

# اندازه‌گیری مقاومت افزوده و تریم شناور لنج در امواج

## خلیج فارس به روش تجربی و تعمیم نتایج به لنج واقعی

رضا دروستکار<sup>۱</sup>، ابوذر ابراهیمی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

۲- استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

### چکیده:

شناورهای سنتی لنج از سال‌ها قبل در کشور ایران و سایر کشورهای حوزه خلیج فارس و دریای عمان جهت حمل و نقل کالا و صید آبیان استفاده می‌شوند و از لحاظ اقتصادی نقش مهمی در زندگی مردم جنوب کشور ایفا می‌کنند. ساخت این شناورها همواره به صورت سنتی در کارگاه‌های لنج سازی انجام می‌شود و تاکنون تحقیقات کاملی بر روی مقاومت افزوده و حرکات این شناورها انجام نشده است. این پژوهش به بررسی تجربی مقاومت افزوده شناور لنج در امواج می‌پردازد. یک مدل لنج به طول ۹۵ سانتی‌متر از یک لنج واقعی با طول ۲۱/۱ متر ساخته شده و در حوضچه کشش شهدای خلیج فارس آزمایش شد. تست‌ها در آب آرام و امواج منظم در سرعت‌های مختلف انجام شده است. نتایج حاصل از حرکات شناور نشان می‌دهد تریم دینامیکی در سرعت‌های پایین به علت فشار کمتر در قسمت سینه شناور مقدار کوچکی است. با افزایش سرعت، تریم دینامیکی به دلیل افزایش فشار در قسمت سینه شناور، افزایش پیدا می‌کند. نتایج مقاومت افزوده شناور در امواج نشان می‌دهد در سرعت‌های پایین، مقاومت افزوده بسیار بالا است؛ اما با افزایش سرعت، مقاومت افزوده کاهش می‌یابد و حتی در سرعت‌های بسیار بالا، مقاومت افزوده منفی می‌شود.

### واژه‌های کلیدی:

شناور لنج، مقاومت افزوده، حوضچه کشش، تست مدل، امواج خلیج فارس.

## Measurement of Added Resistance and Trim of Dhow Vessel in the Waves of the Persian Gulf by Experimental Method

Reza Dorostkar<sup>1</sup>, Abouzar Ebrahimi<sup>2\*</sup>

1-Master's student, Chabahar University of Maritime and Marine Sciences

2- Assistant Professor, Marine Engineering Department Chabahar Maritime University Chabahar-Iran

### Abstract

Traditional barges have been used for years in Iran and other countries in the Persian Gulf and the Oman Sea for transporting goods and fishing, and they play an important role economically in the lives of the people of the south of the country. The construction of these vessels is done traditionally and so far no complete research has been done on the added resistance and movements of these floats. In the current research, the experimental investigation of the added resistance of the dhow vessel in waves has been investigated. A 95 cm long barge model was made from a vessel with a length of 21.1 meters and tested in the Persian Gulf Martyrs towing tank. Tests have been done in calm water and regular waves at different speeds. The results of the tests show that the dynamic trim at low speeds is a small amount due to the lower pressure in the floating chest. With the increase in speed, the dynamic trim increases due to the increase in pressure in the bow of the vessel. The results of the added resistance floating in the waves show that at low speeds, the added resistance is very high, but as the speed increases, the added resistance decreases, and even at very high speeds, the added resistance becomes negative.

### Keywords

Dhow Vessel, Added Resistance, Towing Tank, Model Test, Persian Gulf Waves

\* Corresponding author: ab\_ebrahimi@yahoo.com

در مطالعه اریباس<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۱]، از چند تئوری مختلف برای پیش‌بینی مقاومت افزوده در کشتی استفاده شده است. در این تحقیق تست‌های صورت گرفته برای مدل‌های تک‌بدنه مورد بررسی و صحت‌سنجی قرار گرفته است. آزمایش‌ها و نتایج به‌دست‌آمده بر روی امواج از روبرو متمرکز شده است که از نظر مقاومت افزوده بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق، نتایج تجربی با نتایج عددی مقایسه شده و در مورد دامنه کاربرد نظریه‌های ارائه‌شده نتیجه‌گیری شده است.

شائو<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۲]، از یک فرمول جایگزین برای دریامانی خطی و تجزیه و تحلیل مقاومت افزوده بر اساس سیستم مختصات استفاده کردند. مطالعات عددی برای یک بدنه اصلاح‌شده ویگلی، یک کشتی سری ۶۰ با ضریب بلوک ۰/۷ و کشتی کانترینری ۱۷۵S انجام شده است. نتایج ارائه‌شده برای نوسانات اجباری هیو و پیچ، پاسخ‌های حرکتی و مقاومت افزوده در امواج از روبرو تطابق خوبی با نتایج تجربی و برخی مطالعات عددی دیگر نشان می‌دهد.

در تحقیق دان<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۳]، مقاومت افزوده برای یک کشتی بزرگ مدرن در امواج کوتاه، مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، فرمول تخمینی برای محاسبه مقاومت افزوده در امواج کوتاه ارائه شده است.

لی<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۴]، تحقیقی را بر روی مقاومت افزوده یک کشتی کانترینر مدرن تحت رول پارامتریک به روش عددی انجام دادند. آنها از روش پانل رانکین در حوزه زمان برای به دست آوردن حرکات کشتی و مقاومت افزوده در امواج استفاده کردند و در نهایت، یک روش پیش‌بینی ساده برای مقاومت افزوده کشتی در هنگام رول پارامتریک نامنظم ارائه دادند که بر اساس روش همبستگی بنا نهاده شده است. آنها در نهایت دقت و کارایی این روش را با روش‌های محاسباتی دیگر مقایسه کردند.

در مطالعه یو<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۵]، مقاومت افزوده و حرکات مدل نفت کش KVLCC۲ تحت تأثیر ۱۴ موج منظم با استفاده از نتایج تجربی و عددی بررسی شد.

