

بررسی تاثیر بکارگیری مجرای عرضی در بدنه موج شکن شناور به روش عددی

سامان یوسفی^۱، امین محمودی^{۲*}، سجاد حاجی زاده^۳

^۱ دانشجوی 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

چکیده

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۸/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

کلمات کلیدی:

موج شکن شناور

مجرای عرضی

ضریب انتقال موج

نمودار RAO

موج شکن های شناور جایگزینی مناسب برای موج شکن های موسوم پایه ثابت محسوب می شوند که علاوه بر دارا بودن هدف اصلی حفاظت ساحل در برابر امواج، ارتباط آبی بین دریا و ناحیه حفاظت شده را نیز حفظ می کنند. محققین برای افزایش کارایی و افزایش محدوده عملکرد موج شکن های شناور، تحقیقات بسیاری بر روی پارامترهای تاثیرگذار آن ها انجام داده اند. در این پژوهش نیز به منظور بهبود عملکرد موج شکن شناور مستطیلی، تاثیر بکارگیری مجرای عرضی مستقیم با شکل سطح مقطع مستطیلی و مجرای عرضی با طرح هندسی الگو گرفته از شیر تسلا بر عملکرد موج شکن شناور با استفاده از نرم افزار ANSYS AQWA مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مدل سازی، موج شکن های شناور با ارتفاع ۴ متر و عمق غوطه وری ۲ متر تحت تاثیر امواجی با ارتفاع ۱ متر و در بازه پریودهای موج (۳ تا ۸) ثانیه مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به نسبت مدل موج شکن شناور مستطیلی در پریود (۳ تا ۸) ثانیه، بکارگیری مجرای مستقیم در بدنه ی موج شکن 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 می بخشد.

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

Saman Yousefi¹, 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 ANSYS AQWA 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%.

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 اجرایی شدن در شرایط آب‌های خشن اقیانوسی با پیوندهای طولانی و ارتفاع امواج بلند را ندارد.

در زمینه افزایش کارایی 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]. در سال 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 حالت 2D 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 مؤثرترین 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 سال ۲۰۲۱ 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

در طراحی موج شکن 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 می شود و بنابراین تا حد ممکن از افزایش ضریب انعکاس اجتناب شود.

۳- مدلسازی عددی

در این تحقیق به مدلسازی عددی موج شکن های 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 می توان نیروی وارد بر موج شکن 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 موج شکن های شناور مستطیلی بر عملکرد هیدرودینامیکی آن، از میان نرم افزارهای مختلف مورد استفاده در مهندسی دریا و با توجه به قابلیت های نرم افزار تجاری ANSYS AQWA، با صرف نظر کردن از مدلسازی آشفتگی جریان در اطراف موج شکن شناور، این نرم افزار برای مدلسازی هیدرودینامیک جریان اطراف موج شکن های شناور انتخاب شده است. همچنین به منظور مدلسازی مدل هندسی موج شکن ها از نرم افزار SOLIDWORK استفاده شده است. ماژول AQWA یکی از بخش های تحلیل مهندسی در نرم افزار ANSYS است که برای بررسی اثرات موج، باد و جریان بر سازه های دریایی ثابت و شناور نظیر یدک کش ها، سکوها دریایی، سازه های نیمه شناور، سکوها پایه کششی، کشتی ها، سیستم های تولید انرژی تجدیدپذیر و موج شکن ها به کار می رود.

۳-۱- معادلات حاکم در مدلسازی عددی

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

$$\Phi(\vec{X}, t) = A\varphi(\vec{X})e^{-i\omega t} \quad (3)$$

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

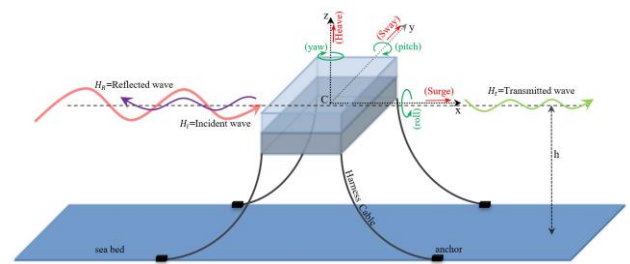
در اینجا، پتانسیل کل (φ_I) را به عنوان جمع سه مولفه موج تابشی، (φ_D) موج تفرق یافته، (φ_R) موج تشعشی می توان فرض نمود که هر سه تابع، در معادله لاپلاس صدق می کنند.

$$\varphi(\vec{X})e^{-i\omega t} = \left[\varphi_I + \varphi_D + \sum_{j=1}^6 \varphi_{Rj} X_j \right] e^{-i\omega t} \quad (4)$$

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

۲- هیدرودینامیک موج شکن های شناور

سازه موج شکن شناور در هنگام مقابله موج، حرکات پیچیده شش درجه آزادی از خود نشان می دهد. این حرکات که در شکل (۱) نشان داده شده است، شامل حرکات افقی در طول محور (X, Z, Y) بدنه و چرخش بدنه حول محورهای (X, Y, Z) بدنه می باشد.



