بررسی تاثیر بکارگیری مجرای عرضی در بدنه موج‌شکن شناور به روش عددی

سامان یوسفی[۱] ، امین محمودی[۲]* ، سجاد حاجی زاده[۳]*

[۱] دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی. دانشگاه خلیج فارس. بوشهر
[۲] استادیار، گروه مهندسی عمران. دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس. بوشهر
[۳] استادیار، گروه مهندسی دریا. دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس. بوشهر

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۸/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

کلمات کلیدی:
موج‌شکن شناور
مجرای عرضی
ضریب انتقال موج
نمودار RAO

چکیده

موج‌شکن‌های شناور جایگزینی مناسب برای موج‌شکن‌های موسوم پایه ثابت محسوب می‌شوند که علاوه بر دارا بودن هدف اصلی حفاظت ساحل در برابر امواج، ارتباط آبی بین دریا و ناحیه حفاظت شده را نیز حفظ می‌کنند. محققین برای افزایش کارایی و افزایش محدوده عملکرد موج‌شکن‌های شناور، تحقیقات بسیاری بر روی پارامترهای تاثیرگذار آن‌ها انجام داده‌اند. در این پژوهش نیز به منظور بهبود عملکرد موج‌شکن شناور مستطیلی، تاثیر بکارگیری مجاری عرضی مستقیم با شکل سطح مقطع مستطیلی و مجاری عرضی با طرح هندسی الگو گرفته از شیر تسلا بر عملکرد موج‌شکن شناور با استفاده از نرم افزار ANSYS AQWA مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مدلسازی، موج‌شکن‌های شناور با ارتفاع ۴ متر و عمق غوطه‌وری ۲ متر تحت تاثیر امواجی با ارتفاع ۱ متر و در بازه پریودهای موج (۳تا۸) ثانیه مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به نسبت مدل موج‌شکن شناور مستطیلی در پریود (۳تا۸) ثانیه، بکارگیری مجرای مستقیم در بدنه‌ی موج‌شکن شناور مستطیلی تا مقدار میانگین ۲۰/۹ ٪ و بکارگیری مجرای با طرح هندسی الگو گرفته از شیر تسلا در بدنه موج-شکن شناور مستطیلی تا میزان میانگین ۲۰/۳ ٪ عملکرد سازه را بهبود می‌بخشد.

Investigating the effect of using a Lateral duct in the body of a floating breakwater by numerical method

Saman Yousefi[1], Amin Mahmoudi[2*], Sajad Hajizadeh[3*]

[1] M.Sc. Student, Faculty of Engineering. Persian Gulf University, Bushehr
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Faculty of Engineering, Persian Gulf University. Bushehr
[3] Assistant Professor, Marine Engineering Department. Faculty of Engineering, Persian Gulf University. Bushehr

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 21 Nov 2022
Accepted: 8 Feb 2023

Keywords:
Floating breakwater
transverse channel
Wave transmission coefficient
Response amplitude operators

ABSTRACT

Floating breakwaters are good alternative to the so-called fixed base breakwaters, which, in addition to having the main purpose of protecting the beach from waves, also maintain the water connection between the sea and the protected area. Researchers in order to increase the efficiency and increase the performance range of floating breakwaters, have done many researches on their effective parameters. In this research, due to improve the performance of the rectangular floating breakwater, the effect of using straight transverse ducts with a rectangular cross-section and transverse ducts with a geometric design modeled after the Tesla valve on the performance of the floating breakwater using ANSYSAQWA software was investigated. In this modeling, floating breakwaters with a height of 4 meters and an immersion depth of 2 meters were analyzed under the influence of waves with a height of 1 meter and in the range of wave periods (3-8) seconds. The results showed that compared to the rectangular floating breakwater model in the period (3-8) seconds, Using a straight channel in the body of a rectangular floating breakwater up to an average value of 20.9% and using a duct with a geometric design modeled on the Tesla valve in the body of a rectangular floating breakwater improves the performance of the structure up to an average of 20.3%.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

۱- مقدمه

با استفاده و توسعه صنایع دریایی در سراسر جهان، پژوهش و طراحی موج‌شکن‌های شناور به موضوع جذاب و پرکاربرد در زمینه معماری دریایی و مهندسی اقیانوسی تبدیل شده است. با بررسی و مقایسه کلی موج‌شکن‌های شناور و موج‌شکن‌های پایه ثابت می‌توان به مزایای موج‌شکن شناور پی برد، که از جمله این مزایا اولاً هزینه ساخت کم، شرایط ساخت راحت و قابلیت نصب و جداسازی راحت را می‌توان بیان کرد و ثانیاً برای اکوسیستم دریا و زیبایی شناسی محیط دریا گزینه مناسبی می‌باشد. اما باید در نظر گرفت قابلیت اجرائی شدن در شرایط آب‌های خشن اقیانوسی با پریودهای طولانی و ارتفاع امواج بلند را ندارد.

در زمینه افزایش‌کارایی و عملکرد موج‌شکن‌های شناور، پژوهشگران مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی بسیاری ارائه داده‌اند. در سال ۱۹۷۵ جیمیسون و همکاران به مطالعه موج‌شکن‌های شناور مستطیلی بتنی از قبل طراحی شده پرداختند. نتایج آنها نشان داده است، عملکرد موج‌شکن شناور مستطیلی با اجرای یک سطح شیبدار بر روی عرشه موج‌شکن شناور و نصب دو ورق متخلخل در زیر آن بهبود بخشیده شده است [۱]. در سال ۲۰۰۰ میلادی ویلیامز و همکاران یک جفت موج‌شکن شناور پانتون با مقطع مستطیلی که به وسیله خطوط پهلوگیری مهار شده است را از لحاظ عملکرد هیدرودینامیکی بررسی کردند و نتایج نشان داد است، که خواص انعکاس موج سازه به شدت به عرض، میزان غوطه‌وری و سختی خط پهلوگیری بستگی دارد [۲]. درسال ۲۰۰۴ میلادی کوتاندوس و همکاران یک مقاله تحقیقاتی با هدف بررسی کارایی موج‌شکن‌های شناور در آب‌های کم عمق و میانی انجام داده‌اند که در آن رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور حرکت ثابت و شدید، با استفاده از یک مدل ریاضی و یک مدل آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ، مورد مطالعه قرار گرفت [۳]. در سال ۲۰۰۷ میلادی فوسرت و همکاران به پژوهشی در زمینه تحلیل رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور و بهبود عملکرد آن‌ها به وسیله طراحی موج‌شکن شناور دارای شکل مستطیلی با امکان قرار دادن صفحه‌ای سفت و سخت در زیر آن پرداختند [۴]. در سال ۲۰۱۰ میلادی وانگ و سان یک پیکربندی جدید از موج‌شکن شناور و عملکرد آن در امواج را ارائه کردند [۵]. در سال ۲۰۱۱ میلادی پژوهشی توسط نرگس فروزنده و همکاران انجام شده است که در آن تاثیر ارتفاع تیغه موج شکن شناور تیغه‌دار و آبخور موج-شکن شناور پانتونی بر میزان ضرایب بازتاب و انتقال امواج نامنظم دریا بررسی شده است [۶]. در سال ۲۰۱۲ میلادی فانگ هی و همکاران در یک پژوهش، عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور با و بدون محفظه پنوماتیک به صورت تجربی را مورد بررسی قرار داده است. نتایج کلی نشان می‌دهد که طراحی جدید موج-شکن شناور برای حفاظت از امواج مؤثرتر است و همچنین پتانسیل تبدیل انرژی موج به الکتریسیته را با نصب توربین‌های ولز در محفظه‌های پنوماتیک حفظ می‌کند [۷]. در سال ۲۰۱۶ میلادی هیونگ چی در یک مقاله تعامل بین امواج ورودی و یک موج‌شکن مستطیلی شناور با صفحات جانبی متخلخل عمودی در زمینه نظریه پتانسیل خطی دو بعدی را بررسی کرده است [۸]. در سال ۲۰۱۸ میلادی اریک دامگارد و همکاران مقاله‌ای با هدف بررسی اثر دو مکانیسم مختلف میرایی یک موج‌شکن شناور انجام دادند. در این پژوهش سه مقطع پایه از موج‌شکن‌های شناور مورد آزمایش قرار گرفت و در حالت2D تجزیه و تحلیل شد [۹]. چان‌یان‌جی و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی نیز در یک مقاله، چهار نوع موج-شکن شناور را پیشنهاد داده‌اند ، موج‌شکن شناور استوانه‌ای، موج-شکن شناور متخلخل و موج‌شکن شناور قفس مشبک در دو نوع مختلف، عملکرد هیدرودینامیکی هر نوع برای شناسایی موثرترین پیکربندی برای تضعیف موج آزمایش شده است [۱۰]. در همان سال ژیون یانگ و همکاران در یک مقاله نوع جدیدی از موج‌شکن شناور بالاست آب را پیشنهاد می‌کند. نتایج نشان می‌دهد بالاست کردن با آب در جعبه شناور نه تنها عملکرد آب‌گیری موج‌شکن شناور را افزایش می‌دهد، بلکه تضعیف موج تابشی را در مقایسه با بالاست شنی خشک افزایش می‌دهد و افزایش ارتفاع صفحه عمودی و یا میزان غوطه وری بدنه شناور به کاهش انتقال موج کمک می‌کند [۱۱]. در سال ۲۰۲۰ میلادی، هو فو نگوین در یک تحقیق با بررسی نوع محاسبه عملکرد موج‌شکن‌های شناور، یک شاخص جدید (ضریب انتقال نماینده) برای مقایسه عملکرد تضعیف طرح‌های مختلف موج‌شکن شناور سه بعدی ارائه داده است [۱۲]. در سال۲۰۲۱ میلادی، چولینگ در مقاله‌ای با الهام از موج‌شکن نوع دیوار پرده‌ای، ساختار موج‌شکن شناور نوع L معکوس را معرفی کرده است که یک موج‌شکن شناور مستطیلی با دیوار پرده‌ای عمودی مهار شده در بین شمع‌ها می‌باشد [۱۳]. در همان سال میثم قربانی فولادی به مسئله برهم‌کنش موج و موج‌شکن مستطیلی شناور لنگردار با استفاده از روش المان محدود مرزی، در یک صفحه عمودی دو بعدی پرداخته است [۱۴].

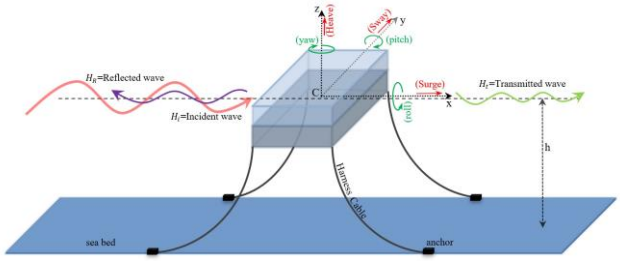
در مطالعات و تحقیقات پیشین، به منظور بهبود عملکرد موج‌شکن-های شناور، به بررسی تغییر شکل سطح مقطع موج‌شکن شناور و بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد موج‌شکن‌های شناور به صورت دوبعدی پرداخته شده است. در مورد تاثیر مجاری عرضی در بدنه موج‌شکن‌های شناور، تاکنون تحقیقی ارائه نشده است. لذا در این تحقیق به بررسی تاثیر مجاری عرضی با دو شکل هندسی سطح مقطع، مستطیلی مستقیم و الگو برداری شده از هندسه شیر تسلا به صورت سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

بر روی ضریب انتقال موج و عملگرهای دامنه پاسخ موج‌شکن شناور و مقایسه آن‌ها با مدل موج‌شکن مستطیلی بدون مجرای عرضی تحت اثر موج منظم، پرداخته شده است.

