متر

فشارهای اسلاشینگ توسط حسگرهای فشار شماره ۱ تا ۵ (شماره گذاری بر اساس شکل ۶) طی آزمایشها به طور همزمان توسط بورد ثبت فشار که روی عرشه مدل قرار دارد (شکل ۸)، ثبت شدند. نمونه ای از فشارهای اسلاشینگ در آزمایش امواج از پهلو با ارتفاع آب درون مخزن ۲ سانتیمتر ثبت شده توسط حسگرهای شماره ۱ و ۵ به ترتیب در شکل های ۱۴و۱۵ نشان داده شده اند.

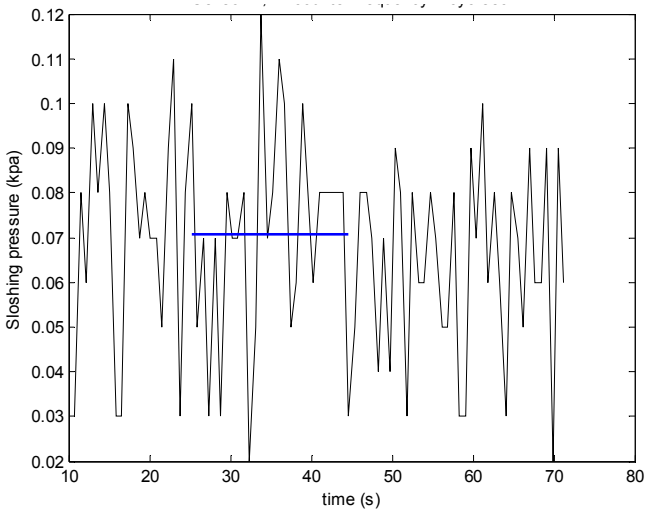
همانطور که در مقدمه اشاره شد، آکیلدیز و اونال توزیع فشار ناشی از اسلاشینگ مایع را در یک مخزن مستطیلی به روش تجربی مطالعه کرده اند [۵]. مخزن مورد استفاده آنها نیز به شکل یک مکعب مستطیل به طول ۹۲ سانتی متر بوده و فشارسنجی که در گوشه پایینی مخزن نصب بوده، در محلی مشابه فشارسنج شماره ۵ در این تحقیق، فشار اسلاشینگ به بزرگی ۰/۸ کیلوپاسکال را ثبت کرد. توضیح اینکه آزمایش در ارتفاع پرشدگی ۲۵٪ انجام شد. برای مقایسه، با توجه به اینکه فشار (هیدرواستاتیک) رابطه مستقیم با بعد طولی دارد ($\rho g h$ که h عمق آب است)، می توان فشار اسلاشینگ در دو مخزن مذکور را به طول هر مخزن تقسیم و با هم مقایسه کرد.

تحقیق حاضر: $0.07\text{kPa}/0.18\text{ m} = 0.39$

تحقیق [۵]: $0.8\text{kPa}/0.92\text{ m} = 0.86$



شکل ۱۴- فشار اسلاشینگ با ارتفاع آب درون مخزن ۲ سانتیمتر که توسط حسگر شماره ۱ در امواج از پهلو ثبت شده؛ فرکانس و دامنه حرکت هیو و پیچ شناور به ترتیب ۱ سیکل بر ثانیه، ۲ سانتیمتر و ۲/۵ درجه



شکل ۱۵- فشار اسلاشینگ با ارتفاع آب درون مخزن ۲ سانتیمتر که توسط حسگر شماره ۵ در امواج از پهلو ثبت شده؛ فرکانس و دامنه حرکت هیو و پیچ شناور به ترتیب ۱ سیکل بر ثانیه، ۲ سانتیمتر و ۲/۵ درجه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.6.1]

مسلماً عبارت $g\rho$ در فشار هیدرواستاتیک مقدار یکسانی در این مقایسه دارد که در صورت استفاده از آن در مخرج روابط بالا نتیجه به صورت بی بعد خواهد بود. البته این مقایسه با در نظر گرفتن شباهت های این دو تحقیق انجام شد و باید توجه داشت که دو آزمایش شرایط عیناً یکسانی نداشته و نمی توان انتظار داشت نتایج عیناً منطبق باشند.