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

عملکرد موج شکن شناور به گونه ای است که بخشی از انرژی موج تابشی پس از برخورد موج با موج شکن شناور، منعکس شده، بخش دیگری از آن مستهلک شده و در نهایت بخشی از آن به پشت موج سازه منتقل می گردد. اندازه گیری ارتفاع موج پشت سازه به منزله سنجش مستقیمی از راندمان موج شکن شناور در کاهش اثر موج است. راندمان و عملکرد موج شکن شناور را معمولاً با ضریبی به نام ضریب انتقال مطرح می کنند. ضریب انتقال، نسبت ارتفاع موج عبوری از موج شکن به موج تابشی می باشد. اگر ارتفاع موج تابشی به موج شکن با H_i ، موج منعکس شده را با H_r و موج عبوری از موج شکن را با H_t نشان داده شود، ضریب انتقال موج سازه موج شکن شناور عبارت است از:

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (1)$$

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

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

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

که j_0 تابع بسل نوع اول می باشد.

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2} \\ r &= \sqrt{R^2 + (z - \zeta)^2} \\ r_2 &= \sqrt{R^2 + (z + \zeta - 2h)^2} \\ v &= \frac{\omega^2}{g} \quad v = k_0 \tanh(k_0 h) \end{aligned} \quad (12)$$

در معادلات فوق ($k = 2\pi/\lambda$) 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 فرد هولم از نوع دوم تعریف می شود.

$$C\varphi(\vec{X}) = \int_{S_0} \left\{ \varphi(\vec{\xi}) \frac{\partial G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega)}{\partial n(\vec{\xi})} - G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega) \frac{\partial \varphi(\vec{\xi})}{\partial n(\vec{\xi})} \right\} ds \quad (13)$$

$$C = \begin{cases} 0 & \vec{X} \in A \cup S_0 \\ 2\pi & \vec{X} \in S_0 \\ 4\pi & \vec{X} \in A \end{cases}$$

پتانسیل سیال تعریف می شود

$$\varphi(\vec{X}) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_b} \sigma(\vec{X}) G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega) ds \quad (14)$$

زمانی که $\vec{X} \in A \cup S_b$

در معادله (14)، استفاده از شرط مرزی سطح جسم که بوسیله معادله (7) داده می شود، مقاومت منبع بر روی سطح متوسط بدنه خیس به صورت زیر تعریف می شود

$$\frac{\partial \varphi(\vec{X})}{\partial n(\vec{X})} = -\frac{1}{2} \sigma(\vec{X}) + \frac{1}{4\pi} \int_{S_d} \sigma(\vec{\xi}) \frac{\partial G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega)}{\partial n(\vec{X})} ds \quad (15)$$

جایی که $\vec{X} \in S_b$

۱-۳- معادله حرکت و RAO

راه حل های بدست آمده برای مسائل تفرق و radiation می تواند به منظور آنالیز پاسخ های دینامیک سیستم سازه ای با معادله حرکت سیستم موج شکن شناور در حوزه های زمان و فرکانس به طور همزمان ترکیب شوند. [۱۶]

در حوزه فرکانس، معادله سازه ای حرکت عبارت است از:

$$[-\omega^2(M_s + M'_a) - i\omega C' + K'_{hys} + K_a][X_{jm}] = [F'_{jm}] \quad (16)$$

M_s و M'_a به ترتیب ماتریس های جرم افزوده کلی و جرم سازه ای کلی می باشند و C' ماتریس دمپینگ هیدرودینامیک می باشد.

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:

$$\nabla^2 \varphi(x, y, z) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

شرط مرزی سطح آزاد خطی S_f در $z = 0$

$$-\omega^2 \varphi + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

شرط مرزی روی سطح جسم (S_b):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega n_j & \text{برای پتانسیل تابشی} \\ -\frac{\partial \varphi}{\partial x} & \text{برای پتانسیل پراش} \end{cases} \quad (7)$$

شرط مرزی بستر دریا (S_z) در $Z = -h$

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

$$|\nabla \varphi| \rightarrow 0 \quad (8)$$

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

$$\nabla^2 G(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \delta(\vec{x}, \vec{\xi}) \quad (9)$$

