آنالیز دینامیکی یک قفس آبزی‌پروری دریایی تک مهاره

جواد خدابنده لوفر[۱]، عطاءاله قره‌چائی[۲*]

[۱] فارغ‌التحصیل رشته مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، khodabandelofarjavad@gmail.com
[۲] عضو هیات علمی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، a.gharechae@cmu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶

کلمات کلیدی:
آبزی‌پروری دریایی
قفس تک مهاره
قفس کشتی مانند
شتاب عمودی
نرم‌افزار ارکافلکس

چکیده

با توجه به افزایش آبزی‌پروری دریایی، طراحی سازه‌هایی ایمن و کارآمد برای این منظور حائز اهمیت است. سکو مثلثی[۱]در سکوهای شناور پرورش ماهی کشتی مانند[۲] با قرارگرفتن در نقطه برخورد موج با قفس، سبب شکست موج و کاهش انرژی آن، در نتیجه کاهش شتاب‌های عمودی و کاهش نیروی کشش خطوط مهار شده و محیط ایمن‌تری نسبت به قفس‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا ایجاد می‌کند. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ارکافلکس[۳]دینامیک یک نمونه از این قفس‌ها با سیستم تک مهاره در شرایط آب‌های دریایی نزدیک به بندر چابهار مطالعه شده است. مدل عددی ابتدا با نتایج تجربی صحت سنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد، شتاب‌های قائم سکوی اصلی به طور قابل‌توجهی کمتر از سکوی مثلثی واقع در جلوی قفس است. افزایش تعداد سکوهای مربعی شناور، شتاب عمودی سکوها را کاهش می‌دهد. بیشینه شتاب قائم وارده به سکو برای امواج محلی چابهار در صورت استفاده از یک سکوی مربعی $0.9\ m/s^2$ و در صورت استفاده از دوسکوی مربعی $0.35\ m/s^2$ است. همچنین مقدار ریشه میانگین مربعات (RMS) شتاب قائم قفس‌ها به ترتیب 0.21 و $0.13\ m/s^2$ است. مقدار کم شتاب‌های قائم، محیطی آرام را برای فعالیت بر روی قفس فراهم می‌کند و استرس و حرکات هیجانی آبزیان درون قفس را به حداقل می‌رساند که در بازدهی اقتصادی قفس حائز اهمیت است. با توجه به تمرکز پژوهش بر روی شرایط دریایی بندر چابهار، این قفس‌ها برای نصب در آب‌های ساحلی جنوب ایران توصیه می‌شود.

Dynamic Analysis of a Single Point Mooring Marine Aquaculture Cage

Javad Khodabandeloufar[1], Ataollah Gharechae[2*]

[1] Graduated Student in Marine Engineering, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran; khodabandelofarjavad@gmail.com [2]
[2] Faculty Member of Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran; a.gharechae@cmu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 10 Oct 2024
Accepted: 25 Dec 2024
Available online: 26 Dec 2024

Keywords:
Marine Aquaculture
Single Point Mooring Cage
Vessel-Shaped Cage
Vertical Acceleration
Orcaflex Software

ABSTRACT

Given the increase in marine aquaculture, designing safe and efficient structures for this purpose is important. The triangular frame in vessel-shaped floating fish farming platforms, by being located at the point of wave impact with the cage, causes wave breaking and reduces its energy, thereby reducing vertical accelerations and reducing the tension force of the mooring lines and creating a safer environment than high-density polyethylene cages. In this research, the dynamic of a sample of these cages with a single mooring system has been studied in marine water conditions near Chabahar Port using the Orcaflex software. The numerical model has first been validated with experimental results. The results show that the vertical accelerations of the main platform are significantly lower than the triangular platform located in front of the cage. Increasing the number of floating square platforms reduces the vertical

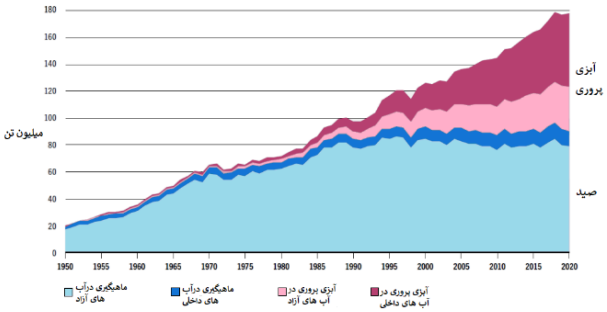
[1] Triangular frame
[2] vessel-shaped floating aquaculture platform
[3] Orcaflex

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

acceleration of the platforms. The maximum vertical acceleration applied to the platform for local waves in Chabahar is 0.9 m/s^2 when using a square platform and 0.35 m/s^2 when using two square platforms. Also, the Root Mean Square (RMS) values of the vertical acceleration of the cages are 0.21 and 0.13 m/s^2, respectively. The low value of vertical accelerations provides a calm environment for activity in the cage and minimizes stress and emotional movements of aquatic animals inside the cage, which is important in the economic efficiency of the cage. Considering the focus of the research on the marine conditions of Chabahar Port, these cages are recommended for installation in the coastal waters of southern Iran.

۱ – مقدمه

اقیانوس‌ها با دارابودن طیف گسترده‌ای از آبزیان و ترکیبات زیستی فعال نقش حیاتی در تضمین امنیت غذایی و تغذیه انسان ایفا می‌کنند [۱, ۲]. با اجرای آبزی‌پروری دریایی مسئولانه در کنار کشاورزی سنتی، پتانسیل افزایش عرضه جهانی غذای سالم وجود دارد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در سال‌های اخیر نیاز انسان به غذاهای دریایی شیب تندی گرفته است و این نیاز باید با تولید مناسب و با کیفیت پاسخ داده شود[۱, ۲].



شکل ۱- روند تغییرات تامین انواع آبزیان در ۷۰ سال اخیر[۳].

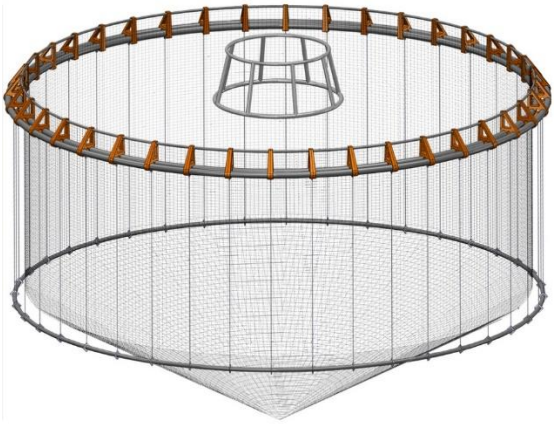
۲- انواع قفس‌های آبزی‌پروری

انواع مختلفی از قفس‌های پرورش ماهی وجود دارد که هر کدام دارای ویژگی‌های متمایزی هستند. قفس‌های سطحی، زیرسطحی و چرخشی نمونه‌هایی از این قفس‌ها هستند [۴] (شکل۲).

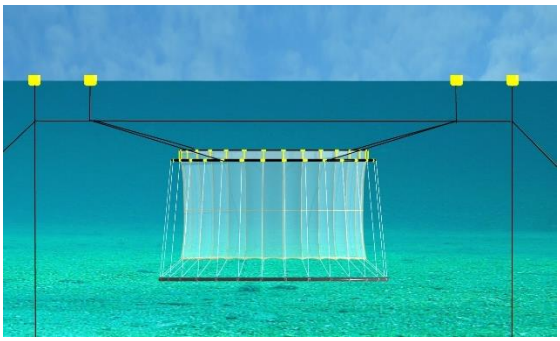
۲-۱- قفس‌های فولادی

قفس پرورش ماهی فولادی(SFFC) یک سازه تخصصی است که به طور خاص با هدف پرورش آبزیان مهندسی شده است. این قفس‌ها معمولاً با قاب‌های فولادی محکم، سیستم‌های توری پیچیده و مخازن بالاست برای تسهیل کشت موفق ماهی‌ها و سخت پوستان طراحی شده‌اند [۵, ۶]. در برخی از طرح‌های نوآورانه، سکوهای کاری کاربردی برای افزایش کارایی عملیاتی به این قفس‌ها اضافه شده‌اند[۷]. تجزیه‌وتحلیل دینامیکی خطوط مهار در قفس‌های پرورش ماهی تک مهاره برای اطمینان از یکپارچگی و کارایی عملیاتی بسیار مهم است؛ این تجزیه‌وتحلیل برای بهینه‌سازی عملکرد قفس‌های تک‌مهاره پرورش ماهی در شرایط محیطی متفاوت ضروری است.