۴- محاسبه فرکانس طبیعی سیستم و بحث درباره تشدید

با توجه به نتایج بدست آمده و با محاسبه فرکانس طبیعی کشتی در حرکات هیو و پیچ می توان تشدید یا رزونانس حرکات را بررسی کرد. فرکانس طبیعی مود حرکت هیو که یک حرکت انتقالی است از رابطه زیر بدست می آید:

$$\omega = \sqrt{k/m} \qquad (۶)$$

که mجرم کشتی و k سختی سیستم است. سختی سیستم مربوط به آن است که وقتی کشتی، نسبت به وضعیت تعادل یعنی حالتی که در آبخور d نیروهای وزن و شناوری برابر هستند، در راستای قائم (حرکت هیو) به اندازه Δdتغییر آبخور دهد (در آب فرو رود یا از آب بیرون آید)، به اندازه ΔV حجم زیر آب کشتی تغییر می کند (زیاد یا کم می شود):

$$\Delta V = A_{wp} \times \Delta d \qquad (۷)$$

که A_{wp} مساحت صفحه آبخور کشتی است. در نتیجه نیروی شناوری به اندازه ΔB تغییر می کند:

$$\Delta B = \rho g \times \Delta V = \rho g \times A_{wp} \times \Delta d \qquad (۸)$$

بنابراین، کشتی از حالت تعادل که در آن نیروهای وزن و شناوری برابر هستند به حالتی می رود که نیروی شناوری در اثر تغییر آبخور، شبیه به نیرویی که در یک فنر کشیده یا فشرده ایجاد می شود، متناسب با جابجایی هیو کشتی افزایش یا کاهش یافته است، به عبارتی:

$$\Delta B = k \times \Delta d \ , \ k = \rho g A_{wp} \qquad (۹)$$

که k همان سختی سیستم در حرکت هیو است.

جرم مدل آزمایشگاهی کشتی m برابر با۶/۹ کیلوگرم است. در حالتی که مخزن اسلاشینگ ۲ و ۷ سانتی متر آب دارد، این جرم به ترتیب ۷/۳ و ۸/۳ کیلوگرم است. برای این کشتی حمل گاز مایع با تعریف ضریب ظرافت مساحت صفحه آبخور به صورت زیر:

$$C_w = \frac{A_{wp}}{L \times B} \qquad (۱۰)$$

و با فرض ضریب ۰/۸، طول۱ متر و عرض ۰/۱۸ متر، مساحت صفحه آبخور کشتیA_{wp} برابر با ۰/۱۴ متر مربع حساب می شود. بنابراین سختی سیستم هست:

$$k = \rho g A_{wp} = 1000 * 9.81 * 0.14 = 1412.6\ N/m \qquad (۱۱)$$

در نهایت فرکانس طبیعی حرکت هیو در سه حالت مخزن خالی، و با ۲ و ۷ سانتی متر آب درون مخزن حساب می شود:

$$\omega(0) = \sqrt{k/m} = \sqrt{1412.6/6.9} = 14.3\frac{rad}{s} = 2.28\ cps$$
$$\omega(2) = 2.21\ cps$$
$$\omega(7) = 2.08\ cps \qquad (۱۲)$$

که در رابطه بالا فرکانس به صورت تابعی از ارتفاع آب درون مخزن محاسبه شده است. البته منحنی های شکل ۱۲ در این فرکانس ها نشان دهنده وضعیت تشدید به آن معنا که دامنه پاسخ حداکثر مطلق باشد را ندارند؛ اما مثلاً منحنی مربوط به آب اسلاشینگ ۷ سانتی متر در ارتفاع موج ۲/۱ سانتی متر در شکل ۱۲، در فرکانس حدود ۲ دور بر ثانیه یک حداکثر نسبی دارد. لازم به تذکر است که داده های آزمایش به صورت گسسته در چند فرکانس معدود ثبت شده اند و خطوط شکل ۱۲ صرفاً برای دنبال کردن الگوی تغییرات، داده ها را به هم وصل کرده اند. به علاوه، احتمالاً سیستم به دلیل وجود میرایی (میرایی لزجی ناشی از اصطکاک میان آب و بدنه کشتی و میرایی مربوط به درگ فشاری) در فرکانسی کمتر از فرکانس طبیعی دچار تشدید می شود. همچنین، ارتفاع نسبتاً بزرگ امواج در آزمایشها، پاسخ هیو را از محدوده خطی که معادله حرکت سیستم جرم-فنر-دمپر برای آن نوشته و بحث تشدید به شکل منحنی های دامنه و فاز مطرح می شود، خارج کرده و به محدوده غیرخطی می برد. در نهایت باید خطای آزمایش را نیز در نظر گرفت.