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

$\delta(\vec{x} - \vec{\xi})$ تابع دیراک می باشد که به صورت زیر بیان می شود:

$$\delta(\vec{x} - \vec{\xi}) = \begin{cases} 0 & \text{زمانی } \vec{x} - \vec{\xi} \neq 0 \\ \infty & \text{زمانی } \vec{x} - \vec{\xi} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

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

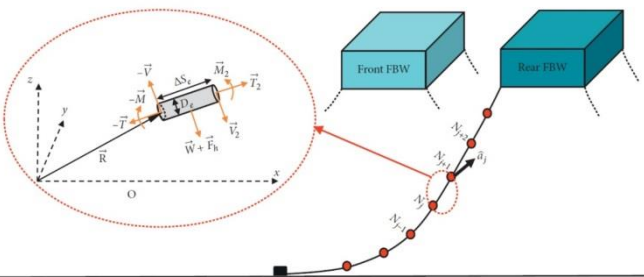
$$\begin{aligned} G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega) &= \frac{1}{r} + \frac{1}{r_2} \\ &+ \int_0^\infty \frac{2(k+v)e^{-kh} \cosh[k(z+h)] \cosh[k(\zeta+h)]}{k \sinh(kh) - v \cosh(kh)} j_0(kR) dk \\ &= i2\pi \frac{(k_0+v)e^{-k_0h} \cosh[k_0(z+h)] \cosh[k_0(\zeta+h)]}{\sinh(k_0h) + k_0h \cosh(k_0h) - v h \sinh(k_0h)} j_0(k_0R) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\{m' + A_{\infty}\} \ddot{X}(t) = F^{(1)}(t) + F^{(2)}(t) + F_t(t) - C\dot{X}(t) - KX(t) - \int_0^t h(t-\tau) \ddot{X}(\tau) d\tau \quad (21)$$

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 در نظر 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 در نظر 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 المان‌های کابل (سیستم مهاری) [۱۶]

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

$$\frac{\partial \vec{T}}{\partial s_e} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial s_e} + \vec{\omega} + \vec{F}_h = m \frac{\partial^2 \vec{R}}{\partial t^2}, \quad (22)$$

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial s_e} + \frac{\partial \vec{R}}{\partial s_e} * \vec{V} = -\vec{q} \quad (23)$$

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

K_a و K'_{hys} به ترتیب ماتریس‌های سختی سازه‌ای اضافی و سختی‌های هیدرواستاتیک اضافه می‌باشند و F'_{jm} بیانگر نیروهای فرود-کريلوف 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:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (17)$$

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:

$$\{M_s + A_{\infty}\} \ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) + \int R(t-\tau) \dot{X}(\tau) d\tau = F(t) \quad (18)$$

که A_{∞} ماتریس جرم افزوده در فرکانس نامحدودی می‌باشد و C ماتریس دمپینگ بوده و در بردارنده 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:

$$\{M_s + A_{\infty}\} \ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) + \int h(t-\tau) \ddot{X}(\tau) d\tau = F(t) \quad (19)$$

ماتریس تابع ضربه شتاب می‌تواند بصورت زیر تعیین شود:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \{A(\omega) - A_{\infty}\} \cos(\omega t) d\omega \quad (20)$$

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:

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

ممان خمشی و کشش که مرتبط با سختی های خمشی و سختی های محوری جنس کابل بوده، به صورت زیر تعریف می شوند:

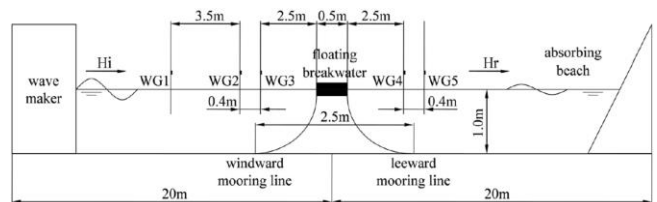
$$M'' = EI \frac{\partial \bar{R}}{\partial S_e} \times \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial S_e^2} \quad (23)$$

$$T'' = EA\varepsilon$$

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 می باشد.