لنج‌ها شناورهای سنتی هستند که از قدیم در جنوب کشور استفاده می‌شوند. لنج‌های موجود در دریای خلیج فارس و دریای عمان به لحاظ کاربری شامل دو نوع باری و صیادی هستند که نقش مهمی در جابه‌جایی کالا، صید آبزیان و اشتغال‌زایی استان‌های ساحلی ایفا می‌کنند. با افزایش کاربری لنج باری و صیادی، بررسی هیدرودینامیکی این شناورها بسیار ضروری به نظر می‌رسد. بسیاری از شناورهای لنج در مناطقی فعالیت دارند که ممکن است امواج دریا بسیار بزرگ باشد (خلیج فارس و دریای عمان). این امواج باعث می‌شود که سیستم رانش لنج نتواند نیروی تراست مورد نیاز را به خوبی تأمین کند. در نتیجه نیروی امواج بر تراست پروانه غلبه کرده و هدایت شناور به سختی امکان‌پذیر خواهد بود. این امواج می‌تواند سبب شکستگی بدنه و در نهایت غرق شدن شناور شود. با توجه به آسیب‌پذیری سازه این شناورها در امواج بزرگ دریا، لازم است مقاومت افزوده در امواج در بررسی سیستم رانش و پروانه مدنظر قرار گیرد. اغلب این شناورها در محدوده خلیج فارس فعالیت می‌کنند. از این رو در تحقیق حاضر، مقاومت افزوده، تریم و فرورفتگی آبدنه لنج در امواج خلیج فارس با استفاده از تست تجربی در حوضچه کشش اندازه‌گیری شد. بدین منظور، یک مدل کوچک از یک لنج واقعی ساخته شده و در حوضچه کشش با یک موج منظم آزمایش شد. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی بهتر و ایمن‌تر بدنه و پروانه لنج‌ها بسیار مفید باشد و از خروجی‌های آن در جهت کاهش مصرف سوخت شناور و نیز افزایش ایمنی شناور در امواج استفاده کرد.

تاکنون تحقیقات کاملی بر روی مقاومت افزوده و حرکات لنج‌ها در امواج انجام نشده است. موضوع مقاومت افزوده برای کشتی‌های تجاری مانند نفتکش‌ها و کانترینرها نیز بسیار حائز اهمیت بوده و تحقیقات زیادی بر روی این موضوع انجام شده است. در این قسمت مطالعات قبلی در این زمینه بررسی شده است.

<sup>6</sup> Duan

<sup>7</sup> Lee

<sup>8</sup> Yu

<sup>2</sup> Sinkage

<sup>3</sup> Arribas

<sup>4</sup> Head waves

<sup>5</sup> Shao

طول موج، سرعت حرکت کشتی و زاویه برخورد موج بر مقاومت افزوده و دریامانی تریماران بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات مقاومت افزوده شده و دامنه حرکات تریماران در امواج کاملاً متأثر از شیب و زاویه برخورد موج بوده و رفتار آن متفاوت از کشتی‌های تک‌بدنه سنتی است.

## ۲- مقاومت افزوده در امواج

سرعتی که یک کشتی می‌تواند در آب‌های آرام به دست آورد به مقاومت، راندمان پروانه و قدرت موتور آن بستگی دارد. در آب‌وهوای نامساعد، مقاومت کل در اثر امواج و باد تغییر می‌کند و تغییرات روی بار پروانه معمولاً باعث کاهش راندمان پروانه می‌شود. سرعتی که کشتی می‌تواند برای یک قدرت موتور معین به دست آورد معمولاً با این اثرات کاهش می‌یابد. این کاهش سرعت غیرارادی اغلب به بیش از دو یا سه گره نمی‌رسد؛ اما ممکن است منجر به خسارات مالی قابل توجهی برای کشتی‌های تجاری شود [۱۰].

یک کشتی که در امواج منظم حرکت می‌کند دارای مقاومت نوسانی خواهد بود. در امواج از روبرو، مقدار میانگین مقاومت بیشتر از مقاومت در برابر آب آرام خواهد بود و تفاوت ممکن است به تأثیر امواج نسبت داده شود [۱۱]. مقاومت کل کشتی ( $R_t$ ) در امواج را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$R_t = R_c + R_{av} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $R_c$  مقاومت در آب آرام و  $R_{av}$  مقاومت افزوده در امواج است. با توجه به نوسانات موج برخوردی به کشتی، نمودار مقاومت افزوده کشتی نیز نوسانی است و معمولاً مقدار میانگین نمودار را به‌عنوان مقاومت افزوده بیان می‌کنند.

## ۳- اطلاعات لنج واقعی و مدل

شناور مورد مطالعه یک شناور لنج صیادی است که در یک کارگاه لنج‌سازی در جزیره قشم از جنس فایبرگلاس ساخته شده است. در شکل ۱ نمای مقاطع عرضی و در شکل ۲ نمای جانبی لنج نمایش داده شده است.

مقادیر متوسط فاز مقاومت کل در شرایط آب آرام و موج ثابت تقریباً یکسان بود؛ اگرچه دامنه در شرایط آب آرام کوچک‌تر از شرایط با موج ثابت بود.

سئو و همکاران [۶]، از یک کد دینامیک سیالات محاسباتی OpenFOAM برای پیش‌بینی مقاومت افزوده و حرکات یک کشتی استفاده کردند. آنها ۵ موج روبرو با طول موج‌های مختلف با نسبت  $\lambda/L_{pp}$  بین ۰/۶۵ تا ۱/۹۵ را بررسی و نتایج مقاومت افزوده و هیو و پیچ کشتی را با نتایج تست‌های مدل مقایسه کردند. نتایج نشان داد هنگامی که طول موج تقریباً با طول کشتی برابر بود، مقاومت افزوده در مقایسه با طول موج‌های دیگر بیشتر است.

پارک<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۷]، مقاومت افزوده یک کشتی نفت‌کش را به‌صورت تجربی در امواج مورب بررسی کردند. این آزمایش‌ها در حوضچه کشتی SSPA و برای هفت موج مورب با زاویه ۰ تا ۱۸۰ درجه انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد در شرایط امواج مورب در دریا، یک نفت‌کش با سرعت طراحی، نتایج محاسباتی داده‌های روش پانل رانکین حاضر به‌خوبی با نتایج تجربی مطابقت داشت. نتایج روش نواری نیز همخوانی خوبی با نتایج تجربی داشت؛ اما مقاومت افزوده بیشتر از نتایج تجربی بود.