۲-هیدرودینامیک موج‌شکن‌های شناور

سازه موج‌شکن شناور در هنگام مقابله موج، حرکات پیچیده شش درجه آزادی از خود نشان می‌دهد. این حرکات که در شکل(۱) نشان داده شده است، شامل حرکات افقی در طول محور (x ,y, z) بدنه و چرخش بدنه حول محورهای(x ,y, z) بدنه می‌باشد.



شکل(۱): عملکرد موج‌شکن شناور با درجات آزادی مختلف موج‌شکن شناور[۱۶]

عملکرد موج‌شکن شناور به گونه‌ای است که بخشی از انرژی موج تابشی پس از برخورد موج با موج‌شکن شناور، منعکس شده، بخش دیگری از آن مستهلک شده و در نهایت بخشی از آن به پشت موج سازه منتقل می‌گردد. اندازه‌گیری ارتفاع موج پشت سازه به منزله سنجش مستقیمی از راندمان موج‌شکن شناور در کاهش اثر موج است. راندمان و عملکرد موج‌شکن شناور را معمولاً با ضریبی به نام ضریب انتقال مطرح می‌کنند. ضریب انتقال، نسبت ارتفاع موج عبوری از موج‌شکن به موج تابشی می‌باشد. اگر ارتفاع موج تابشی به موج‌شکن با H_i ، موج منعکس شده را با H_r و موج عبوری از موج‌شکن را با H_t نشان داده شود، ضریب انتقال موج سازه موج-شکن شناور عبارت است از:

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} \qquad (۱)$$

انرژی کل موج در واحد طول موج‌شکن شناور با مجذور ارتفاع موج، نسبت مستقیم دارد. بنابراین با توجه به عملکرد موج‌شکن شناور می‌توان رابطه (۲) را نوشت.

$$\left(\frac{H_r}{H_i}\right)^2 + \left(\frac{H_t}{H_i}\right)^2 + (E_L)^2 = C_r^2 + C_t^2 + C_L^2 = 1 \qquad (۲)$$

در این رابطه C_r ضریب بازتاب، C_t ضریب انتقال، C_Lضریب استهلاک است.

در طراحی موج‌شکن دستیابی به ضریب انتقال کمتر در کنار ضریب انعکاس و یا ضریب استهلاک بالاتر ملاک است. البته در صورت افزایش ضریب انعکاس، امواج ایستا و شبه ایستا در سمت روبه دریا ایجاد می‌شود و بنابراین تا حد ممکن از افزایش ضریب انعکاس اجتناب شود.

۳- مدلسازی عددی

در این تحقیق به مدلسازی عددی موج‌شکن‌های شناور با فرض غیرلزج و غیرچرخشی بودین سیال پرداخته شده است. در این حالت معادله حاکم بر سیال معادله لاپلاس است. با استفاده از معادله لاپلاس و با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب می‌توان نیروی وارد بر موج‌شکن شناور را بدست آورد و سپس آن را به صورت عددی مورد تحلیل قرار داد. در این تحقیق به منظور بررسی عددی تاثیر بکارگیری مجرای عرضی در بدنه موج‌شکن‌های شناور مستطیلی بر عملکرد هیدرودینامیکی آن، از میان نرم‌افزارهای مختلف مورد استفاده در مهندسی دریا و با توجه به قابلیت های نرم‌افزار تجاری ANSYS AQWA، با صرفنظر کردن از مدلسازی آشفتگی جریان در اطراف موج‌شکن شناور، این نرم‌افزار برای مدلسازی هیدرودینامیک جریان اطراف موج‌شکن‌های شناور انتخاب شده است. همچنین به منظور مدلسازی مدل هندسی موج‌شکن‌ها از نرم افزار SOLIDWORK استفاده شده است. ماژول AQWA یکی از بخش‌های تحلیل مهندسی در نرم‌افزار ANSYS است که برای بررسی اثرات موج، باد و جریان بر سازه-های دریایی ثابت و شناور نظیر یدک‌کش‌ها، سکوهای دریایی، سازه‌های نیمه شناور، سکوهای پایه کششی، کشتی‌ها، سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر و موج‌شکن‌ها به کار می‌رود.

۳-۱- معادلات حاکم در مدلسازی عددی

برای بیان میدان جریان سیال اطراف یک سازه شناور، پتانسیل سرعت بصورت زیر تعریف می‌شود[۱۶]:

$$\Phi(\vec{X},t) = A\varphi(\overrightarrow{X})e^{-i\omega t} \qquad (۳)$$

A دامنه موج تابشی، ω فرکانس موج تابشی، t زمان و $\vec{X}(x,y,z)$ بیانگر موقعیت نسبت به محور های مرجع ثابت می‌باشد.

در اینجا، پتانسیل کل (φ_I) را به عنوان جمع سه مولفه φ_I موج تابشی، (φ_D) موج تفرق یافته، (φ_R) موج تشعشعی می‌توان فرض نمود که هر سه تابع، در معادله لاپلاس صدق می‌کنند.

$$\varphi(\vec{X})e^{-i\omega t} = \left[\varphi_I + \varphi_D + \sum_{j=1}^{6} \varphi_{Rj}\, X_j\right] e^{-i\omega t} \qquad (۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]

[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

که φ_I پتانسیل موج تابشی مرتبه اول با دامنه موج واحد، (φ_D) پتانسیل موج تفرق یافته، φ_{Rj} پتانسیل موج تشعشعی ناشی از حرکت مود j ام با دامنه حرکت واحد است. $\Phi(\vec{x},t)$ تابع پتانسیل سرعت و $\varphi(\vec{x})$ ترم مستقل از زمان است که بر اساس تئوری هیدرودینامیک خطی برای سیال تراکم ناپذیر و غیر لزج و جریان سیال غیر چرخشی با معادلات زیر توصیف می شود[۱۶]:

معادله لاپلاس:

$$\nabla^2\varphi\,(x,y,z)=\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}=0 \qquad (۵)$$

شر ط مرزی سطح آزاد خطی S_f در $z=0$

$$-\omega^2\varphi+g\frac{\partial\varphi}{\partial z} \qquad (۶)$$

شرط مرزی روی سطح جسم (S_b):

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n}=\begin{cases}-i\omega n_j & \text{برای پتانسیل تابشی}\\ -\dfrac{\partial\varphi}{\partial x} & \text{برای پتانسیل پراش}\end{cases} \qquad (۷)$$

شرط مرزی بستر دریا (S_z) در $Z=-h$

شرط مرزی دور دست (S_∞) جایی که $\sqrt{X^2+Y^2}\to\infty$

$$\left|\nabla_\varphi\right|\to 0 \qquad (۸)$$

در این تحقیق از نرم افزار ANSYS AQWA برای حل معادله پتانسیل سرعت به کار برده شده است که بر مبنای پتانسیل *BEM* کار می‌کند. علاوه بر شرایط مرزی که در بخش‌های قبلی ذکر شد، در ناحیه سیال همچنین شرط مرزی نیز برقرار می‌شود:

$$\nabla^2G(\vec{x},\vec{y},\vec{z})=\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}=\delta(\vec{x},\vec{\xi}) \qquad (۹)$$

جائیکه $x\in\Lambda$ و $y\in\Lambda$ و $\vec{\xi}=(\xi,\eta,\zeta)$ بیانگر موقعیت منبع روی سطح خیس شده FBW می باشد.

$\delta\left(\vec{x}-\vec{\xi}\right)$ تابع دیراک می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\delta\left(\vec{x}-\vec{\xi}\right)=\begin{cases}0 & \text{زمانی } \vec{x}-\vec{\xi}\neq 0\\ \infty & \text{زمانی } \vec{x}-\vec{\xi}=0\end{cases} \qquad (۱۰)$$

تابع گرین با در نظر گرفتن تابع دیراک میتواند به صورت زیر بازنویسی شود.

$$\begin{aligned}&G(\vec{X},\vec{\xi},\omega)=\frac{1}{r}+\frac{1}{r_2}\\&+\int_0^\infty\frac{2(k+v)e^{-kh}cosh[k(z+h)]cosh[k(\zeta+h]}{k\sinh(kh)-v\cosh(kh)}j_0(kR)dk\\&=i2\pi\frac{(k_0+v)e^{-k_0h}cosh[k_0(z+h)]cosh[k_0(\zeta+h]}{\sinh(k_0h)+k_0h\cosh(k_0h)-vh\sinh(k_0h)}j_0(k_0R)\end{aligned} \qquad (۱۱)$$

که j_0 تابع بسل نوع اول می‌باشد.

$$\begin{aligned}&R=\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}\\&r=\sqrt{R^2+(z-\zeta)^2}\\&r_2=\sqrt{R^2+(z+\zeta-2h)^2}\\&v=\frac{\omega^2}{g}\qquad v=k_0\tanh(k_0h)\end{aligned} \qquad (۱۲)$$

در معادلات فوق $(k=2\pi/l)$عدد موج است، ω فرکانس موج، L طول موج g شتاب گرانشی است.

بنابراین پتانسیل سرعت موج تفرق یافته و radiation ، توسط قضیه گرین به عنوان یک معادله انتگرالی فردهولم از نوع دوم تعریف می شود.

$$C\varphi(\vec{X})=\int_{S_0}^{\cdot}\left\{\varphi(\vec{\xi})\frac{\partial G(\vec{X},\vec{\xi},\omega)}{\partial n(\vec{\xi})}-G(\vec{X},\vec{\xi},\omega)\frac{\partial\varphi(\vec{\xi})}{\partial n(\vec{\xi})}\right\}ds \qquad (۱۳)$$

Cپتانسیل سیال تعریف می‌شود $=\begin{cases}0 & \vec{X}\in A\cup S_0\\ 2\pi & \vec{X}\in S_0\\ 4\pi & \vec{X}\in A\end{cases}$

$$\varphi(\vec{X})=\frac{1}{4\pi}\int_{Sb}^{\cdot}\sigma(\vec{X})G(\vec{X},\vec{\xi}.\omega)ds \qquad (۱۴)$$

زمانی که $\vec{X}\in \mathrm{A}\cup S_b$

در معادله(۱۴)، استفاده از شرط مرزی سطح جسم که بوسیله معادله (۷) داده می‌شود، مقاومت منبع بر روی سطح متوسط بدنه خیس به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\frac{\partial\varphi(\vec{X})}{\partial n(\vec{X})}=-\frac{1}{2}\sigma(\vec{X})+\frac{1}{4\pi}\int_{S_d}\sigma\,(\vec{\xi})\frac{\partial G(\vec{X},\vec{\xi},\omega}{\partial n(\vec{X})}ds \qquad (۱۵)$$

جایی که $\vec{X}\in S_b$

۱-۱-۳- معادله حرکت و RAO

راه‌حل‌های بدست آمده برای مسائل تفرق و radiation می‌تواند به منظور آنالیز پاسخ‌های دینامیک سیستم سازه ای با معادله حرکت سیستم موج‌شکن شناور در حوزه‌های زمان و فرکانس به طور همزمان ترکیب شوند.[۱۶].

در حوزه فرکانس، معادله سازه‌ای حرکت عبارت است از:

$$\left[-\omega^2\left(M_s+M'_a\right)-i\omega C'+K'_{hys}+K_a\right]\left[X_{jm}\right]=\left[F'_{jm}\right] \qquad (۱۶)$$

M'_a و M_s به ترتیب ماتریس‌های جرم افزوده کلی و جرم سازه‌ای کلی می‌باشند و C' ماتریس دمپینگ هیدرودینامیک می‌باشد.