۲-۳- صحت سنجی مدل عددی

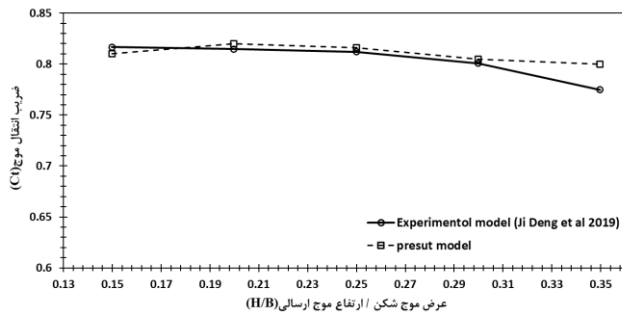
به منظور صحت سنجی مدل عددی در بررسی عملکرد موج شکن های شناور از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط Ji.Deng و همکاران در سال (۲۰۱۹) [۱۵] استفاده شده است. در این تحقیق یک موج شکن شناور مستطیلی به طول ۰/۷۶ متر، به عرض ۰/۵ متر و به ارتفاع ۰/۲ متر و عمق آبخور ۰/۱ متر در یک فلوم به طول ۴۰ متر، عرض ۰/۸ متر و عمق ۱/۴ متر تحت امواج منظمی به ارتفاع (۰/۱۷، ۰/۱۵، ۰/۱۲، ۰/۱، ۰/۰۸) 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]

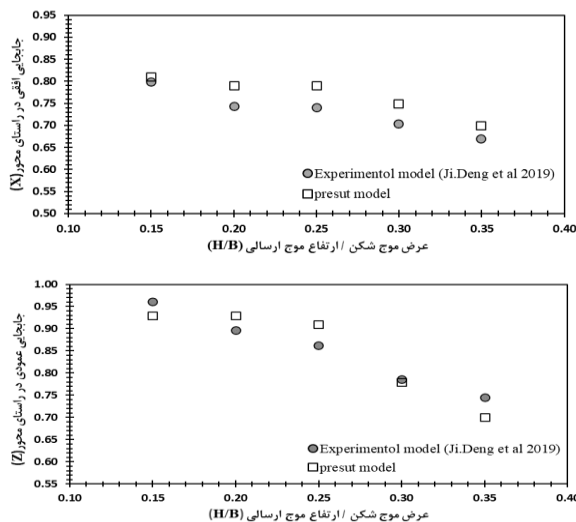
مدل تکی مقاله مزبور [۱۵] در نرم افزار ANSYS AQWA برحسب پارامترهای سازه ای و شرایط مرزی و اولیه، مدلسازی و در برابر امواجی با ارتفاع (۰/۱۷، ۰/۱۵، ۰/۱۲، ۰/۱، ۰/۰۸) متر و پریود ۱/۱ ثانیه آنالیز شده است.

عملکرد موج شکن شناور با استفاده از ضریب انتقال موج (C_t) مورد ارزیابی قرار می گیرد. 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، ۰/۰۸) 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 می شود، نتایج عددی و اندازه گیری های آزمایشگاهی از تطابق نسبتاً مناسبی برخوردار می باشد. 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 ارتفاع های (۰/۱۷، ۰/۱۵، ۰/۱۲، ۰/۱، ۰/۰۸) متر و با پریود ۱/۱ ثانیه ارائه شده است.



شکل (۵): نمودار عملکردهای 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:

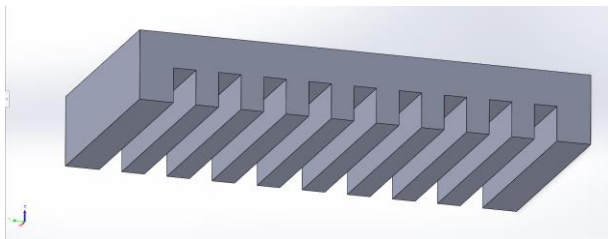
$$A_r = \left(\frac{\sum_i (Var_i^{num})^2}{\sum_j (Var_i^{exp})^2} \right)^{1/2} \quad (25)$$

$$P_d = \left(\frac{\sum_i (Var_i^{num} - Var_i^{exp})^2}{\sum_j (Var_i^{exp})^2} \right)^{1/2} \quad (26)$$

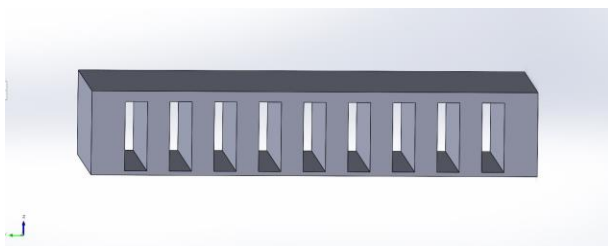
$$RMSE = \left(\frac{\sum_i (Var_i^{num} - Var_i^{exp})^2}{N} \right)^{1/2} \quad (27)$$