در تحقیق لیو و همکاران [۸]، بررسی جامعی را بر روی مطالعات تجربی منتشر شده در مورد مقاومت افزوده کشتی در امواج انجام دادند و با استفاده از این بانک اطلاعاتی شامل حدود ۳۰۰۰ داده برای ۱۳۰ کشتی با نوع و اندازه‌های مختلف، یک فرمول تجربی برای تقریب مقاومت افزوده در امواج منظم به دست آوردند. تجزیه و تحلیل خطا برای سناریوهای مختلف نشان داد عملکرد فرمول توسعه‌یافته رضایت‌بخش است.

در تحقیق گونگ و همکاران [۹]، مطالعه عددی بر روی مقاومت افزوده و دریامانی یک شناور تریماران در امواج مورب غیرخطی را با استفاده از یک روش ترکیبی به نام QaleFOAM انجام شده است. این روش می‌تواند یک تریماران را که در یک میدان موج بزرگ حرکت می‌کند با در نظر گرفتن اثرات لزجت و برهمکنش بدنه و امواج شبیه‌سازی کند. آنها این روش عددی را با داده‌های تجربی برای یک تریماران در امواج اعتبارسنجی کردند. در این تحقیق، اثرات پارامترهای مختلف از قبیل شیب موج،

<sup>9</sup> Park

جهت اندازه‌گیری مقاومت افزوده، در ابتدا باید مقاومت در آب آرام اندازه‌گیری شود. مطمئن‌ترین روش جهت اندازه‌گیری مقاومت مدل، روش تست تجربی است. در این روش، مدل با سرعت مشخصی در حوضچه توسط ارابه کشش حرکت داده می‌شود و مقدار نیروی وارد بر بدنه مدل توسط نیروسنج‌های نصب‌شده بر روی مدل اندازه‌گیری می‌شود. در این تحقیق، تست‌های مدل در حوضچه کشش آزمایشگاه شهدای خلیج فارس انجام شده است.

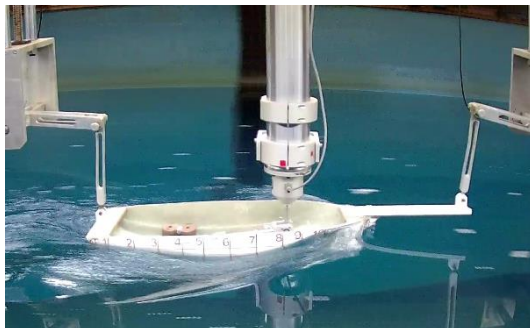
#### ۴-۱- تست در آب آرام

تست‌های آب آرام در ۴ سرعت مختلف انجام شده که مشخصات این تست‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. علاوه بر مقاومت مدل، مقدار فرورفتگی<sup>۱</sup> و تریم مدل نیز اندازه‌گیری می‌شود. مقدار فرورفتگی در واقع تغییرات آب‌خور مدل در اثر تغییرات توزیع فشار در اطراف مدل است و مقدار مثبت آن به معنی افزایش آب‌خور است. همچنین، با توجه به تنظیمات سنسورهای اندازه‌گیری، مقدار مثبت تریم به معنی تریم به سمت پاشنه است.

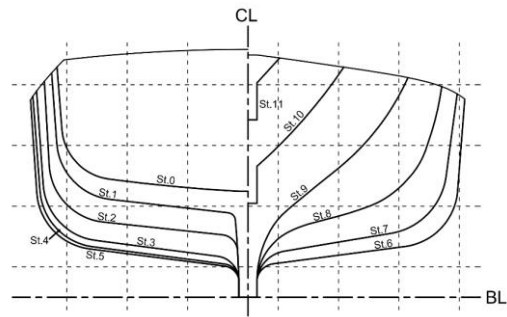
جدول ۲: تست‌های انجام شده در آب آرام

شماره تست	سرعت (متر بر ثانیه)
۱	۰/۵
۲	۰/۸
۳	۱/۱
۴	۱/۵

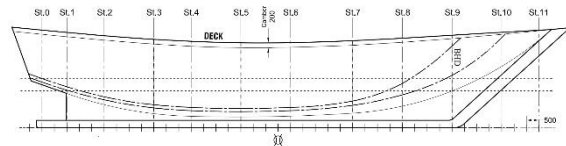
قابل ذکر است که سرعت طراحی لنج ۱۰ گره معادل ۵/۱۴ متر بر ثانیه بوده است که در مقیاس مدل، معادل ۱/۱ متر بر ثانیه است. در شکل ۴ تست مدل در آب آرام نمایش داده شده است.



شکل ۴: تست مدل در آب آرام



شکل ۱: نقشه خطوط بدنه لنج

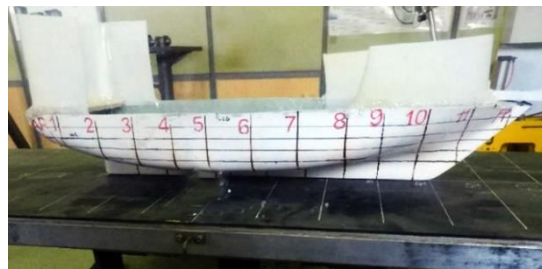


شکل ۲: ابعاد کلی شناور لنج

ابعاد لنج واقعی و لنج مدل در جدول ۱ ارائه شده است. جدول ۱: اطلاعات شناور لنج واقعی و مدل

مدل لنج	لنج واقعی	
طول	۲۱/۱ متر	۹۵ سانتی‌متر
عرض	۷/۱ متر	۳۲ سانتی‌متر
ارتفاع	۳/۳ متر	۱۵ سانتی‌متر
آب‌خور	۲/۲ متر	۱۰ سانتی‌متر
سرعت طراحی	۵/۱۴ m/s (۱۰ گره)	۱/۱ m/s