۵- نتیجه گیری

طبق توضیحات ارائه شده، در مجموع ۳۰ آزمایش در امواج روبرو انجام شد که نیمی از آنها در امواج روبرو با ارتفاع ۱/۶ و نیمی در امواج روبرو با ارتفاع ۲/۱ بوده اند. دامنه حرکت هیو شناور در هر دو حالت مخزن خالی و نیمه پر در امواج بلندتر به طور عمده بزرگتر از دامنه حرکت هیو شناور در امواج کوتاهتر است. بنابراین، دامنه امواج اثر عمده ای بر دامنه حرکت هیو شناور دارد.

از مقایسه رائوی حرکت هیو شناور در شکل ۱۲ در سه حالت مخزن خالی، با ۲ سانتی متر آب اسلاشینگ و با ۷ سانتی متر آب اسلاشینگ در امواج با دامنه کوتاه، به نظر می رسد که آب اسلاشینگ درون مخزن باعث افزایش دامنه حرکت هیو شناور شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.6.1]

است. اما، از مقایسه دامنه حرکت هیو شناور در امواج با دامنه بلند در شکل ۱۲ به نظر می رسد که آب اسلاشینگ درون مخزن باعث کاهش دامنه حرکت هیو شناور شده است. در اغلب محدوده های فرکانسی، مشخص است که دامنه حرکت هیو شناور با آب اسلاشینگ نسبت به مخزن خالی کمتر است. با توجه به اینکه فشارهای اسلاشینگ درون مخزن با افزایش دامنه امواج افزایش می یابد، می توان پیش بینی کرد که در امواج بلندتر، اسلاشینگ مایع درون مخزن به صورت یک اثر میراگر بر حرکت هیو شناور عمل می کند.

از طرفی، از مقایسه رائوی حرکت پیچ شناور در شکل ۱۳ در سه حالت مخزن خالی، با ۲ سانتی متر آب اسلاشینگ و با ۷ سانتی متر آب اسلاشینگ هم در امواج با دامنه کوتاه و هم در امواج با دامنه بلند، آب اسلاشینگ درون مخزن باعث افزایش دامنه حرکت پیچ شناور شده است.

در بخش دیگری از مقاله فرکانس طبیعی کشتی در مود حرکت هیو نیز محاسبه شد و از منظر تشدید مورد بحث قرار گرفت.

۶- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و شهرسازی، در انجام پروژه تحقیقاتی جاری تحت عنوان تهیه راهنمای بررسی اثر پدیده اسلاشینگ بر مانور شناورهای حمل مایعات با شماره قرارداد ۳۴/۱۱/۱/۱۲۱۸۹ مورخ ۱۳۸۸/۸/۲۳ - که مقاله حاضر بخشی از نتایج آن می باشد- قدردانی می گردد.

کلید واژگان

1- Membrane tank
2- Pressure transducer
3- Water height probes
4- Slamming-induced vibrations
5- Standard filling level
6- Pump tower
7- Loading manual
8- Full load
9- Ballast condition

۷- مراجع

1- Nasar, T., Sannasiraj, S.A. and Sundar, V., 2008,*Experimental study of liquid sloshing dynamics in a barge carrying tank*, *Fluid Dynamics Research*, 40, p. 427–458.

2- Graczyk, M. and Moan, T., 2008, *A probabilistic assessment of design sloshing pressure time histories in LNG tanks*, Ocean Engineering, 35 p. 834–855.

3- Wemmenhove, R., Luppes, R., Veldman, A. E. P., and Bunnik, T., 2007, *Numerical simulation and model experiments of sloshing in LNG tanks*, International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Barcelona-Spain.

4- Graczyk, M., Moan, T., and Wu, M. K., 2007, *Extreme sloshing and whipping-induced pressures and structural responsein membrane LNG tanks*, Ships and Offshore Structures, Vol. 2 No. 3 p. 201–216.

5- Akyildiz, H. and Unal, E., 2005, *Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing*, Ocean Engineering, 32, p.1503–1516.

6- ABS, Strength assessment of membrane-type LNG containment systems under sloshing loads, American Bureau of Shipping, April 2006.

7- ABS, Sloshing and structural analysis of LNG pump tower, American Bureau of Shipping, April 2006.

۸- امینی، میثم، "طراحی و ساخت موجساز لولایی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷.

۹- ITTC 2005, Testing and Extrapolation Methods Manoeuvrability: Captive Model Test Procedures, International Towing Tank Conference, 7.5-02-06-02, Revision 02.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.6.1]