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 طرح‌های موج‌شکن شناور مجرادرار و موج‌شکن شناور مستطیلی (مدل مبنا) در نرم‌افزار SOLIDWORK بر اساس ابعاد و جرم مشخص شده، مدل‌سازی و پارامترهای سازه‌ای آن (شامل ممان اینرسی، چگالی، مرکز جرم) از نرم‌افزار استخراج شد. سپس مدل‌های هندسی طراحی شده در نرم‌افزار SOLIDWORK در نرم‌افزار ANSYS AQWA فراخوانی شده و تحت امواج منظم با ارتفاع ۱ متر و پریودهای (۸ تا ۳) ثانیه با بکارگیری تئوری موج استوکس مرتبه دوم و شرایط مرزی و اولیه مبنا، مورد آنالیز قرار گرفتند. در شکل (۷) نمایی از موج‌شکن‌های شناور مستطیلی مجرادرار نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

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

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

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 ($A_r \rightarrow 1$)، 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 ($P_d \rightarrow 0$). جدول (۱) مقادیر A_r ، P_d و $RMSE$ حاصل برای نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

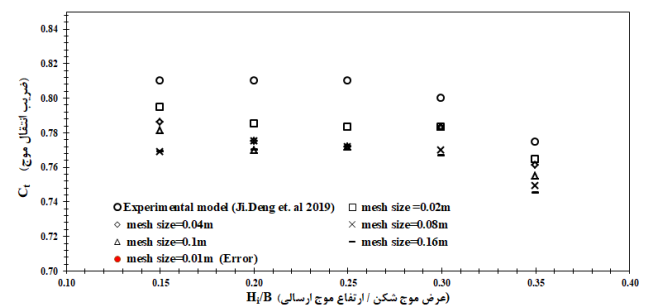
جدول (۱): مقایسه مقادیر A_r ، P_d و $RMSE$ برای نتایج مدل عددی

حاضر با نتایج آزمایشگاهی [۱۵]

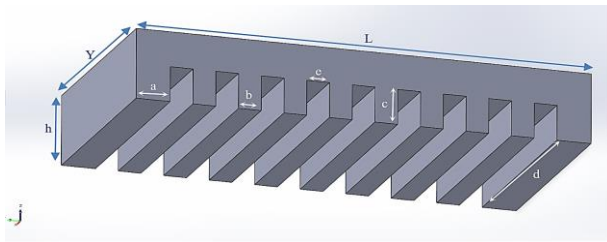
	A_r	P_d	$RMSE$
C_t	۱/۰۰۷	۰/۰۲۳	۰/۰۰۸
RAO Heave	۱/۰۰۶	۰/۰۴۲	۰/۰۳۶
RAO Surge	۱/۰۵۲	۰/۰۵۶	۰/۰۴۱

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

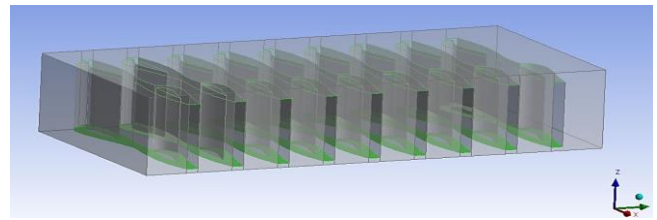
به منظور بررسی تاثیر ابعاد مش‌بندی بر نتایج مدل‌سازی و استقلال نتایج مدل‌سازی از مش‌بندی، صحت سنجی با اندازه‌های مش‌های (۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۸، ۰/۱، ۰/۱۶، ۰/۲) متر انجام شد. نتایج این مدل‌سازی‌ها برای ضریب انتقال موج و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که از روی این 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.



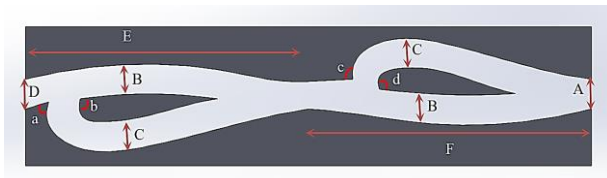
شکل (۶): مقایسه ضریب عبور موج در مدل‌سازی عددی با اندازه‌های متفاوت با نتایج آزمایشگاهی [۱۵]



(الف)



شکل (۸): نمای کلی از موج شکن شناور با مجرای الگوبرداری شده از هندسه شیر تسلا



(ب)

شکل (۹): پارامترهای هندسی مدلسازی موج شکن های شناور مجرادر (الف) مجرای مستقیم (ب) مجرای تسلا

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

مشخصات سیستم مهاربندی در مدلسازی عددی در جدول (۲) و مشخصات نمونه های مدلسازی شده در این تحقیق به همراه با نام اختصاری در نظر گرفته شده برای آن ها در جدول (۳ و ۲) 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 موج شکن شناور	4
نوع کابل	nonlinear catenary section