K_a و K'_{hys} به ترتیب ماتریس‌های سختی سازه‌ای اضافی و سختی‌های هیدرواستاتیک اضافه می‌باشند و F'_{jm} بیانگر نیروهای فرود-کریلوف کلی و نیروهای تفرق یافته و گشتاورها می‌باشد که m مربوط به سازه بوده و j مرتبط با مود حرکتی می‌باشد.

سپس، معادله حرکت در حوزه زمان عبارتست از:

$$M\ddot{X}(t)+C\dot{X}(t)+KX(t)=F(t) \qquad (۱۷)$$

که M جرم افزوده در ماتریس جرم می‌باشد و C دمپینگ هیدرودینامیک در ماتریس دمپینگ بوده و هر دو مورد به فرکانس بستگی دارند و K ماتریس سختی کلی می‌باشد. در اینجا با توجه به نیروی خارجی F(t) که یک دامنه ثابتی دارد، معادله حرکت در حوزه فرکانس نمی‌تواند به طور مستقیم معادله حوزه زمان را پوشش دهد. بنابراین با بکارگیری فرم انتگرالی کانولوشن، معادله حرکت را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\{M_s+A_\infty\}\ddot{X}(t)+C\dot{X}(t)+KX(t) + \int R(t-\tau)\dot{X}(\tau)d\tau=F(t) \qquad (۱۸)$$

که A_∞ ماتریس جرم افزوده در فرکانس نامحدودی می‌باشد و C ماتریس دمپینگ بوده و دربردارنده نتایج دمپینگ radiation می‌باشد و R ماتریس تابع ضربه سرعت بوده و K ماتریس سختی کلی می‌باشد.

همچنین ماتریس تابع ضربه شتاب در معادله حرکت به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\{M_s+A_\infty\}\ddot{X}(t)+C\dot{X}(t)+KX(t) + \int h(t-\tau)\ddot{X}(\tau)d\tau=F(t) \qquad (۱۹)$$

ماتریس تابع ضربه شتاب می‌تواند بصورت زیر تعیین شود:

$$h(t)=\frac{2}{\pi}\int_0^\infty B(\omega)\frac{\sin(\omega t)}{\omega}d\omega = \frac{2}{\pi}\int_0^\pi \{A(\omega)-A_\infty\}\cos(\omega t)d\omega \qquad (۲۰)$$

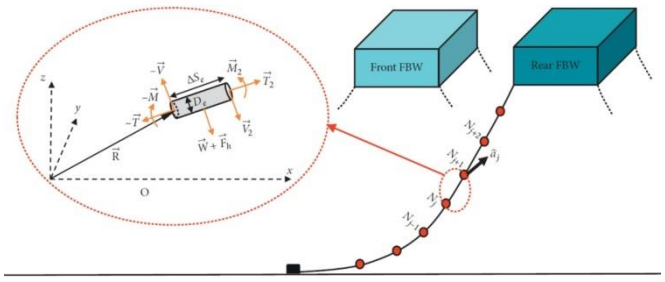
که $B(\omega)$ ماتریس دمپینگ هیدرودینامیکی بوده و $A(\omega)$ ماتریس جرم افزوده می‌باشد. با جایگزینی نیروهای موج مرتبه اول و دوم در معادله (۱۹)، معادله حرکت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\{m'+A_\infty\}\ddot{X}(t)=F^{(1)}(t)+F^{(2)}(t)+F_t(t) - C\dot{X}(t)-KX(t)-\int_0^t h(t-\tau)\ddot{X}(\tau)d\tau \qquad (۲۱)$$

که K ماتریس سختی کلی بوده و در بردارنده سختی سیستم نگهدارنده و هیدرواستاتیک خطی می‌باشد، $F_t(t)$ نیروی articulation و سیستم مهاربندی می‌باشد، $F^{(1)}(t)$ نیروی تحریک موج مرتبه اول می‌باشد و $F^{(2)}(t)$ نیروی تحریک موج مرتبه دوم می‌باشد.

۳-۱-۲- سیستم مهاربندی

به منظور تجزیه و تحلیل حرکات کابل‌های مهار، عوامل تاثیرگذار زیادی شامل کشش الاستیک خطی، لنگر خمشی، نیروهای درگ و جرم کابل باید درنظر گرفته شود. نیروهای وارد به کابل‌ها با گذشت زمان تغییر می‌کنند و باعث رفتار غیر خطی کابل‌ها می‌شوند. شبیه‌سازی دینامیکی کابل نیاز به گسسته سازی کابل در امتداد طول خودش و با درنظر گرفتن جرم و نیروهای وارد بر آن می‌باشد. هر خط نگهدارنده (کابل مهاری) به یک سری از المان‌های نوع موریسون که در معرض نیروهای خارجی مختلفی قرار دارند، گسسته سازی می‌شود که مسئله در شکل(۲) نشان داده شده است[۱۶].



شکل(۲) نیروها و لنگرهای وارد بر المان های کابل(سیستم مهاری)[۱۶]

معادلات نیرو و لنگر وارد بر کابل به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\partial\vec{T}}{\partial s_e}+\frac{\partial\vec{V}}{\partial s_e}+\vec{\omega}+\vec{F}_h=m\frac{\partial^2\vec{R}}{\partial t^2}, \qquad (۲۲)$$

$$\frac{\partial\vec{M}}{\partial s_e}+\frac{\partial\vec{R}}{\partial s_e}*\vec{V}=-\vec{q} \qquad (۲۳)$$

که $\vec{R}$ بیانگر بردار موقعیت گره اول از المان کابل، $\vec{T}$ بردار نیروی کششی در گره اول المان، $\vec{M}$ ممان خمشی در گره اول المان، $\vec{V}$ بردار نیروی برشی گره اول المان، $\vec{F}_h$ بردارهای بارگذاری هیدرودینامیکی خارجی بر واحد طول، $\vec{q}$ بارگذاری ممانهای توزیع

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

شده در واحد طول، m جرم سازه بر واحد طول، $\vec{\omega}$ وزن المان بر واحد طول، D_e قطر المان و ΔS_e بیانگر طول المان می‌باشد.

ممان خمشی و کشش که مرتبط با سختی‌های خمشی و سختی-های محوری جنس کابل بوده، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

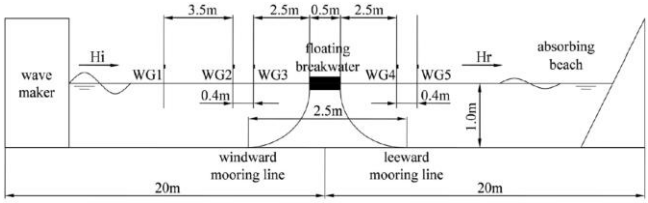
$$M'' = EI\frac{\partial \vec{R}}{\partial S_e}\times\frac{\partial^2 \vec{R}}{\partial S_e^2} \qquad (۲۴)$$

$$T'' = EA\varepsilon$$

که M'' بیانگر ممان خمشی کابل، T'' کشش در کابل و ε کرنش محوری المان و EA سختی محوری کابل و EI بیانگر سختی خمشی کابل می‌باشد.

۲-۳- صحت سنجی مدل عددی

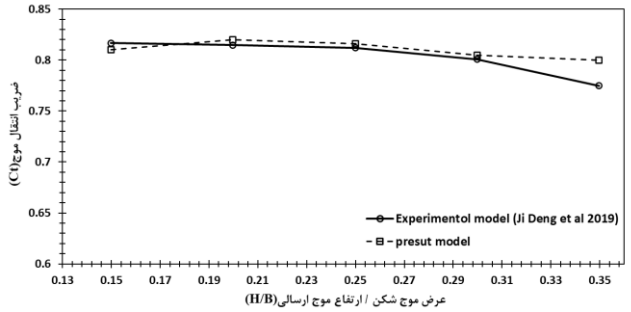
به منظور صحت سنجی مدل عددی در بررسی عملکرد موج‌شکن-های شناور از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط Ji.Deng و همکاران در سال(۲۰۱۹) [۱۵] استفاده شده است. در این تحقیق یک موج شکن شناور مستطیلی به طول ۰/۷۶ متر، به عرض ۰/۵ متر و به ارتفاع ۰/۲ متر و عمق آبخور ۰/۱ متر در یک فلوم به طول۴۰ متر، عرض ۰/۸ متر و عمق ۱/۴ متر تحت امواج منظمی به ارتفاع (۰/۱۷, ۰/۱۵, ۰/۱۲, ۰/۱, ۰/۸) متر و پریود ۱/۱ ثانیه با عمق آب ۱ متر قرار گرفته است. شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی در شکل (۳) آورده شده است.



شکل(۳): نمایی شماتیک از فلوم موج[۱۵]

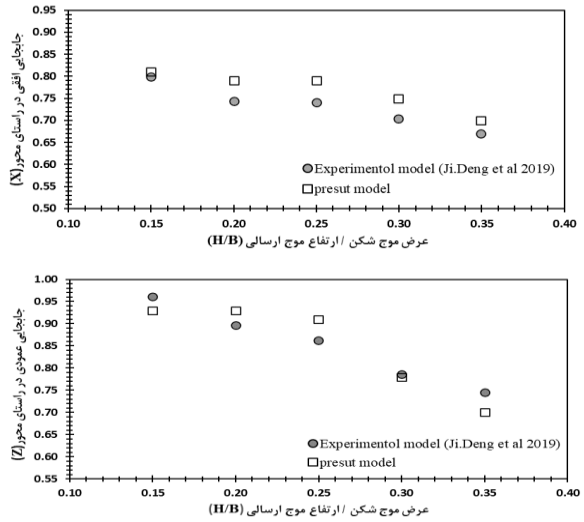
مدل تکی مقاله مزبور [۱۵] در نرم‌افزار ANSYS AQWA برحسب پارامترهای سازه‌ای و شرایط مرزی و اولیه، مدلسازی و در برابر امواجی با ارتفاع (۰/۱۷, ۰/۱۵, ۰/۱۲, ۰/۱, ۰/۸) متر و پریود ۱/۱ ثانیه آنالیز شده است.

عملکرد موج‌شکن شناور با استفاده از ضریب انتقال موج (C_t) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مقایسه ضریب انتقال موج به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی حاضر در برابر پارامتر بدون بعد (H/B) برای موج با پریود ۱/۱ ثانیه و ارتفاع امواج (۰/۱۷, ۰/۱۵, ۰/۱۲, ۰/۱, ۰/۸) متر در شکل (۴) آورده شده است.



شکل(۴): نمودار عملکرد ضریب انتقال موج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی [۱۵]

همانطور که در شکل(۴) مشاهده می‌شود، نتایج عددی و اندازه گیری‌های آزمایشگاهی از تطابق نسبتاً مناسبی برخوردار می‌باشد. همچنین در شکل(۵) مقایسه مقادیر(RAO Heave) و (RAO Surge) مدل آزمایشگاهی ارائه شده توسط ji.Deng و همکاران در سال ۲۰۱۹ و مدل عددی حاضر برای امواجی با ارتفاع‌های (۰/۱۷, ۰/۱۵, ۰/۱۲, ۰/۱, ۰/۸) متر و با پریود ۱/۱ ثانیه ارائه شده است.