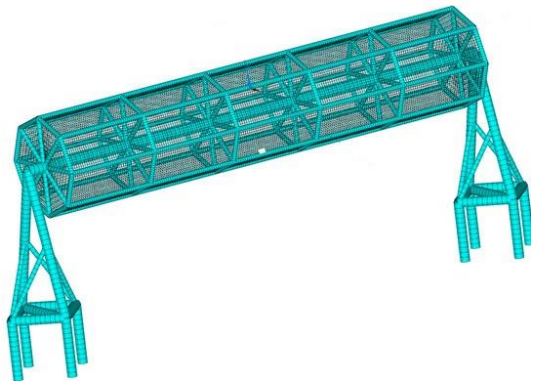
(الف، [۸])



(ب، [۹])



(ج، [۱۰])



شکل ۲-انواع قفس های پرورش ماهی

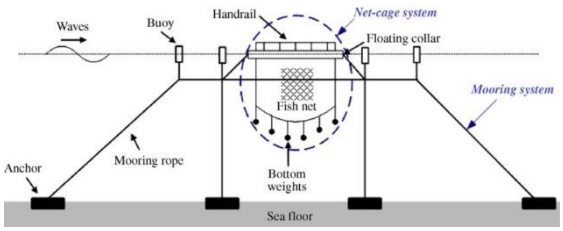
الف: قفس سطحی، ب: قفس زیر سطحی، ج: قفس چرخشی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

۲-۲- تجهیزات مهار قفس

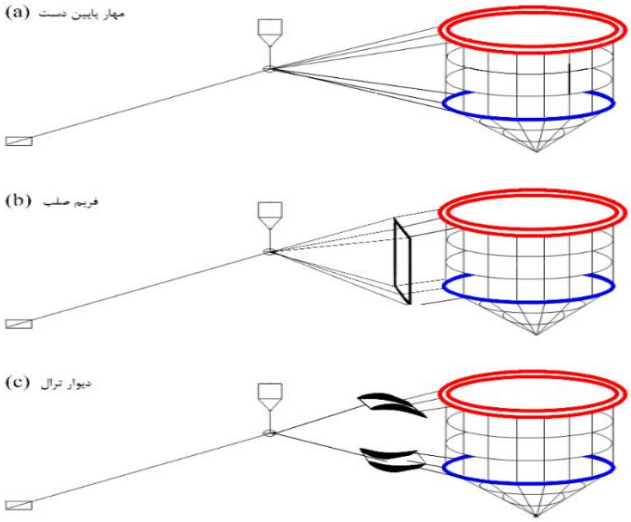
قفس‌های پرورش ماهی به کمک شناورساز لوله‌ای مانند، بویه‌های شناور، یا حلقه‌های محیطی بیرونی در برابر نیروهای وارده در دریا مستحکم می‌شوند[۱۱]. همچنین، این قفس‌ها ممکن است دارای طناب‌های مهار و تکیه‌گاه‌هایی برای افزایش پایداری باشند که نصب ساده و جابجایی به مکان‌های امن‌تر در شرایط نامطلوب مانند طوفان را تسهیل می‌کند[۱۲] (شکل۳).



شکل۳- سیستم مهار قفس و تجهیزات آن [۱۵]

۲-۳- سیستم تک مهاره (SPM)

سیستم قفس ماهی تک مهاره به واسطه کاهش هزینه‌های تولید و کاهش استفاده از مواد آلی، در مقایسه با سیستم‌های پهلوگیری چندنقطه‌ای برتری قابل‌توجهی دارد. در شکل ۴ روش‌هایی برای کاهش تغییر شکل سازه قفس پیشنهاد شده است، این کاهش تغییر شکل می‌تواند باعث ذخیره حجم کشت در جریان‌های بیش از ۰٫۵ متر بر ثانیه شود[۱۳].



شکل۴- انواع اقدامات جهت افزایش استحکام در سیستم قفس تک مهاره [۷].

شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که گنجاندن بویه‌ها در سیستم قفس می‌تواند تغییر شکل و تنش حلقه شناور را کاهش دهد و در نتیجه پایداری سیستم را در شرایط سخت بهبود بخشد[۱۳]. علاوه بر این، در نظر گرفتن زنجیرهای متصل شده به کف دریا برای خطوط مهار در سیستم‌های قفس توری برای پیش‌بینی مقدار بارگذاری و ظرفیت نگهداری لنگر ضروری است[۱۴]. در نتیجه، قفس ماهی تک مهاره با ویژگی‌های طراحی مناسب و روش‌های کاهش تغییر شکل، راه‌حلی پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای فعالیت‌های آبزی پروری است.

۳-تاریخچه مطالعات انجام شده بر روی قفس‌های تک مهاره

دینامیک قفس ماهی نوع اسپار در امواج و جریان به‌صورت عددی با استفاده از داده‌های پس‌پردازش شده برای امواج و جریان‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی به‌عنوان ورودی به مدل عددی، توسط فردریکسون و همکاران (۲۰۰۵) بررسی شد[۱۵].

چن و همکاران (۲۰۱۱) یک تحلیل عددی از رفتار هیدرودینامیکی قفس پرورش ماهی با سیستم مهار شبکه‌ای تحت‌تأثیر امواج را انجام دادند[۱۶]. بر اساس تئوری سینماتیک اجسام صلب و روش جرم توده‌ای یک مدل ریاضی از قفس با سیستم مهار تحت تاثیر امواج توسعه داده شد. برای صحت سنجی مدل عددی یک سری آزمایش-های تجربی انجام گردید. نیروهای وارده به طوقه شناورساز و خطوط مهار در شرایط امواج مختلف محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نیروهای وارده به خطوط موازی با موج بیشتر از سایر قسمت‌های سیستم مهار است. دامنه حرکات طوقه شناورساز با افزایش دامنه امواج افزایش می‌یابد ولی با پریود امواج رابطه محسوسی ندارد. دامنه حرکات قائم هر دو قفس یکسان، ولی دامنه حرکات افقی قفسی که در پشت قفس اول قرار گرفته است کمتر است.

شفیع‌زاده و قره چاهی (۲۰۱۵) به مطالعه خستگی خطوط مهار یک مبدل انرژی امواج موسوم به اژدهای امواج پرداختند. اندازه این مبدل‌های انرژی در اندازه کشتی‌های اقیانوس‌پیما است و برای دوره طولانی در معرض امواج سهمگین دریا قرار می‌گیرند. در این پژوهش سیستم تک مهاره و سیستم با آرایش دو مهاره ازنقطه‌نظر خستگی با هم مقایسه شدند. فرض گردید سازه فوق قرار است در سواحل چابهار و در دهانه اقیانوس هند نصب گردد. ابعاد و اندازه خطوط مهار بر اساس قواعد مؤسسات رده‌بندی مطابق آنچه برای کشتی‌ها انجام شود طراحی گردید. سپس در نرم‌افزار انسیس اکوا خستگی خطوط مهار در امواج نامنظم منطقه برای دوره ۳۰ساله مطالعه شد. مشاهده گردید به فرض اینکه طول خطوط مهار و وزن کل برای هر دو آرایش یکسان باشد، تنش حداکثر در سیستم تک مهاره بیشتر از دو مهاره است، لیکن عمر خستگی آن بیشتر از سیستم دو مهاره است[۱۷].