شیر تسلا در جهت معکوس باعث ایجاد یک مقاومت درونی در برابر حرکت سیال می شود، که این مقاومت درونی اول به دلیل طولانی تر 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 می دهد. موج شکن شناور میزانی از انرژی موج ورودی را به وسیله صفحه دیواره مقابل موج شکن (پیشانی موج شکن) جذب می کند، که میزان نیروی وارده به مساحت دیواره پیشانی بستگی دارد. بنابراین با بکارگیری مجرا در بدنه موج شکن شناور میزان مساحت دیواره مقابل موج را کاهش و مقداری از انرژی موج به درون مجرا انتقال داده می شود. حال اگر در طراحی مجرای درونی از شکل هندسی شیر تسلا استفاده شود، می توان 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 موج شکن شناور و افزایش عملکرد سازه در مقابل موج های تابشی با پریودهای بالاتر از ۳ ثانیه می شود.

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.

جدول (۳): معرفی و پارامترهای ساختاری موج شکن های شناور مجرادار (مجرا مستقیم)

پارامترهای ساختاری	L	Y	h	volume	mass	a	b	d	c	e	Number
نوع موج شکن شناور											
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 موج شکن شناور مجرادار تسلا

FBW-S9-150-50											
پارامترهای طراحی موج شکن شناور											
mass=410000 kg / m^3		Volume=540 m^3		L=20m		Y=10m		h=4m		center of mass X=0.05 Z=0.07	
پارامترهای طراحی موج شکن تسلا											
A = 0.7m		B = 0.45m		C = 0.48m		D = 0.7m		E = F = 5m		h = 3.3m	
		a = 62°		b = 115°		c = 100°		d = 97°			
				عدد9 = تعداد مجرا		فاصله بین مجرا = 1.3m					
FBW-S9-130-70											
پارامترهای طراحی موج شکن شناور											
mass=410000 kg / m^3		Volume=540 m^3		L=20m		Y=10m		h=4m		center of mass X=0.05 Z=0.07	
پارامترهای طراحی موج شکن تسلا											
A = 0.5m		B = 0.5m		C = 0.5m		D = 0.5m		E = F = 5m		h = 3.3m	
		a = 57°		b = 104°		c = 88°		d = 113°			
				عدد9 = تعداد مجرا		فاصله بین مجرا = 1.5m					
FBW-S9-110-90											
پارامترهای طراحی موج شکن شناور											
mass=410000 kg / m^3		Volume=540 m^3		L=20m		Y=10m		h=4m		center of mass X=0.11 Z=0.11	
پارامترهای طراحی موج شکن تسلا											
A = 0.9m		B = 0.55m		C = 0.6m		D = 0.9m		E = F = 5m		h = 3.3m	
		a = 58°		b = 112°		c = 80°		d = 112°			
				عدد9 = تعداد مجرا		فاصله بین مجرا = 1.1m					

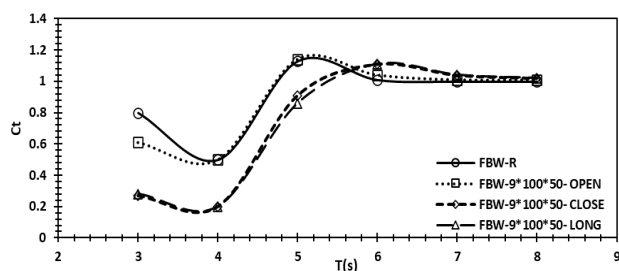
نمونه از کانتورهای ارتفاع امواج موج شکن شناور (FBW-T9-100-)

50 LONG) در پریود (۳و۵) ثانیه در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.

۴- بحث و بررسی نتایج

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

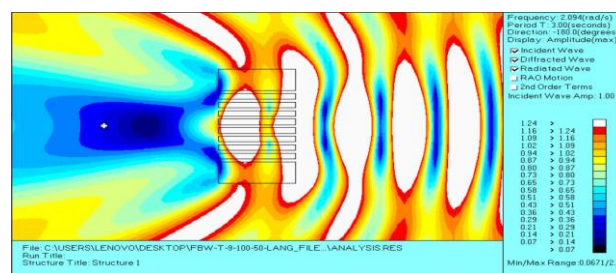
(CLOSE) نسبت به موج شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۳،۴،۵) ثانیه بطور میانگین ۴۹/۳٪ کاهش و در پریودهای (۶،۷،۸) ثانیه بطور میانگین ۵/۳٪ افزایش داشته است. در بررسی کلی، می توان بیان کرد که موج شکن شناور (FBW-T9-100-50) با مجرای درونی بطور متوسط حدود ۲۲٪ باعث بهبود عملکرد نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) شده است.