شکل(۵): نمودار عملگرهای دامنه پاسخ مدل عددی و مدل آزمایشگاهی [۱۵]

اختلاف بین نتایج حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی می-تواند به وسیله سه پارامتر آماری زیر به صورت کمی بیان شود:

$$A_r = \left(\sum_i \left(Var_i^{num}\right)^2 / \sum_j \left(Var_i^{exp}\right)^2\right)^{1/2} \qquad (۲۵)$$

$$P_d = \left(\sum_i \left(Var_i^{num} - Var_i^{exp}\right)^2 / \sum_j \left(Var_i^{exp}\right)^2\right)^{1/2} \qquad (۲۶)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_i \left(Var_i^{num} - Var_i^{\exp}\right)^2}{N}\right)^{1/2} \qquad (۲۷)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

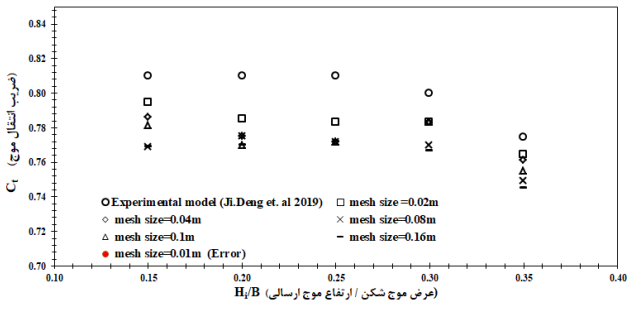
که در روابط فوق Var متغیر تحت بررسی است، بالا نویس‌ها به مقادیر عددی (num) و آزمایشگاهی (exp) اشاره دارند و زیرنویس مربوط به داده‌ها (i) می‌باشد. پارامتر اول (A_r) دامنه نسبی دو مقدار عددی را نشان می‌دهد به گونه‌ای که بهترین مطابقت بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در میل این پارامتر به مقدار یک حاصل خواهد شد $(A_r \to 1)$، از طرف دیگر پارامتر P_d اختلاف دو مقدار عددی را نشان می‌دهد. لذا مطابقت کامل وقتی حاصل می‌شود که این مقدار به سمت صفر میل کند $(P_d \to 0)$. جدول (۱) مقادیر A_r، P_d و $RMSE$ حاصل برای نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

جدول(۱): مقایسه مقادیر A_r ، P_d و RMSE برای نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی[۱۵]

	A_r	P_d	$RMSE$
C_t	۱/۰۰۷	۰/۰۲۳	۰/۰۰۸
$RAO\ Heave$	۱/۰۰۶	۰/۰۴۲	۰/۰۳۶
$RAO\ Surge$	۱/۰۵۲	۰/۰۵۶	۰/۰۴۱

هر سه پارامتر آماری نشان می‌دهند که نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی از مطابقت مناسبی برخوردار می باشد.

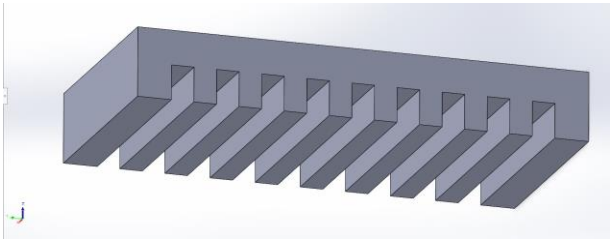
به منظور بررسی تاثیر ابعاد مش‌بندی بر نتایج مدلسازی و استقلال نتایج مدلسازی از مش‌بندی، صحت سنجی با اندازه مش‌های (۰/۰۱ , ۰/۰۲ , ۰/۰۴ , ۰/۰۸ , ۰/۱ , ۰/۱۶ , ۰/۲) متر انجام شد. نتایج این مدلسازی‌ها برای ضریب انتقال موج و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی در شکل(۶) نشان داده شده است. همانطور که از روی این شکل مشاهده می‌شود، با کاهش اندازه مش‌بندی به ۰/۰۲ متر، نتایج مدل عددی مطابقت بهتری با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد ولی با کوچکتر کردن اندازه مش‌بندی، مدل همگرا نشده و دچار خطای آنالیز شده است. بنابراین با توجه به نتایج ارائه شده، می‌توان اندازه مش ۰/۰۲ را به عنوان مش بهینه برای این مدلسازی در نظر گرفت.



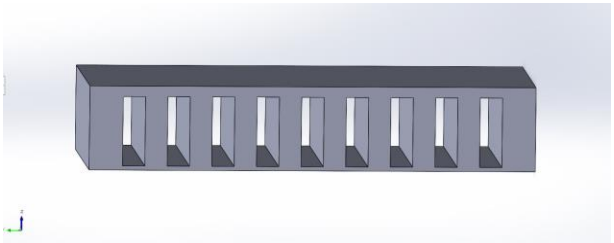
شکل(۶): مقایسه ضریب عبور موج در مدلسازی عددی با اندازه مش‌های متفاوت با نتایج آزمایشگاهی[۱۵]

۳-۳- مشخصات مدل‌های مختلف موج‌شکن شناور

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر بکارگیری مجاری عرضی در بدنه موج‌شکن شناور، دو نوع شکل هندسی مجاری عرضی بصورت مستطیلی و شکل هندسی الگو گرفته از شیر تسلا در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی مدل مبنا و شرایط مرزی و شرایط اولیه بر اساس پژوهش ارائه شده توسط Rajabi و همکاران در سال ۲۰۲۱ می‌باشد [۱۶]. تمام طرح های موج شکن شناور مجرادار و موج‌شکن شناور مستطیلی(مدل مبنا) در نرم افزار SOLIDWORK بر اساس ابعاد و جرم مشخص شده، مدلسازی و پارامترهای سازه‌ای آن (شامل ممان اینرسی، چگالی، مرکز جرم) از نرم‌افزار استخراج شد. سپس مدل های هندسی طراحی شده در نرم‌افزار SOLIDWORK در نرم‌افزار ANSYS AQWA فراخوانی شده و تحت امواج منظم با ارتفاع ۱ متر و پریودهای (۳تا۸) ثانیه با بکارگیری تئوری موج استوکس مرتبه دوم و شرایط مرزی و اولیه مبنا، مورد آنالیز قرا گرفتند. در شکل (۷) نمایی از موج‌شکن‌های شناور مستطیلی مجرادار نشان داده شده است.



(الف)

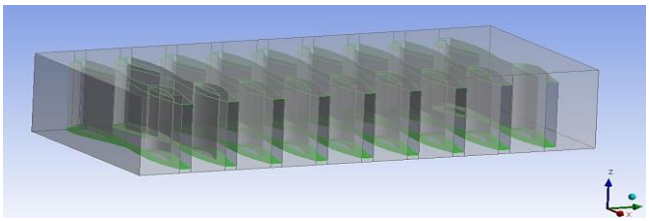


(ب)

شکل(۷): نمایی از موج‌شکن‌های شناور مستطیلی مجرادار. الف) مجرای عرضی باز با ارتفاع ۲ متر ب) مجرای عرضی بسته با ارتفاع ۳/۳ متر

نوع دیگری از موج‌شکن شناور مجرادار که در این تحقیق به آن پرداخته شد، با الگوبرداری از شکل هندسی شیر تسلا دو طبق به عنوان مجرای عرضی در موج‌شکن شناور مجرادار می‌باشد و همانطور که در شکل(۸) آورده شده است، ۹ مجرا با شکل هندسی شیر تسلا در بدنه موج شکن شناور مستطیلی بکار رفته است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

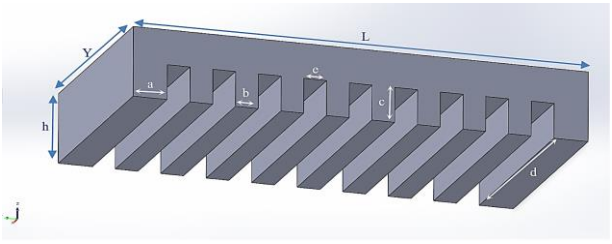


شکل(۸): نمای کلی از موج‌شکن شناور با مجاری الگوبرداری شده از هندسه شیر تسلا

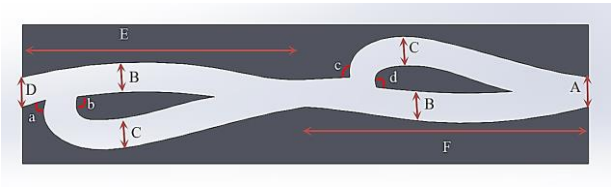
شیر تسلا در جهت معکوس باعث ایجاد یک مقاومت درونی در برابر حرکت سیال می‌شود، که این مقاومت درونی اول به دلیل طولانی‌تر شدن مسیر حرکت سیال در جهت معکوس و دوم به دلیل دو مسیر شدن سیال در هر طبق و برخورد سیال در انتهای هر طبق با زاویه بیشتر از ۹۰ درجه می باشد، که باعث کاهش انرژی و سرعت حرکت سیال شده و بطور کلی در انتهای طبق دوم، میزانی از انرژی خود را به وسیله (اصطکاک و برخورد بین سیال و دیواره و برخورد سیال در حال جریان در هر دو مسیر به یک دیگر در انتهای هر طبق با زاویه بیشتر از ۹۰ درجه)، از دست می‌دهد.

موج‌شکن شناور میزانی از انرژی موج ورودی را به وسیله صفحه دیواره مقابل موج‌شکن (پیشانی موج‌شکن) جذب می‌کند، که میزان نیروی وارده به مساحت دیواره پیشانی بستگی دارد. بنابراین با بکارگیری مجرا در بدنه موج‌شکن شناور میزان مساحت دیواره مقابل موج را کاهش و مقداری از انرژی موج به درون مجرا انتقال داده می‌شود. حال اگر در طراحی مجرای درونی از شکل هندسی شیر تسلا استفاده شود، می‌توان میزان انرژی بیشتری از موج ورودی را به وسیله دیواره مجراها و شکل هندسی مجراها کاهش داد، که این عملکرد باعث کاهش انرژی وارد به سازه موج‌شکن شناور و افزایش عملکرد سازه در مقابل موج‌های تابشی با پریودهای بالاتر از ۳ ثانیه می‌شود.

در شکل (۹) پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده در مدلسازی ها و نمایی کلی از یک مجرای الگوبرداری شده از شیر تسلا نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۹): پارامترهای هندسی مدلسازی موج‌شکن‌های شناور مجرادار الف) مجرای مستقیم ب) مجرای تسلا

در این تحقیق به منظور نام گذاری طرح موج‌شکن شناور با مجرای رو باز از کلمه OPEN ، موج‌شکن شناور با مجرای درونی به ارتفاع ۲متر از کلمه CLOSE و برای موج‌شکن شناور با مجرای به ارتفاع ۳/۳ متر از کلمه LONG استفاده شده است که در پایان اسم موج شکن‌های شناور مجرادار مدلسازی شده در این تحقیق برای معرفی نوع آن‌ها، آورده شده است.

مشخصات سیستم مهاربندی در مدلسازی عددی در جدول(۲) و مشخصات نمونه‌های مدلسازی شده در این تحقیق به همراه با نام اختصاری درنظرگرفته شده برای آن‌ها در جدول(۲و۳) آورده شده است.