تحلیل مدل عددی حرکات یک قفس نیمه مغروق در امواج و جریان توسط کیم و هاوانگ (۲۰۱۱) و کیم (۲۰۱۱) انجام شد. بدنه استوانه-ای قفس و اجزاء مربوطه شامل تور، شناورسازها و مخازن و مغروق کننده هر کدام به ۱۲ زیرمجموعه مستقل تقسیم شدند. مدل‌سازی برای حالت نیمه شناور و حالت مغروق انجام و از معادله موریسون برای محاسبه نیروها استفاده شد. محاسبات برای حالت‌های امواج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

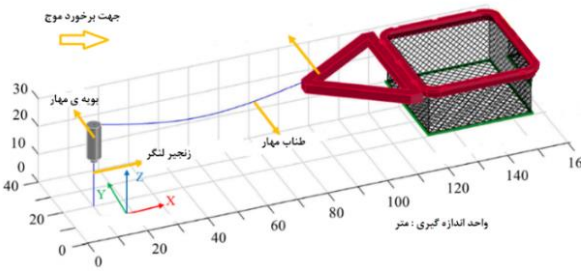
منظم و غیرمنظم انجام و حرکات دینامیکی هیو، سرج و پیچ محاسبه و نتایج در حوزه زمان و فرکانس تحلیل شد[۱۸, ۱۹].

شفیع‌زاده و رضوی به چگونگی توسعه یک برنامه به‌منظور بهینه‌سازی الگوی مهاربندی سازه‌های شناور، با استفاده از الگوریتم ژنتیک ساده یا نامقید پرداختند. در این مقاله، از تحلیل دینامیکی جهت تعیین پاسخ‌های سازه در روند بهینه‌سازی الگوی مهاربندی استفاده شده است[۲۰]. زمانی مفرد و کاظمی پاسخ یک سازه تک مهاره را در نرم‌افزار انسیس اکوا بررسی کردند. نیروهای وارده بر سازه به کمک تئوری تفرق و به روش المان مرزی و نیروی خطوط مهار آن با استفاده از معادلات موریسون محاسبه شده است [۲۱]. قره‌چائی و کتابداری نیروی تفرق و ضرائب جرم افزوده و میرایی یک قفس کروی که در حالت غوطه‌وری در معرض امواج دریا قرار گرفته بود را محاسبه کردند. برای این منظور، با استفاده از قانون دارسی، تور قفس به صورت محیط متخلخل مدل‌سازی شد و خارج از محیط متخلل جریان پتانسیل در نظر گرفته شد [۲۲].

گرچه امروزه قفس‌های آبزی‌پروی با طوقه‌های پلی‌اتیلنی نیمه‌شناور به طور گسترده در صنعت آبزی‌پروی دریایی استفاده می‌شود و محققین جنبه‌های مختلف دینامیک این قفس‌ها را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۳-۲۵]. اما یک سکو شناور آبزی‌پروری کشتی مانند مزایای زیادی نسبت به قفس‌های گرانشی پلی‌اتیلن با چگالی بالا دارد. در ترکیب با یک سیستم پهلوگیری تک نقطه‌ای، شکل ساختاری منحصربه‌فرد کشتی، می‌تواند بارهای محیطی منتقل شده از دریا را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ارکافلکس دینامیک یک نمونه از این قفس‌ها با سیستم تک مهاره در شرایط آب‌های دریایی نزدیک به بندر چابهار مطالعه می‌شود. نیروی مهار و شتاب قائم روی سکوی شناور در امواج مطالعه می‌شود.

۴-شرح مسئله

در شکل۵ یک قفس دریایی کشتی مانند که توسط یک بویه مهار شده، نشان‌داده‌شده است. سایر مشخصات قفس در جدول ۱ ذکر شده است.



شکل ۵- قفس کشتی مانند تک مهاره [۲۶].

جدول۱- اطلاعات مدل شبیه‌سازی شده.

بخش	پارامتر	مقدار
سکو مثلثی	طول	۳۰/۰۰ متر
	عرض	۴۰/۰۰ متر
	عمق	۳/۰۰ متر
	ضخامت	۰/۰۴۷۵متر
	جنس	فولاد
سکو مکعبی	طول	۴۰/۰۰ متر
	عرض	۴۰/۰۰ متر
	عمق	۳/۰۰ متر
	ضخامت	۰/۰۴۷۵متر
	جنس	فولاد
طناب مهار	قطر	۰/۱۵ متر
	طول	۶۰/۰۰ متر
	جنس	پلی‌پروپیلن
زنجیر لنگر	قطر	۰/ ۰۲ متر
	طول	۲۷/۰۰ متر
	جنس	فولاد

هر قفس آبزی‌پروری متشکل از شناورساز، تور و سیستم مهار است. بنابراین، سوالی که ممکن است در اینجا مطرح شود این است که کدام قسمت از اجزاء قفس بیشتر تحت تأثیر امواج و جریان‌ها قرار می‌گیرد و برای ساده‌سازی مساله از تاثیر کدام یک از اجزاء می‌توان صرف‌نظر کرد. تجزیه و تحلیل‌های عددی و تجربی توسط محققان بر روی سیستم‌های مختلف قفس نشان می‌دهد هنگامی که قفس تحت تاثیر امواج برخوردی قرار دارد تاثیر تور بر روی حرکات قفس در راستای قائم و پیچ در مقایسه با بخش شناورساز کوچک است[۲۷-۳۰]. این بدان معنا است که عمده نیروهای قائم وارده به قفس ناشی از وجود بخش شناورساز است و تور نقش کم‌تری در این زمینه دارد. با این وجود، سهم تور در تغییر شکل‌ها و یا جابجایی قفس در امتداد انتشار امواج، همچنین نیروهای وارده به قفس توسط جریانات افقی دریایی قابل توجه است. با توجه به نتایج پژوهش‌های فوق در این پژوهش نیز برای ساده سازی از وجود و تاثیر تور صرفنظر شده است و تنها بخش شناورساز و خطوط مهار مدلسازی شده‌اند.

۵- معرفی نرم‌افزار ارکافلکس

ارکافلکس نرم‌افزاری است که به طور گسترده در مهندسی دریا برای مدل‌سازی دینامیک طیف گسترده‌ای از سیستم‌ها مانند جزایر خورشیدی شناور، توربین‌های بادی دریایی[۳۱]، سیستم‌های تولید آب‌های عمیق و مانند آن استفاده می‌شود. از طریق ارکافلکس، شبیه‌سازی فعل و انفعالات پیچیده بین اجزای مختلف مانند شناورها، خطوط پهلوگیری، و کابل‌های الکتریکی امکان‌پذیر می‌شود و در نتیجه بینش ارزشمندی در مورد رفتار و کارایی عملیاتی سازه‌های دریایی به طراحان و مهندسین می‌دهد. همچنین در این نرم‌افزار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

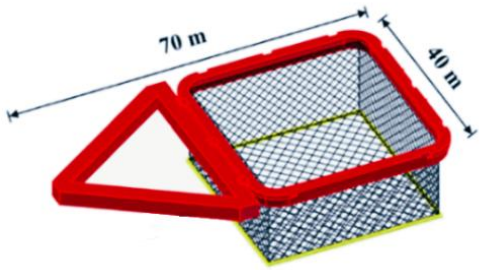
امکان ارزیابی خستگی و بارهای شدیدی که در سناریوهای باد دریایی سازه با آن مواجه می‌شوند وجود دارد. با بهره‌گیری از قابلیت‌های این نرم‌افزار، ذینفعان صنعت دریایی می‌توانند با ارزیابی جامع سیستم‌های پیچیده، به اصلاح استراتژی‌های طراحی و شیوه‌های عملیاتی برای عملکرد بهینه و قابلیت اطمینان در محیط‌های چالش‌برانگیز دریایی بهره‌مند شوند[۳۲]. در این پژوهش از نسخه ۹,۸b این نرم‌افزار استفاده شده است. همچنین از نرم‌افزار Solidworks برای مدل‌سازی هندسه شناور و بررسی آبخور و مرکز جرم و بویانسی استفاده شده است.