جهت ساخت مدل لنج، نقشه سه‌بعدی بدنه با استفاده از نرم‌افزار راینو طراحی و توسط دستگاه CNC بر روی فوم با چگالی بالا تراش کاری شد. سپس مدل با استفاده از این قالب و با الیاف فایبرگلاس لایه‌گذاری شد. مدل لنج در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳: مدل شناور لنج

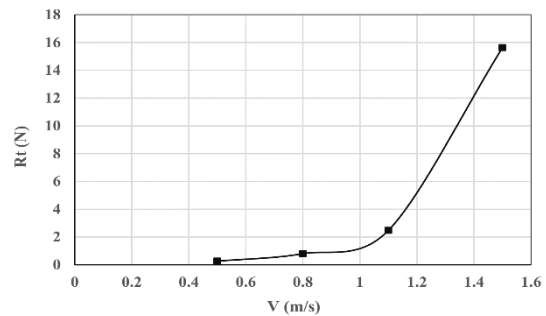
#### ۴-۲ تست مدل در حوضچه کشش

همان گونه که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، مقدار مقاومت، تریم و فرورفتگی مدل در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه نسبت به سرعت ۱/۱، تغییرات چشمگیری دارد. دلیل این امر آن است که این سرعت برای یک مدل لنج (معادل ۱۴ گره دریایی در لنج واقعی) سرعت بسیار بالایی محسوب می‌شود؛ زیرا در این سرعت عدد فرود شناور به بیش از ۰/۵ می‌رسد و بنابراین سرعت شناور از محدوده عدد فرود شناورهای جابجایی فراتر رفته و وارد محدوده فرود شناورهای نیمه جابجایی می‌شود (شناورهای با عدد فرود کمتر از حدود ۰/۴ به‌عنوان شناورهای جابجایی و شناورهای با عدد فرود بین ۰/۴ تا ۱ به‌عنوان نیمه جابجایی شناخته می‌شوند [۱۲]). طبیعتاً در این سرعت، نیروهای هیدرودینامیکی نسبت به حالت جابجایی (سرعت‌های پایین) افزایش شدیدی خواهد داشت. این پدیده سبب افزایش شدید مقاومت کل لنج در این سرعت شده است. همچنین، با توجه به اینکه فرم بدنه لنج از نوع جابجایی<sup>۱۱</sup> است. در این نوع فرم بدنه، برخلاف بدنه‌های نیمه جابجایی یا پروازی، در سرعت‌های بسیار بالا، آب‌خور شدیداً افزایش می‌یابد (مطابق شکل ۶) و این پدیده سبب افزایش شدید مقاومت می‌شود.

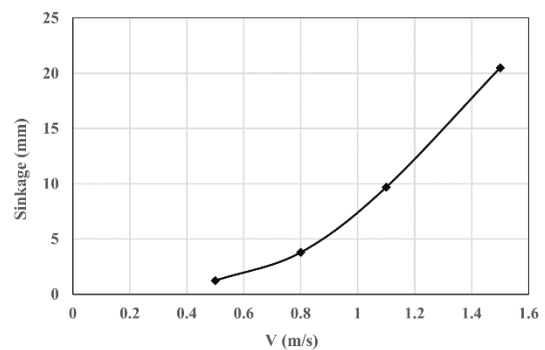
#### ۴-۲- نتایج تست مدل در امواج

اغلب شناورهای لنج در محدوده خلیج فارس و دریای عمان فعالیت می‌کنند. بیشتر حوادث دریایی برای لنج‌ها هنگامی اتفاق می‌افتد که دریا طوفانی است و امواج بزرگی به وجود می‌آید که به لنج برخورد می‌کنند. در این حالت، با توجه به ناتوانی سیستم رانش این شناورها در تقابل با امواج، قادر به حرکت نیستند. در نتیجه به شدت آسیب‌پذیر شده و ممکن است بدنه آنها دچار شکستگی و آب‌گرفتگی شده و نهایتاً غرق شوند. یکی از اهداف این تحقیق، بررسی اثرات امواج خلیج فارس بر روی حرکات و مقاومت این شناورها است. به همین دلیل، در این بخش تست مدل در امواج مقیاس شده خلیج فارس انجام خواهد شد. با توجه به اطلاعات امواج منطقه خلیج فارس [۱۳]، موج غالب این منطقه دارای ارتفاع حدود ۱ متر و پریود ۵ ثانیه است که با در نظر گرفتن مقیاس مدل شناور لنج و اعمال قوانین تشابه، ارتفاع این موج در حالت مدل حدود ۵ سانتی‌متر و

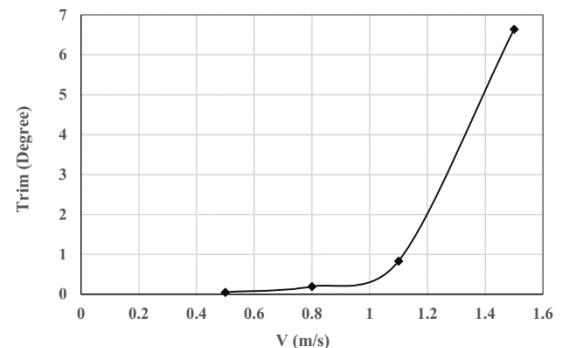
نمودار مقاومت کل ( $R_t$ )، فرورفتگی و تریم دینامیکی مدل برحسب سرعت در آب آرام در شکل‌های ۵ تا ۷ و جدول ۳ نمایش داده است.