جدول(۲) مشخصات سیستم مهاربندی در مدلسازی عددی

واحد طول/ جرم	$8.27\ kg/m^3$
سطح مقطع معادل	$0.002\ m^2$
ماکزیمم کشش	10000 N
سختی	5000000 N
قطر معادل	0.02 m
طول کابل	42 m
تعداد کابل برای هر موج‌شکن شناور	4
نوع کابل	nonlinear catenary section

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

جدول(۳): معرفی و پارامترهای ساختاری موج‌شکن‌های شناور مجرادار(مجرا مستقیم)

پارامترهای ساختاری / نوع موج شکن شناور	L	Y	h	volume	mass	a	b	d	c	e	Number
FBW-T9-100-50-OPEN	20m	10m	4m	$708m^3$	$410000kg$	2.75m	1m	10m	2m	0.5m	9
FBW-T9-100-50-CLOSE	20m	10m	4m	$710m^3$	$410000kg$	2.75m	1m	10m	2m	0.5m	9
FBW-T9-100-50-LONG	20m	10m	4m	$651.5m^3$	$410000kg$	2.75m	1m	10m	3/3m	0.5m	9
FBW-T12-100-50-OPEN	20m	10m	4m	$680m^3$	$410000kg$	1.5m	1m	10m	2m	0.5m	12
FBW-T12-100-50-CLOSE	20m	10m	4m	$680m^3$	$410000kg$	1.5m	1m	10m	2	0.5m	12
FBW-T12-100-50-LONG	20m	10m	4m	$602m^3$	$410000kg$	1.5m	1m	10m	2	0.5m	12
FBW-T19-50-50-OPEN	20m	10m	4m	$610m^3$	$410000kg$	0.75m	0.5m	10m	2m	0.5m	19
FBW-T19-50-50-CLOSE	20m	10m	4m	$610m^3$	$410000kg$	0.75m	0.5m	10m	2m	0.5m	19
FBW-T19-50-50-LONG	20m	10m	4m	$486.5m^3$	$410000kg$	0.75m	0.5m	10m	3.3m	0.5m	19
FBW-T9-100-70-CLOSE	20m	10m	4m	$674m^3$	$410000kg$	2.85m	1m	10m	2m	0.7m	9
FBW-T9-100-70-LONG	20m	10m	4m	$592m^3$	$410000kg$	2.85m	1m	10m	3.3m	0.7m	9
FBW-T12-100-70-CLOSE	20m	10m	4m	$632m^3$	$410000kg$	0.3m	1m	10m	2	0.7m	12
FBW-T12-100-70-LONG	20m	10m	4m	$523m^3$	$410000kg$	0.3m	1m	10m	3.3m	0.7m	12
FBW-T9-100-90-CLOSE	20m	10m	4m	$638m^3$	$410000kg$	1.95m	1m	10m	2m	0.9m	9
FBW-T9-100-90-LONG	20m	10m	4m	$533m^3$	$410000kg$	1.95m	1m	10m	3.3m	0.9m	9
FBW-T9-100-100-OPEN	20m	10m	4m	$620m^3$	$410000kg$	1.5m	1m	10m	2m	1m	9
FBW-T9-100-100-CLOSE	20m	10m	4m	$620m^3$	$410000kg$	1.5m	1m	10m	2m	1m	9
FBW-T9-100-100-LONG	20m	10m	4m	$503m^3$	$410000kg$	1.5m	1m	10m	3.3m	1m	9

جدول(۴): جدول پارامترهای طراحی موج‌شکن شناور مجرادار تسلا

FBW-S9-150-50

پارامترهای طراحی موج شکن شناور

L=20m Y=10m h=4m

mass=410000 kg/m^3 Volume=540 m^3 $center\ of\ mass\ X$=0.05 Z=0.07

پارامترهای طراحی مجرا تسلا

$A = 0.7m$ $B = 0.45m$ $a = 62^\circ$ $C = 0.48m$ $b = 115^\circ$ فاصله بین مجرا $= 1.3m$ $D = 0.7m$ $c = 100^\circ$ عدد تعداد مجرا $= 9$ $E = F = 5m$ $d = 97^\circ$ $h = 3.3m$

FBW-S9-130-70

پارامترهای طراحی موج شکن شناور

L=20m Y=10m h=4m

mass=410000 kg/m^3 Volume=540 m^3 $center\ of\ mass\ X$ =0.05 Z=0.07

پارامترهای طراحی مجرا تسلا

$A = 0.5m$ $B = 0.5m$ $a = 57^\circ$ $C = 0.5m$ $b = 104^\circ$ فاصله بین مجرا $= 1.5m$ $D = 0.5m$ $c = 88^\circ$ عدد تعداد مجرا $= 9$ $E = F = 5m$ $d = 113^\circ$ $h = 3.3m$

FBW-S9-110-90

پارامترهای طراحی موج شکن شناور

L=20m Y=10m h=4m

mass=410000 kg/m^3 Volume=540 m^3 $center\ of\ mass\ X$=0.11 Z=0.11

پارامترهای طراحی مجرا تسلا

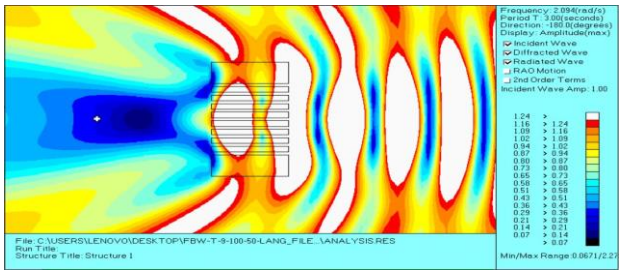
$A = 0.9m$ $B = 0.55m$ $a = 58^\circ$ $C = 0.6m$ $b = 112^\circ$ فاصله بین مجرا $= 1.1m$ $D = 0.9m$ $c = 80^\circ$ عدد تعداد مجرا $= 9$ $E = F = 5m$ $d = 112^\circ$ $h = 3.3m$

۴- بحث و بررسی نتایج

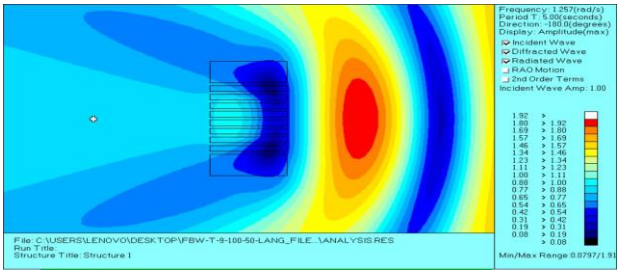
۴-۱- بررسی تاثیر مجاری عرضی بر روی ضریب انتقال موج (C_t)

نمونه از کانتورهای ارتفاع امواج موج‌شکن شناور (FBW-T9-100-50 LONG) در پریود (۳و۵) ثانیه در شکل(۱۰) نمایش داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]



(الف)



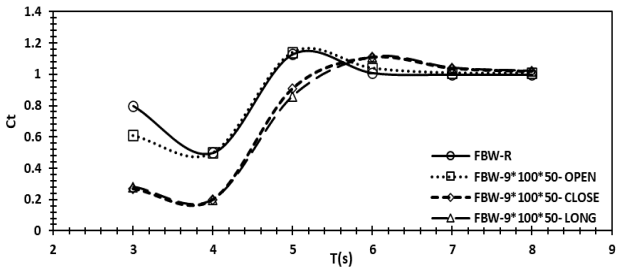
(ب)

شکل(۱۰): نمونه‌ای از کانتورهای ارتفاع موج مدل (FBW-T9-100-50-LONG) درپریود الف)۳ ثانیه، ب)۵ ثانیه

در ادامه ضریب انتقال تمام مدل‌های موج‌شکن شناور دارای مجاری مستقیم و مجاری الگو برداری شده از شیر تسلا در برابر امواج تابشی با ارتفاع امواج ۱ متر و پریود (۳تا۸) ثانیه محاسبه و بر حسب پریود موج بصورت نمودار آورده شده است. از نمودار مدل مبنا (FBW-R) نیز برای انجام مقایسه عملکرد سازه‌های مزبور استفاده شده است که از این طریق می‌توان تاثیر استفاده از مجرا در بدنه موج‌شکن شناور را بررسی کرد.

موج‌شکن شناور FBW-T9-100-50 گونه‌ای از موج‌شکن شناور مجرادار مدلسازی شده می‌باشد که با سه نوع طرح، مدلسازی و در پریود موج‌های (۳تا۸)ثانیه با ارتفاع امواج تابشی ۱ متر آنالیز شده‌اند، که نمونه‌هایی از کانتورهار ارتفاع امواج سازه موج‌شکن شناور نوع مجرا بسته با ارتفاع مجرای بلند (FBW-T9-100-50 LONG) در شکل(۱۰) آورده شده است.

عملکرد موج‌شکن شناور مزبور با بکارگیری مجرای رو باز در زیر بدنه آن، در پریودهای موج (۴تا۸)ثانیه مشابه موج‌شکن شناور مبنا (FBW-R) می‌باشد و فقط در پریود موج ۳ ثانیه کاهش ضریب انتقال موج ۱۹٪ را تجربه می‌کند، که می‌توان در حالت کلی عملکرد آن را مشابه با موج‌شکن شناور مستطیلی (FBW-R) اما با کاهش حجم ۱۱/۵٪ دانست. با بررسی نتایج موج‌شکن شناور FBW-T9-100-50 در مدل‌هایی که مجراهای آن بصورت کانال‌های درونی می‌باشد، مشاهده می‌شود که ارتفاع مجرا تاثیری در ضریب انتقال موج سازه ندارد. در نمایش عملکرد مجراهای درونی، ضریب انتقال موج مدل مجرای درونی بلند (FBW-T9-100-50-LONG) و مدل مجرای درونی کوتاه (FBW-T9-100-50-CLOSE) نسبت به موج‌شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۳،۴،۵)ثانیه بطور میانگین ۴۹/۳ ٪ کاهش و در پریودهای (۶،۷،۸)ثانیه بطور میانگین ۵/۳ ٪ افزایش داشته است. در بررسی کلی، می‌توان بیان کرد که موج‌شکن شناور (FBW-T9-100-50) با مجرای درونی بطور متوسط حدود ۲۲ ٪ باعث بهبود عملکرد نسبت به موج‌شکن شناور مبنا (FBW-R) شده است.

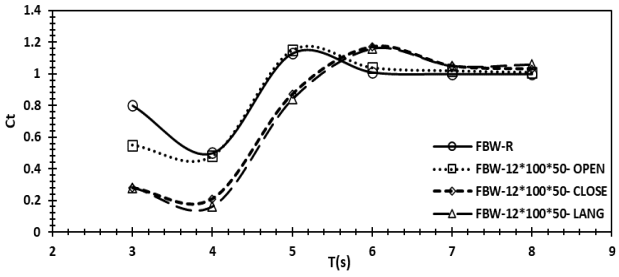


شکل(۱۱): نموداره مقایسه ضریب انتقال موج، موج‌شکن شناور FBW-T9-100-50 و موج‌شکن شناور FBW-R در پریود ۳تا۸ ثانیه

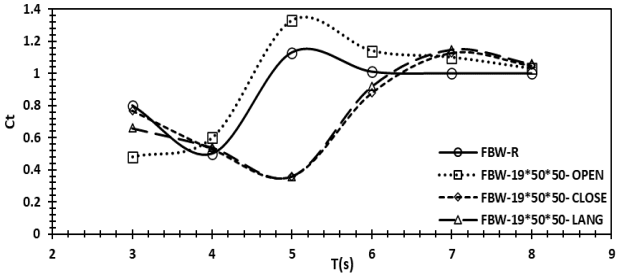
موج‌شکن شناور FBW-T12-100-50 همانطور که در شکل(۱۲) آورده شده است در سه نوع مختلف مدلسازی و در پریود موج (۳تا۸)ثانیه آنالیز شده است و تفاوت آن با موج‌شکن شناور FBW-T9-100-50 در تعداد مجراهای بکار رفته در بدنه موج‌شکن می‌باشد.