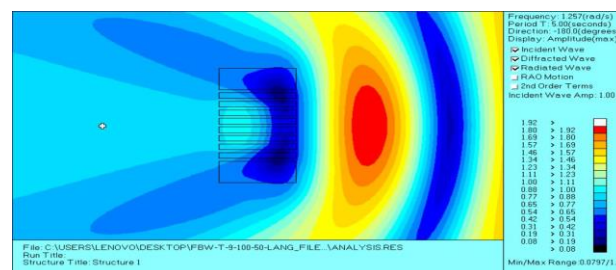
شکل (۱۱): نمودار مقایسه ضریب انتقال موج، موج شکن شناور FBW-T9-100-50 و موج شکن شناور FBW-R در پریود ۳ تا ۸ ثانیه

موج شکن شناور FBW-T12-100-50 همانطور که در شکل (۱۲) آورده شده است در سه نوع مختلف مدلسازی و در پریود موج (۳ تا ۸) ثانیه آنالیز شده است و تفاوت آن با موج شکن شناور FBW-T9-100-50 در تعداد مجراهای بکار رفته در بدنه موج شکن می-باشد.

عملکرد موج شکن شناور مزبور با بکارگیری مجرای باز در زیر بدنه آن، در پریودهای موج (۴ تا ۸) ثانیه مشابه موج شکن شناور مبنا (FBW-R) می باشد و فقط در پریود موج ۳ ثانیه کاهش ضریب انتقال موج ۲۵٪ را تجربه می کند، که می توان در حالت کلی عملکرد آن را مشابه با موج شکن شناور مستطیلی (FBW-R) اما با کاهش حجم ۱۵٪ دانست و با بررسی نتایج موج شکن شناور در مدل هایی که مجراهای آن بصورت کانال های درونی می باشد، 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-LONG) و مدل مجرای درونی کوتاه (FBW-T12-100-50-CLOSE) نسبت به موج شکن 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 می توان بیان کرد که موج شکن 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.



(الف)



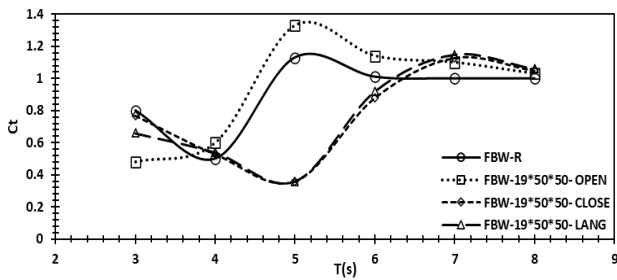
(ب)

شکل (۱۰): نمونه ای از کانتورهای ارتفاع موج مدل (FBW-T9-100-50-LONG) در پریود الف) ۳ ثانیه، ب) ۵ ثانیه

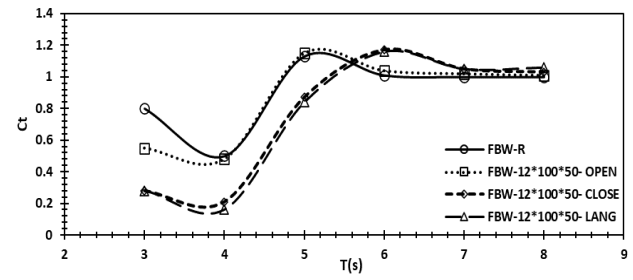
در ادامه ضریب انتقال تمام مدل های موج شکن شناور دارای مجرای مستقیم و مجاری الگو برداری شده از شیر تسلا در برابر امواج تابشی با ارتفاع امواج ۱ متر و پریود (۳ تا ۸) ثانیه محاسبه و بر حسب پریود موج بصورت نمودار آورده شده است. از نمودار مدل مبنا (FBW-R) نیز برای انجام مقایسه عملکرد سازه های مزبور استفاده شده است که از این طریق می توان تاثیر استفاده از مجرا در بدنه موج شکن شناور را بررسی کرد.

موج شکن شناور FBW-T9-100-50 گونه ای از موج شکن شناور مجردار مدلسازی شده می باشد که با سه نوع طرح، مدلسازی و در پریود موج های (۳ تا ۸) ثانیه با ارتفاع امواج تابشی ۱ متر آنالیز شده- اند، که نمونه هایی از کانتورها ارتفاع امواج سازه موج شکن شناور نوع مجرا بسته با ارتفاع مجرای بلند (FBW-T9-100-50-LONG) در شکل (۱۰) آورده شده است.