۶- فرایند شبیه‌سازی مسئله

در این بخش نحوه مدل‌سازی مسئله در نرم‌افزار شرح داده شده است. ابزار های موجود در نرم افزار فرایند شبیه سازی را بسیار سرعت میبخشد و همچنین تنظیمات جامع در هر بخش اجازه استفاده از خلاقیت را به کاربر می‌دهد.

۶-۱- شیءها

در نرم‌افزار ارکافلکس برای مدل‌سازی اجزاء مختلف اصطلاحاً دو شی مختلف موسوم به Line و Bouy در دسترس است. هر کدام از این شیءها معادلات حاکم خاص خود را دارد که در ادامه بیان خواهند شد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی سکو شناورساز شیء Line استفاده شده است که در نقاط متعددی با شی ۶D Bouy به هم متصل شده‌اند. برای بویه مهار باتوجه‌به اطلاعات مسئله و پیشنهاد نرم‌افزار از Towed fish bouy استفاده شده است که در مقایسه با مدل‌های بویه دیگر، برای شتاب‌ها و نیروی خطوط مهار نتایج مطلوب‌تری می‌دهد. در شکل ۶ ابعاد قفس شبیه‌سازی شده نشان‌داده‌شده است.



شکل۶- فریم شبیه‌سازی شده

افزایش تعداد سکوهای مکعبی و در نتیجه افزایش حجم کشت در این سکو اهمیت بسیاری دارد. در این پژوهش به بررسی افزایش سکوها و تأثیر هیدرودینامیکی آنها بر روی قفس نیز پرداخته شده است.

۶-۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

جریان سیال غیر قابل تراکم، غیرلزج و غیر چرخشی در نظر گرفته می‌شود. سرعت سیال از رابطه $\nabla\Phi$ به دست می‌آید که در آن Φ پتانسیل سرعت است.

$$\nabla^2\phi(X,t) = 0 \qquad (۱)$$

با جایگزینی رابطه (۱) در معادله ناویر-استوکس و ادغام آن، معادله برنولی برای محاسبه فشار به دست می‌آید.

$$P(X,t) = -\rho\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2 + gZ\right) \qquad (۲)$$

که در آن $P(X,t)$ فشار در مختصات X در زمان t، g شتاب گرانشی برحسب m/s^2 و Z نیز ارتفاع مورد نظر است.

۶-۳- شرایط مرزی

در بستر دریا، شرط عدم عبور سیال از مرز جامد به‌صورت ذیل بیان می‌شود:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial Z} = 0 \qquad (۳)$$

بر روی سطح یک جسم صلب متحرک با سرعت U و سرعت زاویه‌ای Ω رابطه (۴) برقرار است.

$$n.\nabla\Phi = \mathrm{n}.(U + \Omega \times X) \qquad (۴)$$

که در آن n بردار یکه است که روی سطح خیس بدنه در تمام موقعیت‌های آن اعمال می‌شود. همچنین، شرایط مرزی سینماتیکی سطح آزاد به‌صورت ذیل بیان می‌شود:

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} + g\frac{\partial\Phi}{\partial Z} + 2\nabla\Phi.\nabla\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\nabla\Phi.\nabla(\nabla\Phi)^2 = 0 \qquad (۵)$$

۶-۴- تئوری موج

برای شبیه‌سازی امواج در نرم‌افزار ارکافلکس سه نوع موج وجود دارد: امواج خطی منظم، امواج خطی نامنظم و امواج دامنه زمانی.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی امواج نامنظم از طیف امواج جوانسواپ استفاده شده که تابع آن با معادله زیر بیان می‌شود:

$$s(f) = \frac{\alpha g^2}{16\pi^4} f^{-5} \exp\left\{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right\}\gamma^b \qquad (۶)$$

که در آن،

$$b = \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}\left(\frac{f}{f_m} - 1\right)^2\right\}$$
$$\sigma = \begin{cases}\sigma_1 & f \le f_m \\ \sigma_2 & f > f_m\end{cases} \qquad (۷)$$

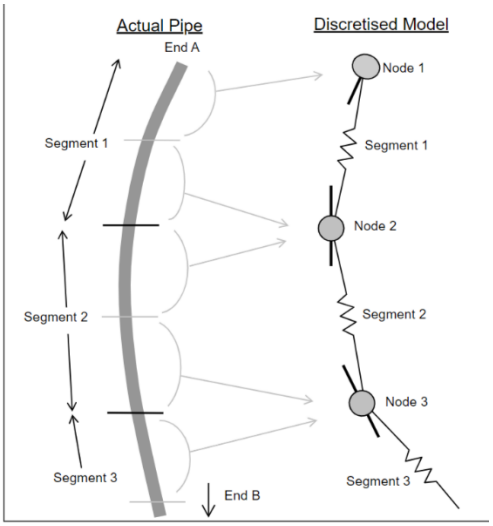
g شتاب گرانش، f_m فرکانس پیک و α پارامتر طیف انرژی است. σ_1 و σ_2 پارامترهای عرضی طیف موج هستند که به اندازه‌ی پهنای محدوده فرکانسی که امواج در آن توزیع می‌شوند، اشاره می‌کند. درصورت وجود اطلاعات کامل از موج مقادیر σ_1 و σ_2 قابل محاسبه هستند در غیر این صورت مقادیر استاندارد σ_1 برابر با ۰/۰۷و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

σ_2 برابر با ۰/۰۹ توصیه شده است. پارامتر γ فاکتور تقویت قله موج است که درصورت وجود اطلاعات کافی از داده‌های موج محلی به عنوان ورودی قابل تنظیم است در غیر این صورت نرم‌افزار ارکافلکس به صورت خودکار مقدار آن را از رابطه ایشروود محاسبه می‌کند. دراین پژوهش مقدار آن γ برابر با ۰/۹۰۰۱ در نظر گرفته شده است.

۶-۵- شیء خط (Line)

مطابق شکل ۷ برای شبیه‌سازی سکوی شناور از شیء *خط* استفاده شده است.



شکل ۷- تقسیم بندی طول فریم برای انجام محاسبات

خط به بخش‌های کوچک‌تر به نام بخش (segment) تقسیم می‌شود که توسط اتصالات بدون جرم به گره‌ها (Nodes) متصل می‌شوند. بخش‌ها فقط ویژگی‌های محوری و پیچشی را مدل می‌کنند. سایر خصوصیات (جرم، وزن، شناوری و غیره) همگی بر روی گره‌ها اعمال می‌شوند.

۶-۶ گره (Node)

هر گره در سیستم، نماینده دو انتهای یک میله کوتاه است. برخی از ویژگی‌های میله مانند وزن و نیروی شناوری بر روی گره‌ها منتقل می‌شود. همچنین، نیروهای خارجی مانند نیروهای وارده از طرف آب و مقاومت هیدرودینامیکی نیز در گره‌ها اعمال می‌شوند.