عملکرد موج‌شکن شناور مزبور با بکارگیری مجرای باز در زیر بدنه آن، در پریودهای موج (۴ تا ۸) ثانیه مشابه موج‌شکن شناور مبنا(FBW-R) می‌باشد و فقط در پریود موج ۳ ثانیه کاهش ضریب انتقال موج ۲۵٪ را تجربه می‌کند، که می‌توان در حالت کلی عملکرد آن را مشابه با موج شکن شناور مستطیلی (FBW-R) اما با کاهش حجم ۱۵٪ دانست و با بررسی نتایج موج‌شکن شناور در مدل‌هایی که مجراهای آن بصورت کانال‌های درونی می‌باشد، ارتفاع مجرا تاثیر چندانی در ضریب انتقال موج سازه ندارد و با بررسی عملکرد مجراهای درونی، ضریب انتقال موج مدل مجرای درونی بلند (FBW-T12-100-50-LANG) و مدل مجرای درونی کوتاه (FBW-T12-100-50-CLOSE) نسبت به موج‌شکن شناور مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۳،۴،۵)ثانیه بطور میانگین ۵۲/۶ ٪ کاهش و در پریودهای(۶،۷،۸)ثانیه بطور میانگین ۷/۶ ٪ افزایش داشته است. در بررسی کلی می‌توان بیان کرد که موج‌شکن شناور (FBW-T12-100-50) با مجرای درونی بطور متوسط حدود ۲۲/۵ ٪ باعث بهبود عملکرد نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]



شکل(۱۲): نموداره مقایسه ضریب انتقال موج، موج‌شکن شناور FBW-T12-100-50 و موج‌شکن شناور FBW-R در پریود ۳تا۸ ثانیه



شکل(۱۳): نموداره مقایسه ضریب انتقال موج، موج‌شکن شناور FBW-T19-50-50 و موج‌شکن شناور FBW-R در پریود ۳تا۸ ثانیه

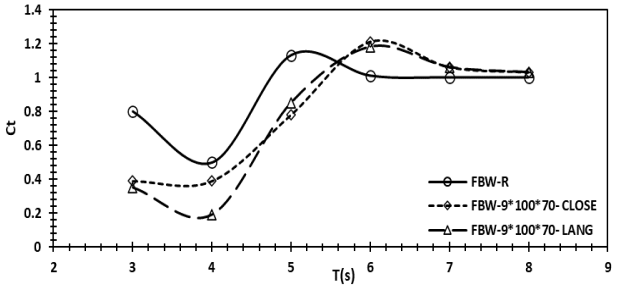
موج‌شکن شناور FBW-T19-50-50 با تعداد ۱۹ مجرا با عرض مجرا ۰/۵ متر و با فاصله بین مجرا ۰/۵ متر طراحی شده است که به نسبت دو موج شکن شناور بیان شده FBW-T9-100-50 و FBW-T12-100-50 تعداد مجرای بیشتری دارد و در مقایسه این سه نوع سازه که از مجرای با عرض ۰/۵ متر برخوردار هستند، تاثیر تعداد مجرا مورد بررسی قرار گرفته است.

سازه مزبور با بکارگیری مجرای باز در زیر بدنه آن، نسبت به موج-شکن شناور مبنا در پریودهای موج (۴ تا ۸) ثانیه ۱۰/۸٪ افزایش یافته و فقط در پریود موج ۳ ثانیه کاهش ضریب انتقال موج ۴۰٪ را تجربه کرده است، که می‌توان در حالت کلی عملکرد آن را ضعیف تر از موج‌شکن شناور مبنا (FBW-R) دانست و با بررسی عملکرد این نوع موج‌شکن شناور در مدل‌هایی که مجراهای آن بصورت کانال‌های درونی می‌باشد، مشاهده شد که ارتفاع مجرا در مجاری با ارتفاع بیشتر از ۲ متر، تاثیری در ضریب انتقال موج سازه ندارد اما با بررسی عملکرد مجراهای درونی، ضریب انتقال موج مدل مجرای درونی با ارتفاع بلند(FBW-T19-50-50-LANG) و مدل مجرای درونی کوتاه (FBW-T19-50-50-CLOSE) نسبت به موج‌شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۳تا ۸)ثانیه به جز پریود ۵ ثانیه، برابر موج‌شکن شناور مبنا و در پریود موج ۵ ثانیه تا میزان ۶۸ ٪ کاهش ضریب انتقال موج را تجربه می-کند. بنابراین می‌توان بیان کرد که موج‌شکن شناور FBW-T19-50-50 با مجاری درونی، عملکردی برابر با موج‌شکن شناور مبنا دارد و در دوره ۵ ثانیه به دلیل بیشترین اختلاف فرکانس حرکتی سازه و موج، عملکرد آن بهبود بخشیده شده است. در بررسی کلی، می‌توان بیان کرد که موج‌شکن شناور (FBW-T19-50-50) با مجرای درونی، نسبت به موج‌شکن شناور مبنا (FBW-R) عملکرد برابری دارد.

موج‌شکن شناور FBW-T9-100-70 در دو مدل مجرای درونی با ارتفاع ۲ متر و مدل مجرای درونی با ارتفاع ۳/۳ متر طراحی و مورد آنالیز قرار گرفته شده است و دلیل عدم بکار گیری مجرای رو باز(open) در زیر سازه مزبور، عملکرد ضعیف این نوع مجرا در طراحی مدل‌های پیشین می‌باشد و سازه موج‌شکن شناور FBW-T9-100-70 در برابر امواجی با ارتفاع ۱متر و پریود موج (۳تا۸) ثانیه مورد آنالیز و بررسی قرار گرفته است.

با بررسی عملکرد موج شکن شناور (FBW-T9-100-70)، ضریب انتقال موج سازه مزبور در مدلی که مجراهای آن بصورت کانال‌های درونی به ارتفاع میزان غوطه‌وری موج‌شکن شناور (۲ متر) می‌باشد، مشاهده شد که ضریب انتقال موج سازه نسبت به موج‌شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۳تا۵) ثانیه بطور میانگین تا میزان ۳۰/۳ ٪ کاهش و در پریود های موج (۶تا۸) ثانیه بطور میانگیر ۹/۲ ٪ افزایش را دارد که بطور متوسط حدود ۱۰/۵۱ ٪ باعث بهبود عملکرد نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) شده است و در بررسی مدل دیگر موج شکن شناور (FBW-T9-100-70) که مجرا های درونی به ارتفاع ۳/۳ متر درون بدنه آن بکار رفته است، مشاهده شد که ضریب انتقال موج سازه نسبت به موج شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریود های موج (۳تا۵)ثانیه بطور میانگین تا میزان ۴۷/۵۶٪ کاهش و در پریود های موج (۶تا۸) ثانیه بطور میانگیر ۸/۲ ٪ افزایش را تجربه کرده است که بطور متوسط حدود ۱۹/۶۵ ٪ باعث بهبود عملکرد نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) شده است. در بررسی کلی می-توان بیان کرد که موج شکن شناور (FBW-T9-100-70) نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) عملکرد بهتری دارد و مشاهده شد در این نوع موج‌شکن شناور، افزایش ارتفاع مجرای درونی تا بیشتر از ارتفاع عمق غوطه‌وری سازه (۲متر) تاثیر مثبت در عملکرد سازه دارد و باعث کاهش ضریب انتقال موج سازه می‌شود.

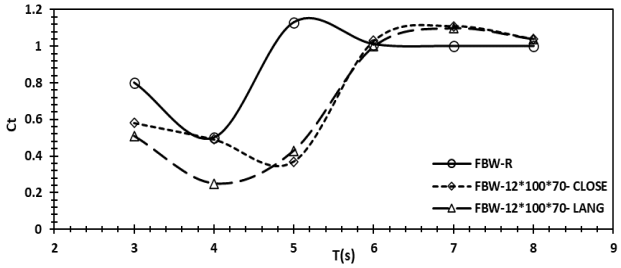
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]



شکل(۱۴): نموداره مقایسه ضریب انتقال موج، موج‌شکن شناور FBW-T9-100-70 و موج‌شکن شناور FBW-R در پریود ۳تا۸ ثانیه

موج‌شکن شناور FBW-T12-100-70 در دو مدل (مجرای درونی با ارتفاع ۲ متر و مجرای درونی با ارتفاع ۳/۳ متر) مدلسازی و آنالیز شده است.

با بررسی عملکرد موج‌شکن شناور (FBW-T12-100-70)، ضریب انتقال موج سازه مزبور در مدلی که مجراهای آن بصورت کانال های درونی به ارتفاع میزان عمق غوطه‌وری موج‌شکن شناور (۲ متر) می‌باشد، مشاهده شد که ضریب انتقال موج سازه نسبت به موج-شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۳تا۵)ثانیه بطور میانگین تا میزان ۳۲/۲ ٪ کاهش و در پریودهای موج (۶تا۸) ثانیه بطور میانگیر ۵/۶ ٪ افزایش دارد که بطور متوسط حدود ۱۳/۳ ٪ باعث بهبود عملکرد نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) شده است و در بررسی مدل دیگر موج‌شکن شناور (FBW-T12-100-70) که مجراهای درونی به ارتفاع ۳/۳ متر درون بدنه آن بکار رفته است، مشاهده شد که ضریب انتقال موج سازه نسبت به موج‌شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۳تا۵) ثانیه بطور میانگین تا میزان ۴۹/۳ ٪ کاهش و در پریودهای موج (۶تا۸) ثانیه بطور میانگیر ۴/۶ ٪ افزایش دارد که بطور متوسط حدود ۲۲/۳۵ ٪ باعث بهبود عملکرد نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) شده است. در بررسی کلی، می-توان بیان کرد که موج‌شکن شناور (FBW-T12-100-70) نسبت به موج‌شکن شناور مبنا(FBW-R) عملکرد بهتری دارد و در این نوع موج‌شکن شناور، افزایش ارتفاع مجرای درونی تا بیشتر از ارتفاع آبخور سازه (۲متر) تاثیر مثبت در عملکرد سازه دارد و باعث کاهش ضریب انتقال موج سازه می‌شود.

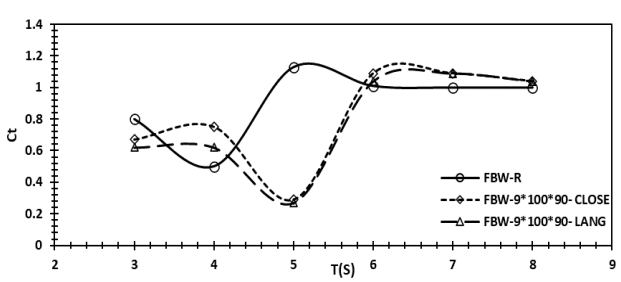


شکل(۱۵): نموداره مقایسه ضریب انتقال موج، موج‌شکن شناور FBW-T12-100-70و موج‌شکن شناور FBW-R در پریود ۳تا۸ ثانیه

مدل FBW-T9-100-90 مربوط به موج‌شکن شناور مستطیلی با ۹ مجرا به عرض ۹۰ سانتی‌متر و فاصله بین مجراهای ۱۰۰ سانتی-متری می‌باشد. که مشخصات سازه‌ای آن در دو مدل (مجرای بسته و مجرای بسته با ارتفاع مجرای بلند) در جدول (۲) بیان و سپس مدلسازی و مورد آنالیز قرار گرفته شده‌اند. شایان ذکر است در مدل های با عرض مجراهای ۹۰ و ۱۰۰ سانتی متر به دلیل تامین نیروی شناوری و تامین شرایط ساخت دیواره مجاری و بدنه موج‌شکن شناور تعداد مجاری مدل سازی شده ۹ عدد می‌باشد.

موج‌شکن شناور FBW-T9-100-90 در دو نوع ارتفاع مجرای ۳/۳ و ۲ متر مدلسازی و توسط امواجی با ارتفاع ۱ متر با پریود (۳تا۸) ثانیه آنالیز شده است.