شکل ۵: مقاومت کل مدل در سرعت‌های مختلف در آب آرام



شکل ۶: فرورفتگی مدل در سرعت‌های مختلف در آب آرام



شکل ۷: تریم دینامیکی مدل در سرعت‌های مختلف در آب آرام

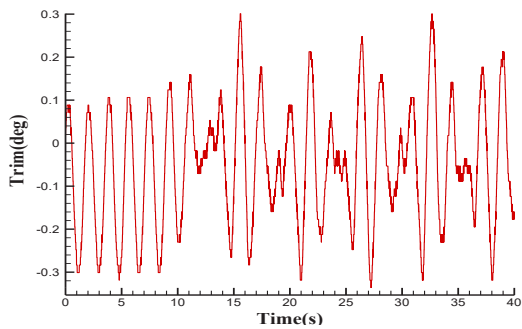
جدول ۳: مقاومت، فرورفتگی و تریم دینامیکی در آب آرام

شماره تست	سرعت (متر بر ثانیه)	مقاومت (نیوتن)	فرورفتگی (میلی‌متر)	تریم دینامیکی (درجه)
۱	۰/۵	۰/۲۶۳	۱/۲۴	۰/۰۵
۲	۰/۸	۰/۸۰۵	۳/۷۹	۰/۱۹۵
۳	۱/۱	۲/۴۷۷	۹/۶۹	۰/۸۳۲
۴	۱/۵	۱۵/۶۲	۲۰/۴۷	۶/۶۴

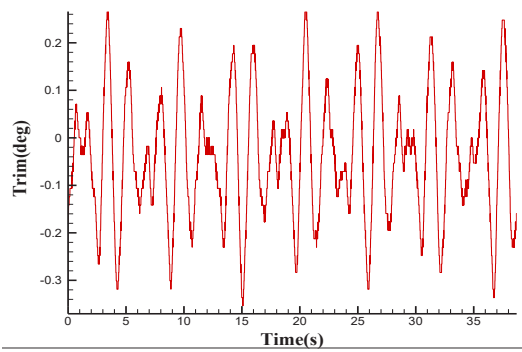
<sup>1</sup> Displacement



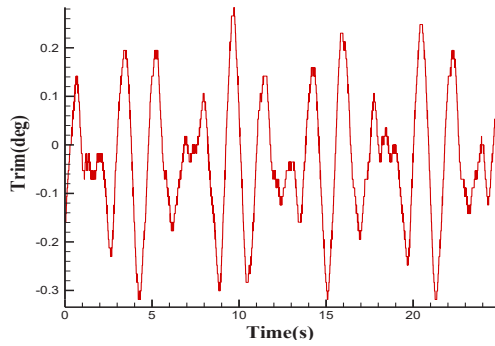
یکی از اثرات موج از روبرو، تغییر تریم دینامیکی شناور است. در شکل ۹ نمودار تغییرات تریم دینامیکی شناور در امواج در سرعت‌های مختلف نمایش داده شده است.



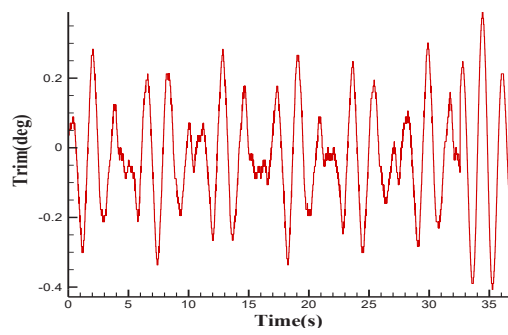
(الف)



(ب)



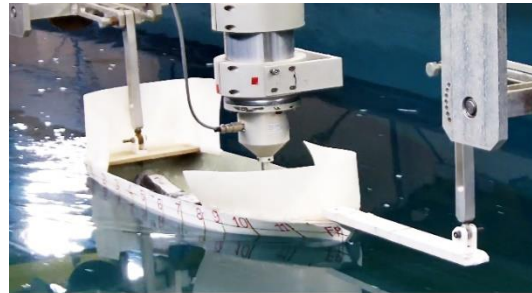
(ج)



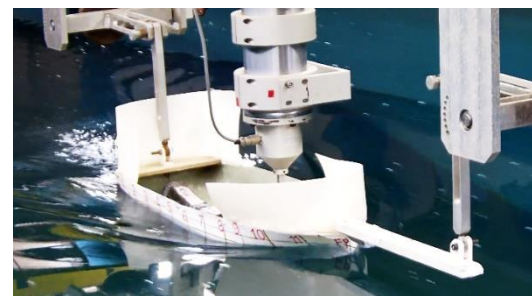
(د)

شکل ۹: تریم دینامیکی مدل در موج الف)  $0.5 \text{ m/s}$  (ب)  $0.8 \text{ m/s}$  (ج)  $1.1 \text{ m/s}$  (د)  $1.5 \text{ m/s}$

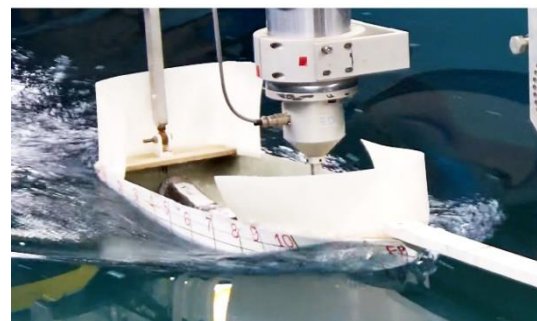
پریود آن حدود ۱ ثانیه خواهد بود. در این موج، تست مدل مشابه آب آرام در ۴ سرعت مختلف انجام شد. با توجه به اینکه بدترین حالت ممکن برای یک شناور، امواج روبرو<sup>۱۲</sup> است، تست‌ها در این حالت انجام گرفت. در شکل ۷ مدل در حال تست در موج با ارتفاع ۵ سانتی‌متر و پریود ۱ ثانیه مشاهده می‌شود.