۶-۷ بخش (segment)

هر بخش مدل یک عضو بدون جرم مستقیم است که فقط ویژگی‌های محوری و پیچشی یک قطعه را نمایندگی می‌کند. بخش را می‌توان به‌صورت دو میله تلسکوپی هم محور که توسط فنر - دمپرهای محوری و پیچشی به هم وصل شده‌اند نیز در نظر گرفت. خواص خمشی خط توسط فنر - دمپرهای چرخشی در هر انتهای قطعه، بین بخش‌ها نشان داده می‌شود. بخش و گره لازم نیست تقارن محوری داشته باشد، زیرا مقادیر مختلف سختی خمشی را می‌توان برای دو صفحه متعامد خمش مشخص کرد. تعداد بخش‌ها در قسمت‌های مختلف قفس در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- تعداد بخش‌ها در قسمت‌های مختلف قفس

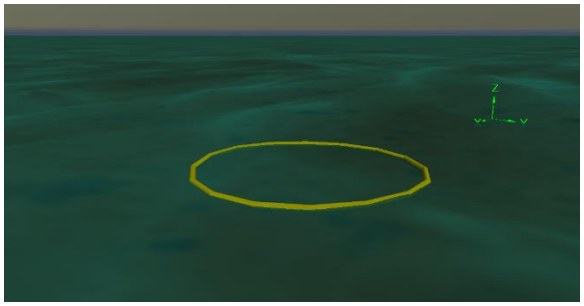
عضو	تعداد بخش (segment)
سکو مستطیلی و مثلثی	۴۶
طناب مهار	۶۰
زنجیر لنگر	۲۷

۶-۸- جامدات الاستیک

جامدات الاستیک یکی از بخش‌های مهم در نمایندگی اجزا سازه‌ای شبیه‌سازی شده در این نرم‌افزار است که توسط خطوط، شناورهای سه‌بعدی و شناورهای شش بعدی تعریف می‌شود. یک نیروی واکنشی باعث می‌شود که سازه نیروی مقاومت و نیروی اصطکاک ایجاد کند.

۷- صحت سنجی

در این بخش برای اطمینان از کارکرد درست نرم‌افزار و صحت تنظیمات داخلی، نتایج مدل‌سازی عددی صحت سنجی می‌شود. برای این منظور نتایج نرم‌افزار برای یک حلقه الاستیک نیمه مغروق (شکل ۸) که مشخصات آن در جدول ۳ ذکر شده است، با نتایج تست تجربی ذکر شده در مرجع [۳۳] مقایسه شده‌اند.



شکل ۸- مدل حلقه شبیه سازی شده

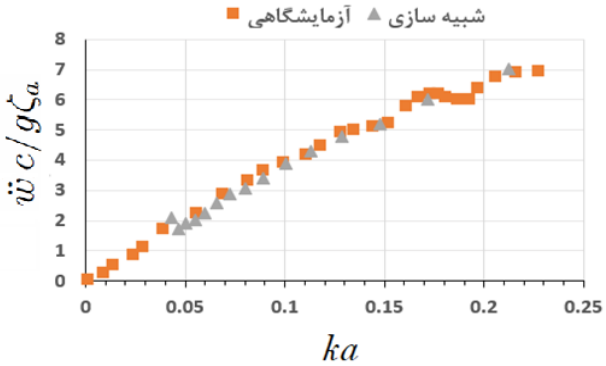
جدول ۳- مشخصات حلقه الاستیک نیمه مغروق

پارامتر	مقدار
قطر حلقه	۱/۵۰۰ متر
قطر مقطع حلقه	۰/۰۰۴ متر
جرم بر واحد طول	۰/۶۰۲ کیلوگرم بر متر
سختی خمشی	۰/۴۶۴ نیوتون- مترمربع

مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی برای تیزی موج $\frac{H}{\lambda}=\frac{1}{60}$ در شکل ۹ نشان داده شده اند. در این شکل محور افقی عدد بی بعد موج (ka) را نشان می‌دهد که در آن k عدد موج و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

a شعاع سطح مقطع حلقه است. و محور قائم بیانگر شتاب‌قائم است که به صورت $\ddot{w}c/g\zeta_a$ بی‌بعد شده است. که در آن c شعاع حلقه، g شتاب گرانش و ζ_a دامنه موج برخوردی است. موقعیت اندازه‌گیری شتاب در سمت برخورد موج به حلقه می‌باشد. نتایج نشان‌گر تطابق خوب مدل‌سازی عددی با نتایج تجربی است. بیشینه خطا کمتر از ۷٪ است؛ که با توجه به ساده‌سازی صورت گرفته در مدل عددی (فرض جریان پتانسیل) این مقدار خطا دور از انتظار نیست.



شکل ۹- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی

۸- نتایج

مشخصات امواج محلی چابهار که در مدل‌سازی مسئله استفاده شده است در جدول ۴ بیان شده است. این مشخصات از داده‌های بویه‌های نصب شده توسط سازمان بنادر و دریانوردی استخراج شده‌اند. در این جدول H_s ارتفاع موج مشخصه، T_p دامنه موج انتشاری، MWP میانگین قدرت موج، MWD میانگین جهت موج، W_S سرعت انتشار موج و W_D جهت انتشار موج است.

جدول ۴- مشخصات امواج سواحل چابهار(داده‌های بویه‌های سازمان بنادر و دریانوردی بندر چابهار).

	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سالانه
H_s	۰/۹۲۵	۱/۳۳۷	۰/۵۶۳	۰/۶۳۶	۰/۸۷۸
T_p	۸/۴۹۷	۹/۱۴۹	۷/۶۵۲	۶/۱۴۳	۷/۸۶۶
MWP (KW/m)	۴/۳۷۸	۶/۹۴۶	۱/۴۵۹	۱/۴۸۲	۴/۰۱۲
MWD	۱۸۳/۵	۱۷۰/۰	۱۸۲/۱	۱۹۷/۷	۱۸۳/۴۰
Ws (m/s)	۳/۵۴۳	۴/۰۷۹	۳/۲۵۱	۴/۱۶۶	۳/۷۸۵
WD	۲۰۲/۱	۱۵۹/۶۲	۱۹۲/۳	۲۰۰/۱۲	۱۸۸/۲

جهت برخورد امواج در شکل ۵ نشان داده شده است. برای دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت، شبیه‌سازی مسئله با دقت بالایی انجام شد. بدین منظور، بازه زمانی شبیه‌سازی ۲۰۰۰ ثانیه و طیف امواج جوانسواپ در نظر گرفته شد.

به‌منظور آدرس‌دهی، اجزاء مختلف سکو مطابق شکل ۱۰ نامگذاری شده‌اند. با توجه به این نامگذاری‌ها شتاب‌های قائم در قفس دارای یک فریم مربعی، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ در بازه زمانی ۲۰۰۰ ثانیه نشان داده شده‌اند. در این نمودارها، محور افقی زمان بر حسب ثانیه و محور قائم شتاب بر حسب m/s^2 است. با توجه به اینکه امواج دریا نامنظم است شتاب‌های وارده نیز ماهیتی نامنظم دارند که در طول زمان تغییر می‌کنند. اما باتوجه به دامنه پایین شتاب، نوسانات شدید آن تاثیری بر عملکرد سازه و فعالیت‌های انسانی نخواهد داشت.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد شتاب وارده بر قسمت شناورساز قفس، خیلی کمتر از شتاب جاذبه و در محدوده قابل‌قبول است جنس طناب مهار از پلی‌پروپیلن است که حداکثر نیروی گسیختگی آن به کمک رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

$$F_{MAX} = \sigma_y \times A \qquad (۸)$$

که در آن، σ_y تنش تسلیم و A مساحت سطح مقطع طناب است. با در نظر گرفتن قطر ۱۵ سانتی متر و تنش تسلیم ۳۵ مگاپاسکال برای طناب مهار مقدار نیروی کششی قابل تحمل حدود ۶۱۸ کیلو نیوتون است.

بیشترین نیروی مهار در طول شبیه‌سازی ۱۲۵ کیلو نیوتون به دست آمده است و این مقدار حدود ۲۰٪ حداکثر نیروی گسیختگی طناب است. بنابراین، نیروی کشش مهار با توجه به ابعاد سطح مقطع طناب مهار و نیروی قابل تحمل توسط آن نیز در محدوده قابل قبول است.

همان‌طور که نتایج شکل‌های ۱۲ و۱۳ نشان می‌دهد نوسانات شتاب‌های قائم در فریم مربعی نسبت به فریم مثلثی کمتر است. این موضوع را نیز باید مدنظر قرارداد که دامنه پایین شتاب‌ها در قسمت‌های مختلف هم از نظر دریازدگی و تاب‌آوری کارگران و هم از نظر ایمنی دارای اهمیت است.