با بررسی عملکرد موج‌شکن شناور (FBW-T9-100-90)، ضریب انتقال موج سازه مزبور نسبت به موج‌شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۳تا۸) ثانیه عملکردی ضعیف‌تر دارد، اما در پریود موج ۵ ثانیه تا میزان۷۶/۱ ٪ کاهش ضریب انتقال موج را نمایش می‌دهد که احتمال می‌رود به دلیل بیشترین اختلاف بین فرکانس موج و فرکانس سازه باشد .در بررسی کلی، می‌توان بیان کرد که موج‌شکن شناور (FBW-T9-100-90) نسبت به موج‌شکن شناور مبنا (FBW-R) عملکرد بهتری ندارد و مشاهده شد در این نوع موج‌شکن شناور، افزایش ارتفاع مجرای درونی تا بیشتر از ارتفاع آبخور سازه (۲متر) تاثیر مثبت در عملکرد سازه دارد و باعث کاهش ضریب انتقال موج سازه می‌شود.

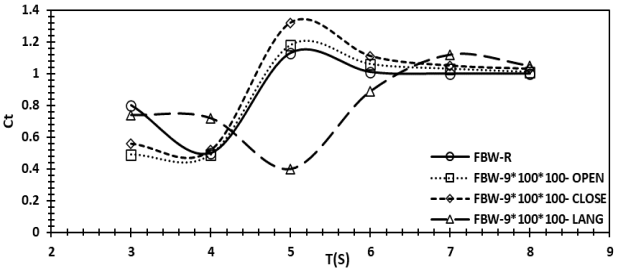


شکل(۱۶): نموداره مقایسه ضریب انتقال موج، موج‌شکن شناور FBW-T9-100-90 و موج‌شکن شناور FBW-R در پریود ۳تا۸ ثانیه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

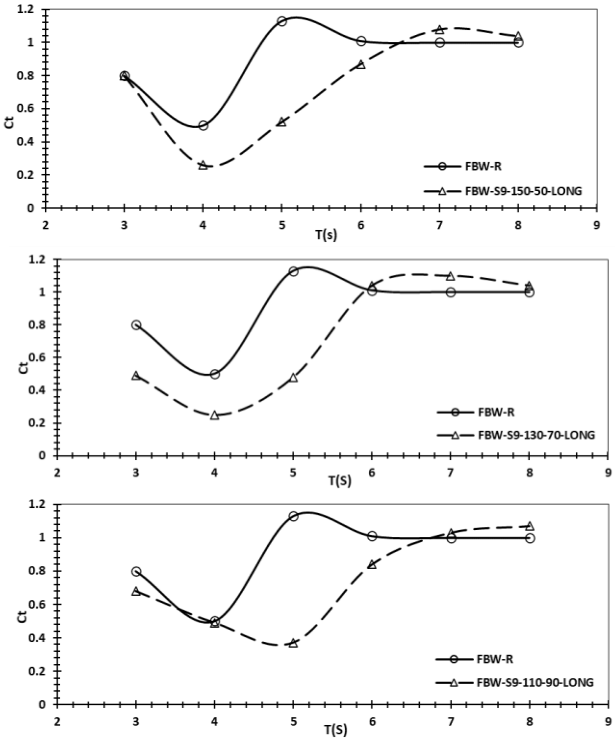
موج‌شکن شناور FBW-T9-100-100 در سه حالت مجرای مختلف طراحی و در پریود امواج (۳تا۸) ثانیه با ارتفاع امواج ۱ متر آنالیز شده اند، که برای بررسی عملکرد سازه‌های مزبور از نمودار ضریب انتقال موج بر حسب پریود موج در شکل (۱۷) بصورت مقایسه شده با عملکرد سازه موج شکن شناور مبنا استفاده شده است

عملکرد موج‌شکن شناور مزبور با بکارگیری مجرای باز در زیر بدنه آن، در پریودهای موج (۴ تا ۸) ثانیه مشابه موج‌شکن شناور مبنا (FBW-R) است و فقط در پریود موج ۳ ثانیه کاهش ضریب انتقال موج ۳۸/۷ ٪ را تجربه می‌کند، که می‌توان در حالت کلی عملکرد آن را مشابه با موج شکن شناور مستطیلی (FBW-R) اما با کاهش حجم ۲۲/۵ ٪ دانست. در بررسی مدل‌های دیگر موج‌شکن شناور (FBW-T9-100-100)، ضریب انتقال موج سازه مزبور در مدل-هایی که مجراهای آن بصورت کانال‌های درونی به ارتفاع میزان آبخور موج‌شکن شناور (۲ متر) می باشد، ضعیف‌تر از موج‌شکن شناور مبنا بوده است و در مدل‌هایی که مجراهای آن بصورت کانال‌های درونی به ارتفاع (۳/۳ متر) می باشد، ضریب انتقال موج سازه نسبت به موج‌شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در همه پریودهای موج جز (۵ و ۶)ثانیه ضعیف تر بوده است و فقط در پریود (۵ و ۶) ثانیه بطور میانگین تا میزان ۳۸/۲ ٪ کاهش را دارد. در بررسی کلی می‌توان بیان کرد که موج‌شکن شناور (FBW-T9-100-100) نسبت به موج‌شکن شناور مبنا (FBW-R) عملکرد ضعیفی دارد و مشاهده شد در این نوع موج‌شکن شناور، افزایش ارتفاع مجرای درونی تا بیشتر از ارتفاع آبخور سازه (۲متر) تاثیری مثبت در عملکرد سازه دارد.



شکل(۱۷): نموداره مقایسه ضریب انتقال موج، موج‌شکن شناور FBW-T9-100-100 و موج‌شکن شناور FBW-R در پریود ۳تا۸ ثانیه

موج‌شکن‌های شناور نوع تسلا در سه حالت مجرای مختلف طراحی و در پریود امواج (۳تا۸) ثانیه با ارتفاع امواج ۱ متر آنالیز شده اند، که برای بررسی عملکرد سازه‌های مزبور از نمودار ضریب انتقال موج بر حسب پریود موج در شکل (۱۸) بصورت مقایسه شده با عملکرد سازه موج شکن شناور مبنا استفاده شده است.



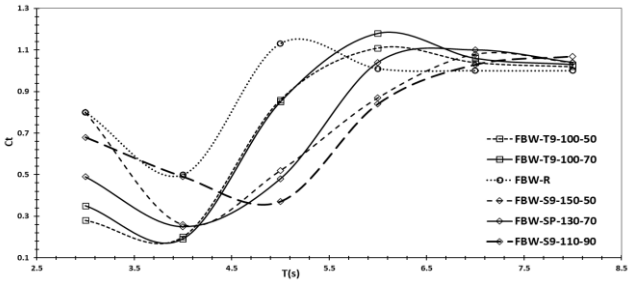
شکل(۱۸): نمودارهای مقایسه عملکرد موج‌شکن‌های شناور مجرادار نوع تسلا با موج‌شکن مبنا

با بررسی عملکرد این نوع سازه مشاهده شد که استفاده از مجاری با طرح هندسی شیر تسلا در بدنه موج‌شکن‌های شناور مستطیلی با جرم و ابعاد برابر، از پریود (۳تا۶) ثانیه باعث بهبود عملکرد این نوع سازه تا حدود ۳۶/۵ ٪ و در پریودهای (۷و۸) ثانیه باعث کاهش عملکرد تا حدود ۵ ٪ می‌شود و ابعاد مجاری بکار رفته در بدنه موج شکن شناور در عملکرد آن تاثیرگذار می‌باشد.

بطور کلی بهترین عملکرد مجرای الگوبرداری شده از شیر تسلا باعث بهبود عملکرد سازه تا حدود ۲۱/۶ ٪ در پریود (۳ تا ۸) ثانیه نسبت به مدل مبنا شده است.

در این بخش به منظور مقایسه عملکرد موج‌شکن شناور مجرادار مدلسازی شده در این تحقیق، نمودار ضریب عبوری موج در برابر پریود موج دو نمونه از موج‌شکن‌های شناور مجرادار با مجاری مستقیم داخلی و سه نمونه از موج‌شکن‌های شناور مجرادار با مجاری الگوبرداری شده از شیر تسلا که در این مدلسازی ها عملکرد مناسبی ارائه داده بودند، در شکل (۱۹) آورده شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]



شکل(۱۹): نمودار مقایسه ضریب انتقال امواج موج‌شکن‌های شناور مجرادار

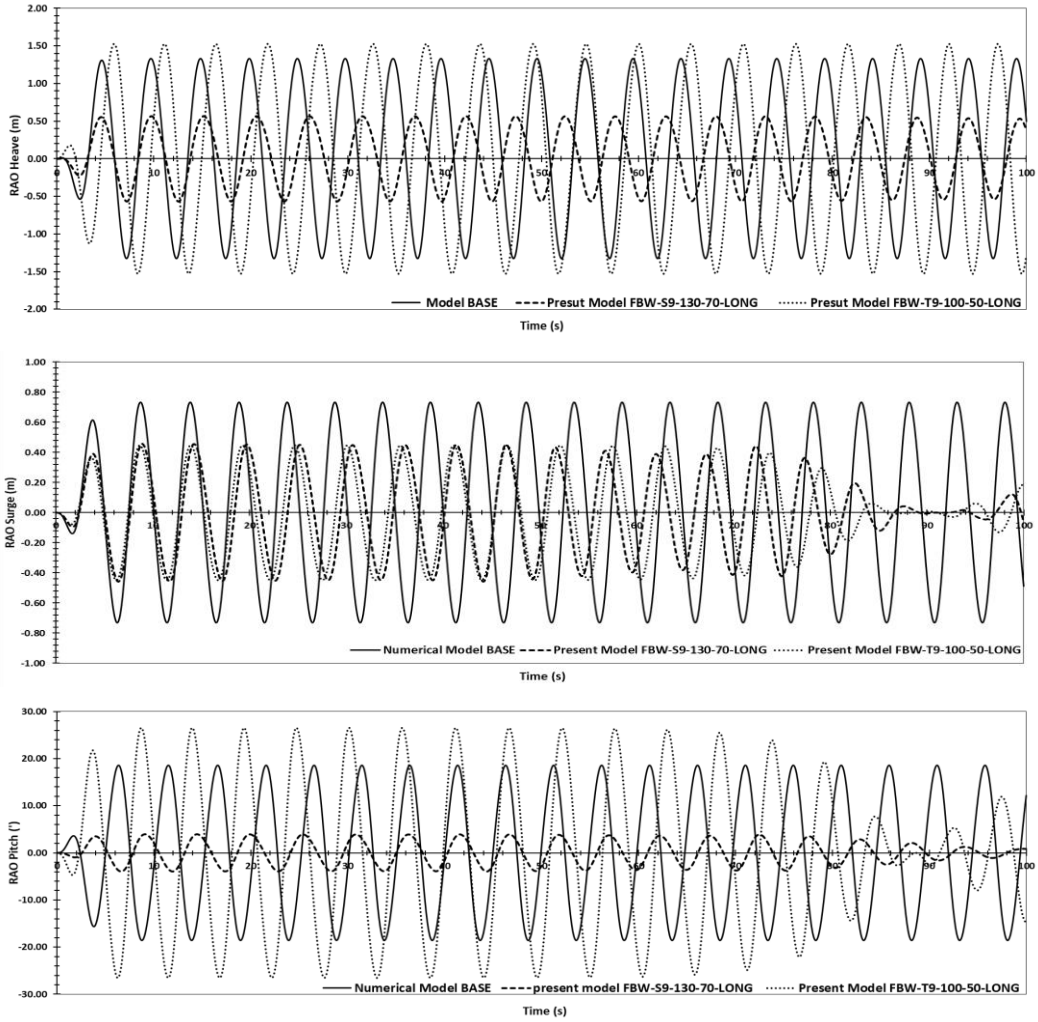
مقایسه نتایج نشان می‌دهد، بهبود عملکرد موج‌شکن‌های شناور مجرادار نسبت به مدل مبنا بطور میانگین در پریود ۳ ثانیه برای نوع FBW-T حدود ۶۰/۶ ٪ افزایش و برای نوع FBW-S حدود ۱۷/۶ ٪ افزایش داشته است، در پریود ۴ ثانیه نوع FBW-T حدود ۶۱ ٪ افزایش و نوع FBW-S حدود ۳۹/۳ ٪ افزایش داشته است، در پریود ۵ ثانیه نوع FBW-T حدود ۲۴/۲ ٪ افزایش و نوع FBW-S حدود ۵۹/۵ ٪ افزایش داشته است، در پریود ۶ ثانیه نوع FBW-T حدود ۱۲/۹ ٪ کاهش و نوع FBW-S حدود ۹/۳ ٪ افزایش داشته است و در پریود ۷ و ۸ ثانیه برای نوع FBW-T حدود ۳/۵ ٪ کاهش و برای نوع FBW-S حدود ۶ ٪ کاهش داشته است.