(الف)



(ب)



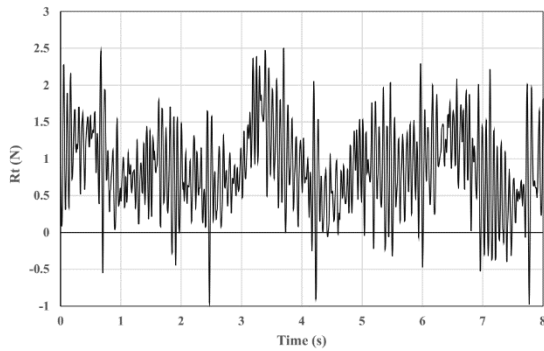
(ج)



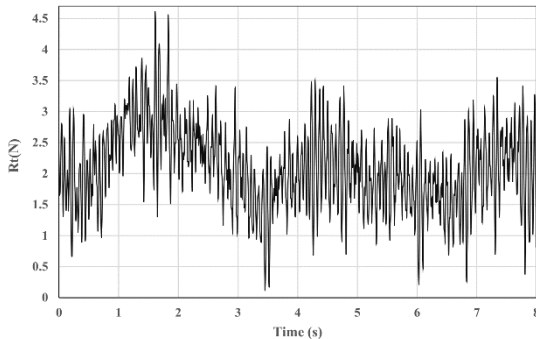
(د)

شکل ۸: تست مدل در امواج روبرو، الف)  $0.5 \text{ m/s}$  (ب)  $0.8 \text{ m/s}$  (ج)  $1.1 \text{ m/s}$  (د)  $1.5 \text{ m/s}$

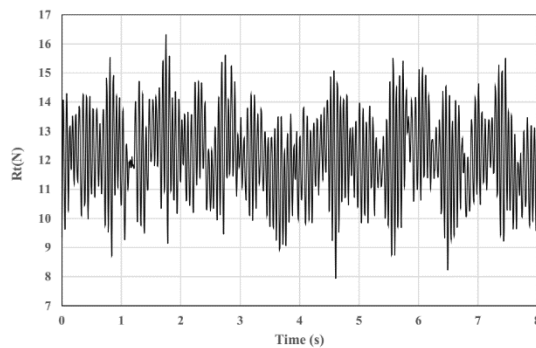
<sup>1</sup> Head Sea <sup>2</sup>



(ب)



(ج)



(د)

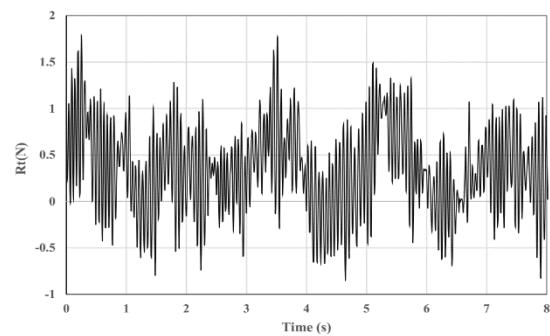
شکل ۱۰: مقاومت کل مدل در امواج، الف)  $0.5 \text{ m/s}$  ب)  $0.8 \text{ m/s}$

ج)  $1.1 \text{ m/s}$  د)  $1.5 \text{ m/s}$

با توجه به برخورد موج منظم سینوسی به شناور، نمودار مقاومت برحسب زمان نیز دارای شکل سینوسی خواهد. این نمودار دارای بیشینه، کمینه و میانگین است و آنچه در طراحی سیستم رانش باید مدنظر قرار گیرد، میزان ماکزیمم مقاومت در امواج است. اگرچه در برخی از تحقیقات، مقدار میانگین نیز مطرح شده است. با توجه به نمودارهای شکل ۱۰، ماکزیمم نیروی مقاومت در سرعت  $0.5$  متر بر ثانیه،  $1/2$  نیوتن است. در سرعت  $0.8$  متر بر ثانیه، بیشینه مقاومت کل به  $1/9$  نیوتن می‌رسد. با افزایش سرعت، تنش برشی، مقاومت اصطکاکی و مقاومت موج‌سازی شناور افزایش می‌یابد. به همین دلیل، در سرعت

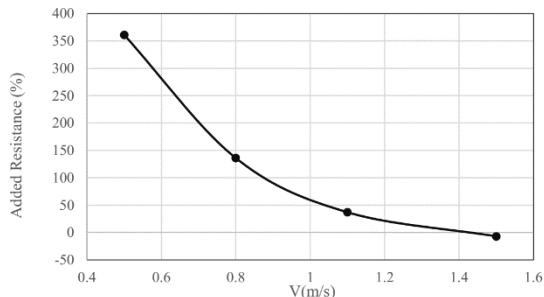
همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تریم دینامیکی شناور در سرعت‌های مختلف دارای نوسانات شدیدی است. با توجه به برخورد موج به صورت سینوسی، تغییرات تریم نیز نوسانی خواهد بود. هنگامی که قله موج به سینه شناور برخورد می‌کند؛ تریم به سمت پاشنه (تریم مثبت) ایجاد خواهد شد؛ اما پس از عبور موج، وقتی قله موج به قسمت پاشنه شناور می‌رسد سبب تریم به سمت سینه (تریم منفی) می‌شود. در سرعت  $0.5$  متر بر ثانیه، مقدار تریم دینامیکی مدل حدود  $0.1$  درجه است که در این سرعت، تریم شناور نسبت به آب آرام افزایش یافته است. در سرعت  $0.8$  متر بر ثانیه، تریم شناور نسبت به آب آرام ثانیه مقداری افزایش پیدا کرده است؛ اما نسبت به آب آرام کاهش یافته است. در سرعت  $1/1$  متر بر ثانیه (معادل  $10$  نات در لنج واقعی) که سرعت طراحی شناور لنج می‌باشد؛ مقدار تریم دینامیکی حدود  $0.15$  درجه است که نسبت به آب آرام مقدار کمتری است؛ اما نوسانات تریم دینامیکی در امواج بیشتر از تریم دینامیکی در آب آرام است. در سرعت  $1/5$  متر بر ثانیه، تریم دینامیکی شناور حدود  $0.18$  درجه را نشان می‌دهد که نسبت به آب آرام (حدود  $6/64$  درجه)، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت برخورد امواج با مشخصات ذکر شده، سبب کاهش تریم دینامیکی شناور شده است. ذکر این نکته ضروری است که این موضوع برای تمام امواج صادق نیست؛ زیرا در صورتی که نسبت طول موج به طول شناور تغییر کند، موقعیت قله و قعر موج بر روی بدنه نیز تغییر می‌کند و این موضوع سبب خواهد شد رفتار تریم دینامیکی شناور متفاوت باشد.

در شکل ۱۰ تاریخچه زمانی مقاومت کل مدل در امواج در سرعت‌های مختلف نمایش داده شده است.