همان‌طور که نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ نشان می‌دهد بیشترین شتاب وارده در قسمت برخورد موج با فریم مثلثی است. در تمامی بخش‌های دیگر شتاب‌ها تقریباً ثابت و یکنواخت است. این یکنواختی شتاب‌ها ازنقطه‌نظر عملکردی یک مزیت محسوب می‌شود. نکته دیگری که لازم است در اینجا به آن اشاره نمود استفاده از مفصل در محل اتصال فریم مربعی به مثلثی است که باعث کنترل انتقال گشتاور در این نقطه و به طور چشمگیری سبب کاهش شتاب وارده در مقایسه با حالتی که سیستم به طور یکپارچه ساخته شده است می‌شود. به‌طورکلی می‌توان گفت، اعمال مفصل در سازه‌ای مانند قفس فوق که تحت شرایط دینامیکی دریا قرار دارد باعث می‌شود سازه انعطاف‌پذیرتر شود و با تغییرات محیطی و نیروهای وارده خود را تطبیق دهد و کمترین ممان‌ها و در نتیجه تنش‌ها حرکات و شتاب‌ها به سازه وارد شود.

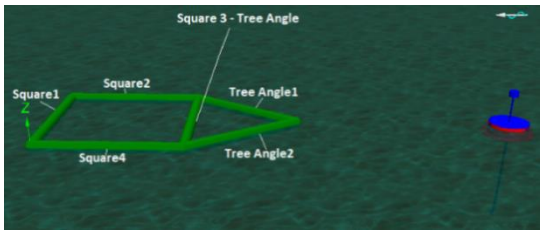
امواج واقعی دریا از نوع امواج نامنظم است که در جهات مختلف منتشر می‌شوند. ماهیت چنین امواجی سبب می‌شود که سازه شناور تک مهاره‌ای مانند قفس موردمطالعه در این پژوهش در یک محدوده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

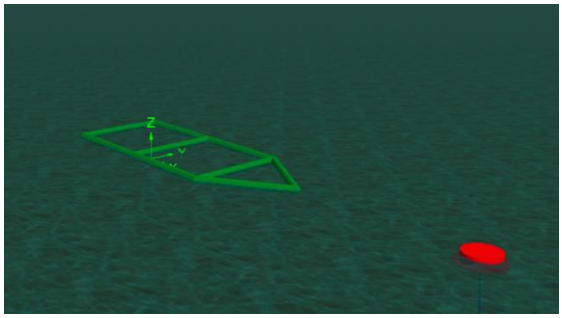
بیضی مانندی در دریا حرکت کند (همچنین پژوهش شفیع‌زاده و قره چائی (۲۰۱۵) [۱۷] نیز ملاحظه شود).

حرکات تدریجی قفس به همراه شتاب‌ها با دامنه کم هم از نظر زیست آبزیان و هم از نظر ایمنی شرایط محیطی برای کار بر روی قفس یک مزیت است؛ زیرا قفس با حرکات سریع و یا نیروهای ضربه‌ای که اثر مخربی دارند مواجه نمی‌شود.

این امواج سبب حرکت محدود فریم در این بازه زمانی طولانی می‌شود. این حرکات با شتاب بسیار محدود صورت می‌گیرند که در زمینه بررسی‌های محیطی و زیستی برای پرورش آبزیان حساس می‌تواند بسیار مفید واقع شود، زیرا حرکات سریع سکو در سطح آب سبب حرکات ضربه‌ای و سریع در تورهای زیر آب شود و استرس و هیجان بیش از اندازه و خطرناکی را به آبزی‌های موجود در قفس منتقل می‌کند. مقدار کشش مهار نیز با توجه به حداکثر نیروی پارگی بسیار کم به‌دست‌آمده است که خود می‌تواند بر روی انتخاب این سکو در منطقه خلیج چابهار تأثیرگذار باشد.

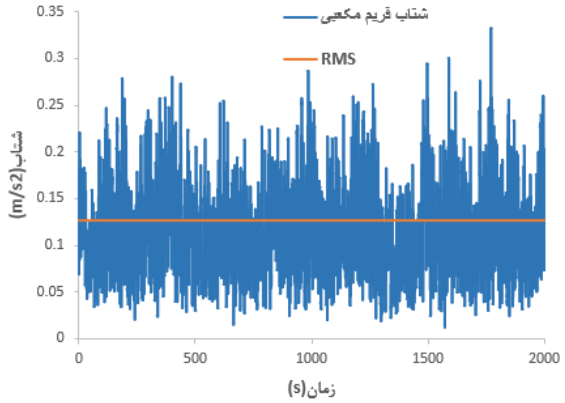


شکل۱۰- قفس دارای یک سکوی مربعی

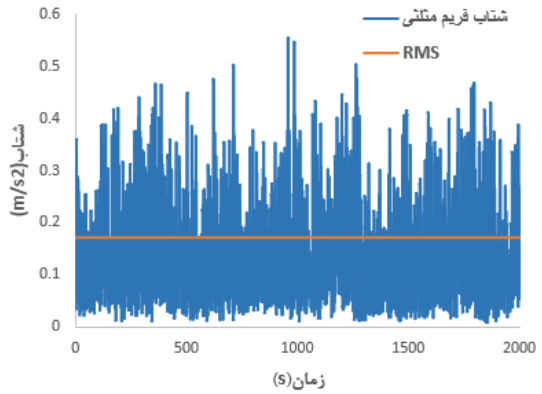


شکل۱۱- قفس دارای دو سکوی مربعی

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نتایج شتاب و نیروی مهار مربوط به قفس با ۲ فریم مربعی را نشان می‌دهد، همچنین مقدار ریشه میانگین مربعات (RMS) شتاب‌های قائم نیز در شکل نشان داده شده است. مقدار RMS شتاب سکوی مربعی $۰/۱۳ \frac{m}{s^2}$ و سکوی مثلثی $۰/۱۸ \frac{m}{s^2}$ است. همانطور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده است شتاب RMS سکوی مربعی کمتر از سکوی مثلثی است که دلیل آن می‌تواند وجود مفصل در اتصال فریم‌ها و حضور فریم مثلثی در نقطه برخورد موج باشد. در هر صورت، شتاب‌های کمتر شرایط کاری مناسبی را بر روی سکو فراهم می‌کند.

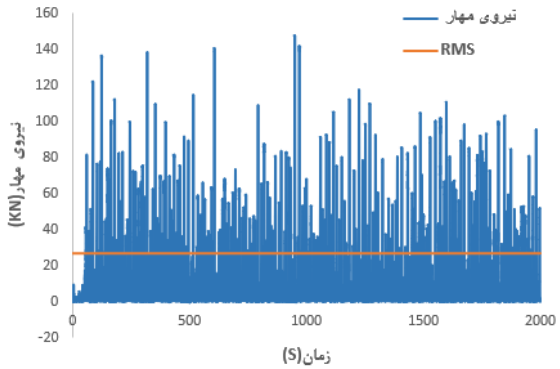


شکل ۱۲-شتاب میانگین قفس دارای ۲ سکوی مکعبی و مقدار RMS داده‌ها



شکل۱۳- شتاب سکوی مثلثی و مقدار RMS داده‌ها

مقایسه نتایج شکل ۱۲ با شکل ۱۳ نشان می‌دهد که شتاب در سکوی مربعی نسبت به سکوی مثلثی حدود ۲۹٪ کاهش یافته است. همچنین، نوسانات شتاب در سکوی مثلثی نسبت به سکوی مربعی بیشتر است. زمانی که یک کشتی یا قفس دریایی در معرض امواج شدید قرار می‌گیرد، نیروی ناشی از برخورد امواج به بدنه می‌تواند باعث تغییر سریع در شتاب آن شود. این تغییرات می‌تواند ناشی از گشتاورهای به وجود آمده از تعامل بین قفس و امواج باشند.