در حالت کلی می‌توان بیان کرد که موج‌شکن های شناور مجرادار عملکردی بهتر نسبت به موج‌شکن شناور مستطیلی مبنا دارند و با اجرای مجرا در بدنه موج‌شکن شناور مستطیلی می‌توان باعث افزایش راندمان عملکرد آن شد.

بهترین عملکرد مجاری مستقیم در بدنه موج شکن شناور در پریود ۳ تا ۵ ثانیه می‌باشد و بکارگیری مجاری الگوبرداری شده از هندسه شیر تسلا باعث شد که بهترین عملکرد سازه در ضریب انتقال امواج به پریود ۴تا ۶ ثانیه منتقل شود.

۲-۴- بررسی تاثیر مجاری عرضی بر روی عملگرهای دامنه پاسخ

عملگرهای دامنه پاسخ(RAO) سازه‌های مدلسازی شده موج‌شکن های شناور دارای مجاری مستقیم و موج‌شکن‌های شناور دارای مجاری الگوبرداری شده از هندسه شیر تسلا با مجاری با ارتفاع ۳/۳ متر (حالت LONG) به صورت مقایسه ای با عملکرد (RAO) مدل مبنا در شکل (۲۰) نمایش داده شده است.



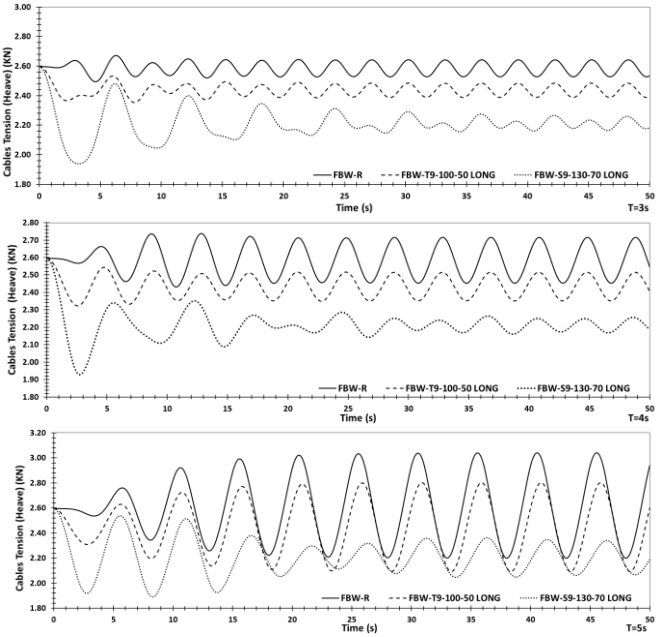
شکل(۲۰): نمودارهای مقایسه عملگرهای دامنه پاسخ موج‌شکن‌های شناور مجرادار با موج‌شکن مبنا

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

نتایج بدست آمده در این بخش نشان می‌دهد که میزان عملکرد RAO سازه موج‌شکن شناور FBW-T9-100-50 LONG در عملگر Heave، ۱۷٪ افزایش در عملگر Surge، ۴۰٪ کاهش و در عملگر pitch ۳۰٪ افزایش را نسبت به عملگرهای مشابه سازه مبنا، دارا می‌باشد.

میزان عملکرد RAO سازه موج شکن شناور FBW-S9-130-70 LONG در عملگر Heave، ۶۰٪ کاهش در عملگر Surge، ۴۰٪ کاهش و در عملگر pitch، ۷۸٪ کاهش را نسبت به عملگرهای مشابه سازه مبنا، نشان می‌دهد.

شکل (۲۱) تنش در کابل مهاری برای موج‌شکن شناور مستطیلی(مدل مرجع) و موج‌شکن‌های شناور مجرادار در پریودهای ۳ تا ۵ ثانیه تحت اثر موج با ارتفاع ۱ متر را نشان می‌دهد. بررسی نتایج این تحقیق نشان می‌هد که از انجائیکه میزان تنش وارد بر موج‌شکن‌های شناور مجرادار در سه حرکت هیدرودینامیکی Heave و Surge و Pitch نسبت به موج شکن شناور مستطیلی کمتر می‌باشد، بنابر این برآیند نیروهای وارد بر کابل‌های مهار توسط موج‌شکن‌های شناور مجرادار نیز کمتر خواهد بود. همچنین در مقایسه عملکرد موج‌شکن‌های شناور مجرادار نیز می‌توان بیان کرد، موج‌شکن شناور مجرادار الگو برداری شده از هندسه شیر تسلا، نسبت به موج‌شکن شناور مجرادار مستقیم، نیروی کمتری به کابل‌های مهار وارد می‌کند.



شکل(۲۱): نمودارهای تنش در کابل مهار موج‌شکن مستطیلی و مجرادار در پریودهای ۳ تا ۵ ثانیه

۵- نتیجه‌گیری

بررسی تاثیر بکارگیری دو نوع مجاری عرضی (با هندسه مستطیلی و هندسه الگوبرداری شده از شیر تسلا) در بدنه موج‌شکن شناور جعبه‌ای بر عملکرد هیدرودینامیکی این نوع موج‌شکن پس از ارزیابی و مدلسازی عددی صورت گرفت که می‌توان به مهمترین این نتایج به شرح زیر اشاره کرد.

۱) بکارگیری مجراهای باز در زیر بدنه موج‌شکن‌های شناور تا تعداد مجرای ۱۲ عدد به ابعاد عرض مجاری (۰/۵و۱) متر عملکردی مشابه با عملکرد موج‌شکن شناور مستطیلی (حالت مبنا) داشته و فقط از نظر کاهش حجم سازه مورد توجه قرار می‌گیرد.

۲) عملکرد موج‌شکن‌های شناور به پارامترهای (تعداد مجاری و عرض مقطع مجاری) وابسته می‌باشد.

۳) افزایش ارتفاع مجاری از مجاری با ارتفاع ۲ متر (ارتفاع برابر با میزان غوطه وری سازه شناور) تا ۳/۳ متر(۸۰٪ ارتفاع سازه)، تاثیر مثبت در عملکرد سازه به نسبت عرض مقطع مجاری و پریود موج تابشی دارد.

۴) بکارگیری مجراهای بسته در بدنه موج‌شکن شناور می‌تواند در دورهای (۳ تا ۵) ثانیه ضریب انتقال سازه را به کمتر از ۰/۴ برساند که بهترین عملکرد برای یک موج‌شکن شناور می‌باشد.

۵) مجراهای بسته مستقیم (مدل T) و مجراهای بسته نوع تسلا (مدل S) در پریود های ۳ تا ۶ ثانیه باعث بهبود عملکرد موج شکن شناور جعبه‌ای تا حدود میانگین ۲۰ درصد می‌شوند.

۶) براساس آنالیزهای انجام شده در این تحقیق در پریود ۵ ثانیه، استفاده از مجاری الگوبرداری شده از هندسه شیر تسلا باعث بهبود عملکرد (RAO) سازه موج‌شکن شناور جعبه‌ای تا حدود ۵۹/۳ درصد می‌شود.

۶- منابع

1) *Jamieson, W. W., Mogridge, G. R., & Boudrias, P. (1970), Improving the efficiency of rectangular caisson floating breakwaters, WIT Transactions on The Built Environment, Vol.9, p.8.*
2) *Williams, A. N., Lee, H. S., & Huang, Z. (2000), Floating pontoon breakwaters, Ocean Engineering, Vol.27, p.221-240.*
3) *Koutandos, E. V., Karambas, T. V., & Koutitas, C. G. (2004), Floating breakwater response to waves action using a Boussinesq model coupled with a 2DV elliptic solver. Journal of waterway,*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]

port, coastal, and ocean engineering, Vol.130(5), P.243-255.

4) *Fousert, M. W., Vrijling, J. K., Molenaar, W. F., van Kessel, J. L. F. (2009), Floating breakwater, theoretical study of a dynamic wave attenuating system. International Coastal Structures, Vol.2, P.339-350.*
5) *Wang, H. Y., & Sun, Z. C. (2010), Experimental study of a porous floating breakwater, Ocean Engineering, Vol.37, P.520-527.*
6) *Forouzandeh, N., Hakimzadeh, H., Aghtouman, P., Khaniki, A. K. (2011), Experimental investigation on effect of draught, mass and sheet height in pontoon floating sheet breakwaters on transmission and reflection coefficients subject to irregular waves, International Journal of Maritime Technology, Vol.7(13): P.17-28. (In Persian)*
7) *He, F., Huang, Z., Law, A. W. K. (2012), Hydrodynamic performance of a rectangular floating breakwater with and without pneumatic chambers: An experimental study, Ocean Engineering, Vol.51, P.16-27.*
8) *Cho, I. H. (2016), Transmission coefficients of a floating rectangular breakwater with porous side plates, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.8, P. 53-65.*
9) *Christensen, E. D., Bingham, H. B., Friis, A. P. S., Larsen, A. K., Jensen, K. L. (2018), An experimental and numerical study of floating breakwaters, Coastal Engineering, Vol.137, P.43-58.*
10) *Ji, C., Cheng, Y., Cui, J., Yuan, Z., Gaidai, O. (2018), Hydrodynamic performance of floating breakwaters in long wave regime: An experimental study, Ocean Engineering, Vol.152, P.154-166*
11) *Yang, Z., Xie, M., Gao, Z., Xu, T., Guo, W., Ji, X., Yuan, C. (2018), Experimental investigation on hydrodynamic effectiveness of a water ballast type floating breakwater, Ocean Engineering, Vol.167, P.77-94.*
12) *Nguyen, H. P., Park, J. C., Han, M., Wang, C. M., Abdussamie, N., Penesis, I., Howe, D, (2021), Representative transmission coefficient for evaluating the wave attenuation performance of 3D floating breakwaters in regular and irregular waves, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.9(4), 10.3390/jmse9040388.*
13) *Guo, J., Zhang, Y., Bian, X., Xu, S. (2021), Hydrodynamic Performance of a Multi-Module Three-Cylinder Floating Breakwater System under the Influence of Reefs: A 3D Experimental Study, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.9(12), 1364.*
14) *Fouladi, M. Q., Badiei, P., Vahdani, S. (2021), A study on full interaction of water waves with moored rectangular floating breakwater by applying 2DV scaled boundary finite element method, Ocean Engineering, Vol.220, 108450.*
15) *Ji, C., Deng, X., Cheng, Y. (2019), An experimental study of double-row floating breakwaters, Journal of Marine Science and Technology, Vol.24(2),P.359-371.*
16) *Rajabi, M., Ghassemi, H, (2021), Hydrodynamic performance improvement of double-row floating breakwaters by changing the cross-sectional geometry, Mathematical Problems in Engineering,*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.8.3]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.89]