(الف)

که در این رابطه،  $R_{tw}$  بیشینه مقاومت در امواج و  $R_c$  مقاومت در آب آرام است. با توجه به مقادیر مقاومت در آب آرام و امواج، درصد مقاومت افزوده در سرعت‌های مختلف محاسبه شده و مقدار آن در شکل ۱۲ و جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۱۲: درصد مقاومت افزوده مدل لنج در امواج با ارتفاع ۵ سانتی‌متر و پریود ۱ ثانیه

جدول ۵: درصد مقاومت افزوده در امواج با ارتفاع ۵ سانتی‌متر و پریود ۱ ثانیه

شماره تست	سرعت (متر بر ثانیه)	درصد مقاومت افزوده
۱	۰/۵	۳۵۶/۲۷
۲	۰/۸	۱۳۶/۰۲۴
۳	۱/۱	۳۷/۲۶۲
۴	۱/۵	-۷/۱۷

همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، مقاومت افزوده در سرعت‌های پایین بسیار زیاد است؛ اما با افزایش سرعت، مقاومت افزوده در امواج کاهش یافته است. حتی در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه، درصد مقاومت افزوده به کمتر از صفر رسیده است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، فرورفتگی مدل در امواج نسبت به آب آرام به شدت کاهش یافته است. کاهش فرورفتگی سبب کاهش سطح خیس و در نتیجه کاهش مقاومت کل مدل می‌شود. این موضوع بخصوص در سرعت‌های ۱/۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه بسیار مشهودتر است. به همین دلیل درصد مقاومت افزوده در سرعت‌های بالاتر کاهش یافته و حتی منفی شده است.

#### ۴-۴- تعمیم نتایج به لنج واقعی

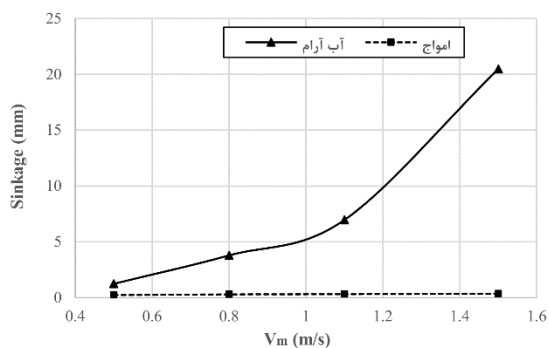
برای تعمیم نتایج مدل به لنج واقعی، از روش موسوم به ITTC-57 [۱۴] استفاده می‌شود. در این روش، مقاومت

۱/۱ متر بر ثانیه که سرعت طراحی لنج می‌باشد؛ بیشینه مقاومت حدود ۳/۴ نیوتن را نشان می‌دهد. در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه که مقاومت موج‌سازی و اصطکاکی به شدت افزایش پیدا کرده است، مقاومت کل مدل در این سرعت به حدود ۱۴/۵ نیوتن رسیده است. در جدول ۴، خلاصه نتایج تست مدل در امواج آمده است.

جدول ۴: مقاومت، فرورفتگی و تریم دینامیکی در سرعت‌های مختلف برای ارتفاع موج ۵ سانتی‌متر و پریود ۱ ثانیه

شماره تست	سرعت (m/s)	مقاومت کل (N)	فرورفتگی (mm)	تریب دینامیکی (deg.)
۱	۰/۵	۱/۲	۰/۲۴	۰/۱
۲	۰/۸	۱/۹	۰/۳	۰/۱۳
۳	۱/۱	۳/۴	۰/۳۲	۰/۱۵
۴	۱/۵	۱۴/۵	۰/۳۵	۰/۱۸

در شکل ۱۱، فرورفتگی مدل در آب آرام و امواج با هم مقایسه شده است.



شکل ۱۱: مقایسه فرورفتگی مدل در آب آرام و امواج

همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، فرورفتگی مدل در امواج نسبت به آب آرام به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. یکی از عواملی که بر روی فرورفتگی مدل تأثیر می‌گذارد، توزیع فشار در اطراف مدل است. بررسی دقیق این موضوع نیاز به تست‌های مدل بیشتر یا مدل‌سازی عددی دارد تا بتوان با تحلیل توزیع فشار و سرعت اطراف مدل، نقش امواج در کاهش فرورفتگی مدل را توجیه کرد.

#### ۴-۳- محاسبه مقاومت افزوده

پس از محاسبه مقاومت در آب آرام و امواج، درصد مقاومت افزوده در امواج برای شناور لنج را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$R_{aw} = \frac{R_{tw} - R_c}{R_c} \times 100 \quad (۲)$$



مقاومت در امواج خلیج فارس (kN)	مقاومت در آب آرام (kN)	سرعت لنج واقعی (Knot)
۷/۲۱۳	۱/۵۸۲	۴/۵۵
۱۳/۹۳۵	۵/۹۰۵	۷/۲۹
۲۹/۹۰۷	۲۱/۸۳۵	۱۰
۱۴۷/۴۰۵	۱۵۸/۵۱۵	۱۳/۶۷

## ۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، مقاومت افزوده و حرکات مدل یک شناور لنج به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری‌ها در آزمایشگاه دریایی شهدای خلیج فارس انجام شده است. موج مدنظر در این تحقیق، موج مشابه موج غالب در محدوده خلیج فارس و دریای عمان بوده است. در ابتدا مقاومت در آب آرام اندازه‌گیری شد و سپس با ایجاد موج روبرو در حوضچه کشش، مقاومت مدل در امواج نیز ثبت شد. با مقایسه مقاومت در آب آرام و امواج، نتایج زیر قابل بیان است:

- در آب آرام و در امواج، با افزایش سرعت، مقدار تریب دینامیکی مدل به سمت پاشنه نیز افزایش می‌یابد.

- در آب آرام، با افزایش سرعت، فرورفتگی مدل (افزایش آب‌خور) نیز افزایش می‌یابد؛ اما در امواج، تغییرات فرورفتگی مدل بسیار جزئی است. همچنین، فرورفتگی مدل در آب آرام نسبت به امواج بسیار بیشتر است.