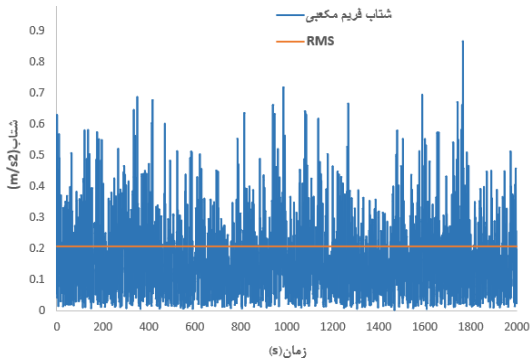


شکل۱۴- نیروی مهار قفس دارای ۲ سکوی مربعی و RMS داده‌ها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]

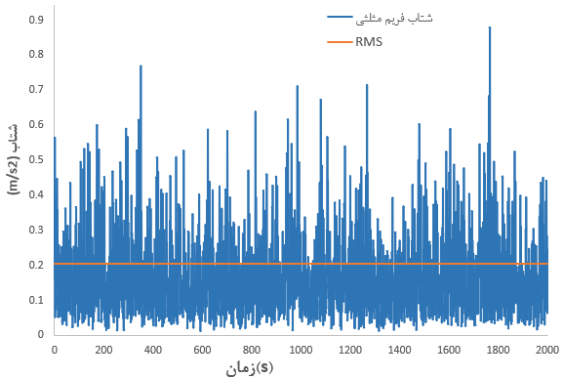
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

RM نیروی مهار در قفس دارای ۲ ســـکوی مربعی ۲۹ کیلونیوتون است. مقایسه RMS نیروی مهار قفس با ۲ فریم مربعی ۱۸٪ بیشتر از قفس تک سکو است (شکل۱۷). این موضوع یادآور این نکته است که افزایش تعداد ســکوهای مربعی گرچه باعث کاهش شــتاب های قائم می‌شــود اما نیروی مهار قفس را نیز افزایش می‌دهد، در نتیجه نیاز به تجهیزات و مهار بیشــتری اســت. شــکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نتایج مربوط به شــتاب و نیروی مهار قفس با یک ســکوی مربعی اســت. رفتار کلی شــتاب‌های ســکوی مثلثی و مربعی در قفس دارای یک سکوی مربعی مشابه قفس دارای دو سکوی مربعی است. در هر دو مدل شبیه سازی شده شتاب قائم سکوی مکعبی کمتر از سکوی مثلثی اســت. نکته قابل توجه تفاوت شــتاب قائم ســکوی مثلثی و مربعی اســت. در قفس دارای دو ســکوی مربعی شــتاب ســکوهای مربعی ۲۹٪ کمتر از ســکوی مثلثی اســت. و در قفس دارای یک سکوی مربعی این مقدار ۹٪ است.



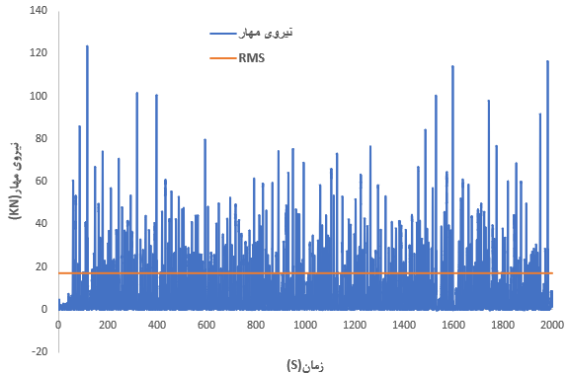
شکل۱۵-شتاب سکوی مکعبی و مقدار RMS داده‌ها

مقدار RMS شتاب‌ها حدود ۰/۲۱ متر بر مجذور ثانیه است که نشان دهنده یک وضعیت پایدار در طول زمان است. در برخی نقاط شتاب به طور ناگهانی افزایش میابد که علت آن می‌تواند رسیدن به نقطه ماکزیمم کشش در خطوط مهار باشد (برای مثال شکل ۱۷ ملاحظه شود).



شکل۱۶- شتاب سکوی مثلثی و مقدار RMS داده‌ها

اگر اجزاء قفس فوق به‌صورت یکپارچه به هم متصل بودند، یعنی به‌جای مفصل‌ها در محل تقاطع اعضاء از اتصالات صلب استفاده می‌شد مقدار شتاب‌ها بالاتر از مقادیر به‌دست‌آمده در این حالت می‌گردید. ایده مفصلی نمودن اتصالات را می‌توان از مزایای برجسته این قفس برشمرد که باعث می‌شود نیروها و شتاب‌های وارده به قفس کنترل گردد.



شکل۱۷- نیروی کشش مؤثر مهار و مقدار RMS داده‌ها

شکل ۱۷ نیروی کشش در خط مهار را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نوسانات نیروی کشش حالت پایدار دارد و تئوری ابتدایی در خصوص عدم نوسانات شدید و حرکات انتقالی محدود اثبات می‌شود. آبخور مناسب و عمق نسبتاً زیاد سکو باعث حرکات رفت و برگشتی در قله و قعرهای موج می‌شود و حرکات انتقالی قفس را تا حد بسیار زیادی کنترل می‌کند. این موضوع حتی در جریان‌های تا m/s ۰/۵ نیز قابل تعمیم است.

۸-جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق پاسخ دینامیکی یک قفس آبزی‌پروری کشتی مانند در طیف امواج محلی چابهار در نرم‌افزار ارکافلکس مدل‌سازی شد. مدل‌سازی هندسه در نرم‌افزار سالیدوورک انجام شد. تمامی قیود در حین شبیه‌سازی به سازه اعمال شد. بخش مربعی قفس از طریق اتصال مفصلی به بخش مثلثی که در قسمت جلویی قفس واقع شده است متصل گردید. شبیه‌سازی برای طیف امواج محلی بندر چابهار انجام شد. از مهم‌ترین نتایج این پژوهش موارد ذیل را می‌توان ذکر کرد:

- نتایج عددی عامل‌های دامنه پاسخ در حوزه زمان نشان می‌دهد که پاسخ‌های فریم شناور مثلثی در اکثر بازه‌های زمانی بیشتر از پاسخ‌های سکوی شناور مربعی تحت امواج با دامنه واحد است که به این معناست که سکوی مربعی به‌عنوان سکوی آبزی‌پروری مناسب‌تر است.
- نتایج RMS نیروی مهار در دو مدل مختلف تست شده نشان می‌دهد با افزایش تعداد سکوهای مربعی مقدار اندکی به نیروی مهار افزوده می‌شود. به‌عنوان‌مثال افزایش نیروی مهار در قفس

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

دارای ۲ سکوی مربعی نسبت به ۱ سکوی مربعی تنها ۱۸٪ است.

- نتایج مقایسه‌ای پاسخ‌های شتاب قائم بین سکوهای با پیکربندی‌های مختلف نشان می‌دهد که افزایش تعداد سکوهای شناور می‌تواند منجر به کاهش پاسخ‌های شتاب قائم و افزایش ثبات سکو شود. به‌عنوان‌مثال، شتاب در قفس دارای ۲ سکوی مربعی نسبت به قفس دارای ۱ سکوی مربعی ۲۰ ٪ کاهش می یابد .
- افزایش ناگهانی شتاب در زمان کشش بیشینه در خطوط مهار است. این افزایش شتاب می‌تواند به‌صورت لحظه‌ای، و مقدار آن ۱۶٪ بیشتر از حداکثر شتاب در زمان‌های دیگر باشد.

۹-پیشنهادات برای ادامه تحقیق

موارد ذیل برای ادامه تحقیق پیشنهاد می‌شود:

۱. بررسی خستگی خط مهار.
۲. محاسبه نیروها و شتاب‌ها در قسمت‌های مختلف قفس با درنظرگرفتن وجود تور.
۳. افزایش سکوهای مکعبی و ایجاد یک زنجیره از فریم‌ها و بررسی نیروهای دینامیکی وارد بر آن.
۴. مدل‌سازی مسئله با درنظرگرفتن اثر ویسکوزیته سیال

۱۰- مراجع

1- PAL, D. and RAJ, K.,(2021), Biological activities of marine products and nutritional importance, Bioactive Natural Products for Pharmaceutical Applications, p. 587-616, https://doi.org/10.1007/978-3-030-54027-2_17.

2- MURTI, P. D. B., DWILOKA, B., RADJASA, O. K. and NGGINAK, J.,(2021), Opportunity and Benefits of Functional Food from The Sea: A Review, Jurnal Sains Natural 11, p. 87-95, http://ejournalunb.ac.id/index.php/JSN.

3- FISHERIES, F.,(2022), The state of worldfisheries and aquaculture. towards blue transformation , https://doi.org/10.4060/cc0461en.

4- GAO, Q.-F. and DONG, S.-L., (2023), in Aquaculture Ecology, Ed^Eds, Springer, p. 425-445, https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.03002

5- SIEVERS, M., et al.,(2022), Submerged cage aquaculture of marine fish: A review of the biological challenges and opportunities, Reviews in Aquaculture 14(1), p. 106-119. https://doi.org/10.1111/raq.12587.

6- ZULBAINARNI, N. and HAJ, M. H.,(2024), Sustainability level of the pearl lobster (Panulirus ornatus) aquaculture business using the systems of floating-net cage and fixed-net cage: A case study in South Sulawesi Province, Indonesia, Aquaculture and Fisheries 9(5), p. 851-859. https://doi.org/10.3390/jmse11071413.

7- HUANG, C.-C., TANG, H.-J. and LIU, J.-Y.,(2006), Dynamical analysis of net cage structures for marine aquaculture: Numerical simulation and model testing, Aquacultural engineering 35(3), p. 258-270, https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.03.003.

8- HUANG XIAOHUA, H. X., et al.,(2019), Numerical analysis of the dynamic response of a single-point mooring fish cage in waves and currents, http://doi.org/10.4194/2618-6381-v19_1_03.

9- LUDVIGSEN, T., (2017), Økonomisk analyse av det offshorebaserte havbruket" Octopus", University of Stavanger, Norway. p, http://hdl.handle.net/11250/2494832.

10- DONG-HO, J., OH, SEUNG, HOON., BYEONG-WON, PARK., JAE-HWAN, JUNG., YONG-JU, KWON.,(2021), Offshore fish-farming cage facility and method of installing same facility., ocean engineering, https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734928.

11- ÖZGÜL, A., AKYOL, O., ŞEN, H., CEYHAN, T. and DÜZBASTıLAR, F. O.,(2023), Wild fish aggregations near sea-cages rearing adult and juvenile fish in the Aegean Sea, Ecohydrology & Hydrobiology 23(1), p. 15-29, https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2022.09.003.

12- CHENG, H., AARSÆTHER, K. G., LI, L. and ONG, M. C.,(2020), Numerical study of a single-point mooring gravity fish cage with different deformation-suppression methods, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 142(4), p. 041301, https://doi.org/10.1115/1.4046115

13- All the sea potentiality without affecting it's biorhythm, https://www.adaq.it/en/aquaculture/,2024/12/12

14- ZHENG, X., LEI, YU., CHEN, DAOYI., LI, YI,(2017), Steel-structure net cage for breeding marine shellfish and stereoscopic breeding system, https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103301

15- FREDRIKSSON, D. W., *et al.*,(2005), *Moored fish cage dynamics in waves and currents,* IEEE Journal of Oceanic Engineering 30(1), p. 28-36. https://doi.org/10.1109/JOE.2004.841412

16- CHEN, C.-P., ZHAO, Y.-P., LI, Y.-C., DONG, G.-H. and ZHENG, Y.-N.,(2012), Numerical analysis of hydrodynamic behaviors of two net cages with grid mooring system under wave action, China Ocean Engineering 26(1), p. 59-76, https://doi.org/10.1007/s13344-012-0005-5 .

17- SHAFIZADEH, E. and GHARECHAHI, A., (A comparative study on the fatigue life of mooring

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]

29- BAI, X. D., ZHAO, Y. P., DONG, G. H., & LI, Y. C. ,(2015), Hydrodynamic analysis of elastic floating collars in random waves, China Ocean Engineering 29(3), 341-356, https://doi.org/10.1007/s13344-015-0024-0.

30- ZHAO, Y., GUAN, C., BI, C., LIU, H., & CUI, Y. ,(2019), Experimental investigations on hydrodynamic responses of a semi-submersible offshore fish farm in waves. , Journal of Marine Science and Engineering, 7(7), 238, https://doi.org/10.3390/jmse7070238.

31- THOMSEN, J. B., et al.,(2021), Modeling the TetraSpar floating offshore wind turbine foundation as a flexible structure in OrcaFlex and OpenFAST, Energies 14(23), p. 7866, https://doi.org/10.3390/en14237866.

32- ZHAO, H., XU, N., LI, Y. and WANG, Y.,(2022), The effect of new steep wave riser configurations on the stability of the suspension cluster manifold based on Orcaflex, Ships and Offshore Structures 17(5), p. 1132-1141, https://doi.org/10.1080/17445302.2021.1897219.

33- LI, P., (2017), A Theoretical and Experimental Study of Wave-induced Hydroelastic Response of a Circular Floating Collar PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, Trondheim, Norway, http://hdl.handle.net/11250/2436667.

systems for a Wave Dragon (WEC). https://www.researchgate.net/search.

18- HUANG, C.-C. and PAN, J.-Y.,(2010), Mooring line fatigue: A risk analysis for an SPM cage system, Aquacultural engineering 42(1), p. 8-16, https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.09.002 .

19- KIM, T.-H. and HWANG, K.-S.,(2011), Stability analysis of mooring lines of a submersible fish cage system using numerical model, Journal of Advanced Marine Engineering and Technology 35(5), p. 690-699, https://doi.org/10.5916/jkosme.2011.35.5.690

20- SHAFIEFAR, M. and REZVANI, A.,(2008), ** Simple Genetic Algorithm Application in Optimum Design of Mooring Patterns, Journal Of Marine Engineering 4(7), p. 27-39, http://dorl.net/dor/20.1001.1.17357608.1387.4.7.3.0 [In Persian].

21- ZAMANI MOFRAD, P. and KAZEMI, S.,(2019), Hydrodynamic Frequency Analysis of a Uniformly Moored SPM in Persian Gulf Environment Using Numerical Method, Journal Of Marine Engineering 15(29), p. 113-121, http://dorl.net/dor/20.1001.1.17357608.1398.15.29.9.7 [In Persian].

22- GHARECHAE, A. and KETABDARI, M. J.,(2023), Semi-analytical study of wave interaction with a submerged permeable sphere applied on a spherical aquaculture cage, Ocean Engineering 272, p. 113839, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113839

23- GHARECHAE, A. and KETABDARI, M. J.,(2022), A dynamical study on sea waves interaction with an array of circular elastic floaters of aquaculture fish cages, Marine Structures 85, p. 103241, https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103241

24- GHARECHAE, A. and KETABDARI, M. J.,(2020), Semi-analytical study on regular sea wave interaction with circular elastic floaters of aquaculture fish cages, Aquacultural engineering 91, p. 102125, https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102125

25- GHARECHAE, A., KETABDARI, M. J., KITAZAWA, D. and LI, Q.,(2020), Semi-analytical and experimental study on array of elastic circular floaters vertical motions in regular sea waves, Ocean Engineering 217, p. 107851, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107851

26- MA, C., ZHAO, Y.-P. and BI, C.-W.,(2022), Numerical study on hydrodynamic responses of a single-point moored vessel-shaped floating aquaculture platform in waves, Aquacultural engineering 96, p. 102216. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102216

27- TANG, H. J., HUANG, C. C., & CHEN, W. M. ,(2011), Dynamics of dual pontoon floating structure for cage aquaculture in a two-dimensional numerical wave tank. , Journal of Fluids and Structures, 27(7), 918-936, https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.06.009

28- LI, L., FU, S., XU, Y., WANG, J., & YANG, J,(2013), Dynamic responses of floating fish cage in waves and current, Ocean Engineering 72, 297-303, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.07.004.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.8]