- مقاومت مدل در سرعت‌های مختلف در آب آرام به صورت توانی با سرعت افزایش می‌یابد؛ اما در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه، با توجه به افزایش عدد فرود و تغییر محدوده سرعت مدل از حالت جابجایی به نیمه جابجایی، مقاومت شدیداً افزایش می‌یابد.

- مقاومت مدل در امواج با توجه به برخورد موج سینوسی از روبرو، دارای شکل سینوسی است. اگرچه به دلیل ماهیت اندازه‌گیری‌های تجربی، نوساناتی نیز دارد.

- درصد مقاومت افزوده مدل لنج در سرعت‌های پایین، بسیار بالا است؛ اما با افزایش سرعت، مقاومت افزوده کاهش می‌یابد و حتی منفی می‌شود. دلیل این موضوع، کاهش فرورفتگی مدل در امواج و در نتیجه کاهش سطح خیس شده و نیز کاهش مقاومت کل است. این موضوع حتی می‌تواند سبب کاهش مقاومت در امواج نسبت به آب آرام شود.

کل ( $R_T$ ) به دو مؤلفه مقاومت اصطکاکی ( $R_F$ ) و مقاومت باقیمانده ( $R_R$ ) تقسیم می‌شود:

$$R_T = R_F + R_R \quad (3)$$

ضرایب نیروی مقاومت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$c_i = \frac{R_i}{0.5\rho V^2 S} \quad (4)$$

در این روش، فرض می‌شود ضریب مقاومت باقیمانده برای مدل و کشتی واقعی برابر است. مقاومت افزوده موج نیز یکی از مؤلفه‌های مقاومت باقیمانده کشتی محسوب می‌شود. ضریب مقاومت اصطکاکی را می‌توان از فرمول ITTC-57 محاسبه کرد:

$$c_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (5)$$

پس از انجام تست مدل، مقدار مقاومت کل مدل به دست می‌آید و ضریب مقاومت کل مدل ( $c_{Ts}$ ) را نیز می‌توان از رابطه (۴) محاسبه کرد. سپس، مقدار ضریب مقاومت باقیمانده ( $c_R$ ) بدین صورت به دست می‌آید:

$$c_R = c_{Tm} - c_{Fm} \quad (6)$$

در مرحله بعد، ضریب مقاومت کل کشتی از رابطه زیر به دست می‌آید:

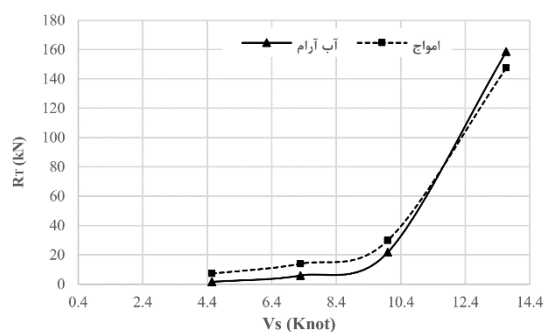
$$c_{Ts} = c_R + c_{Fs} + c_A \quad (7)$$

در این رابطه، ( $c_A$ ) ضریب تصحیح مربوط به زبری بدنه است که مقدار آن را می‌توان از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$c_A = 0.35 \times 10^{-3} - 2L_{pp} \times 10^{-6} \quad (8)$$

برای لنج واقعی با طول تقریبی ۲۱ متر،  $c_A$  در حدود ۰/۰۰۰۳۱ به دست می‌آید.

با استفاده از روش فوق، مقدار مقاومت در آب آرام و در امواج برای لنج واقعی محاسبه شده و در شکل ۱۳ و جدول ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: مقاومت کل لنج واقعی در آب آرام و امواج

جدول ۶: نتایج مقاومت لنج واقعی در آب آرام و امواج

1. Arribas, F.P., *Some methods to obtain the added resistance of a ship advancing in waves*. Ocean Engineering, 2007. **34**(7): p. 946-955.
2. Shao, Y.-L. and O.M. Faltinsen, *Linear seakeeping and added resistance analysis by means of body-fixed coordinate system*. Journal of marine science and technology, 2012. **17**(4): p. 493-510.
3. Duan, W. and C. Li, *Estimation of added resistance for large blunt ship in waves*. Journal of Marine Science and Application, 2013. **12**(1): p. 1-12.
4. Lee, J.-H. and Y. Kim, *Study on added resistance of a ship under parametric roll motion*. Ocean Engineering, 2017. **144**: p. 1-13.
5. Yu, J.-W., et al., *Effect of ship motions on added resistance in regular head waves of KVLCC2*. Ocean Engineering, 2017. **146**: p. 375-387.
6. Seo, S., S. Park, and B. Koo, *Effect of wave periods on added resistance and motions of a ship in head sea simulations*. Ocean Engineering, 2017. **137**: p. 309-327.
7. Park, D.-M., et al., *Experimental and numerical studies on added resistance of ship in oblique sea conditions*. Ocean Engineering, 2019. **186**: p. 106070.
8. Liu, S. and A. Papanikolaou, *Regression analysis of experimental data for added resistance in waves of arbitrary heading and development of a semi-empirical formula*. Ocean Engineering, 2020. **206**: p. 107357.
9. Gong, J., et al., *Added resistance and seakeeping performance of trimarans in oblique waves*. Ocean engineering, 2020. **216**: p. 107721.
10. Lloyd, A., *Seakeeping: ship behaviour in rough weather*. Admiralty Research Establishment, Haslar, Gosport, Publisher Ellis Horwood Ltd, John Wiley & Sons, ISBN: 0 7458 0230 3, 1989.
11. YJ, K., *A Note on the Strip Methods associated with Ship Motion Problems*. Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, 1971. **8**(1): p. 17-28.
12. Faltinsen, O.M., *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. 2005: Cambridge university press.
13. Kamranzad, B., *Persian Gulf zone classification based on the wind and wave climate variability*. Ocean Engineering, 2018. **169**: p. 604-635.
14. Birk, L., *Fundamentals of ship hydrodynamics: Fluid mechanics, ship resistance and propulsion*. 2019: John Wiley & Sons.