عملکرد موج شکن شناور مزبور با بکارگیری مجرای رو باز در زیر بدنه آن، در پریودهای موج (۴ تا ۸) ثانیه مشابه موج شکن شناور مبنا (FBW-R) می باشد و فقط در پریود موج ۳ ثانیه کاهش ضریب انتقال موج ۱۹٪ را تجربه می کند، که می توان در حالت کلی عملکرد آن را مشابه با موج شکن شناور مستطیلی (FBW-R) اما با کاهش حجم ۱۱/۵٪ دانست. با بررسی نتایج موج شکن شناور FBW-T9-100-50 در مدل هایی که مجراهای آن بصورت کانال- های درونی می باشد، مشاهده می شود 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 موج شکن 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 می توان بیان کرد که موج شکن 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.



شکل (۱۳): نموداره مقایسه ضریب انتقال موج، موج شکن شناور FBW-T19-50-50 و موج شکن شناور FBW-R در پرپود ۸ تا ۳ ثانیه



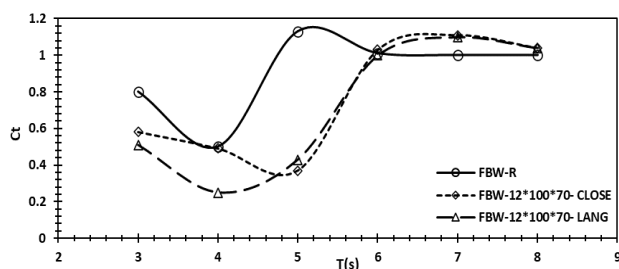
شکل (۱۴): نموداره مقایسه ضریب انتقال موج، موج شکن شناور FBW-T12-100-50 و موج شکن شناور FBW-R در پرپود ۸ تا ۳ ثانیه

موج شکن 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 بکارگیری مجرای رو باز (open) در زیر سازه مزبور، عملکرد ضعیف این نوع مجرا در طراحی مدل های پیشین می باشد و سازه موج شکن شناور FBW-T9-100-70 در برابر امواجی با ارتفاع ۱ متر و پرپود موج (۸ تا ۳) ثانیه مورد آنالیز و بررسی قرار گرفته است.

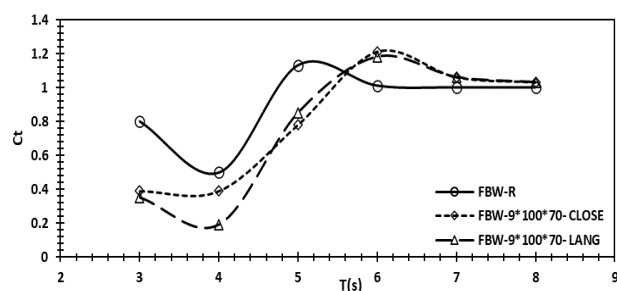
با بررسی عملکرد موج شکن شناور (FBW-T9-100-70)، ضریب انتقال موج سازه مزبور در مدلی که مجراهای آن بصورت کانال های درونی به ارتفاع میزان غوطه وری موج شکن شناور (۲ متر) می باشد، مشاهده شد که ضریب انتقال موج سازه نسبت به موج شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پرپودهای موج (۵ تا ۳) ثانیه بطور میانگین تا میزان ۳۰/۳٪ کاهش و در پرپودهای موج (۸ تا ۶) ثانیه بطور میانگین 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 مجراهای 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 پرپودهای موج (۵ تا ۳) ثانیه بطور میانگین تا میزان ۴۷/۵۶٪ کاهش و در پرپودهای موج (۸ تا ۶) ثانیه بطور میانگین 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 موج شکن شناور، افزایش ارتفاع مجرای درونی تا بیشتر از ارتفاع عمق غوطه وری سازه (۲ متر) تاثیر مثبت در عملکرد سازه دارد و باعث کاهش ضریب انتقال موج سازه می شود.

موج شکن 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 پرپودهای موج (۴ تا ۸) ثانیه ۱۰/۸٪ افزایش یافته و فقط در پرپود موج ۳ ثانیه کاهش ضریب انتقال موج ۴۰٪ را تجربه کرده است، که می توان در حالت کلی عملکرد آن را ضعیف تر از موج شکن شناور مبنا (FBW-R) دانست و با بررسی عملکرد این نوع موج شکن شناور در مدل هایی که مجراهای آن بصورت کانال های درونی می باشد، 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 موج شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پرپودهای موج (۳ تا ۸) ثانیه به جز پرپود ۵ ثانیه، برابر موج شکن شناور مبنا و در پرپود موج ۵ ثانیه تا میزان ۶۸٪ کاهش ضریب انتقال موج را تجربه می کند. بنابراین می توان بیان کرد که موج شکن شناور FBW-T19-50-50 با مجاری درونی، عملکردی برابر با موج شکن 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، می توان بیان کرد که موج شکن شناور (FBW-T19-50-50) با مجرای درونی، نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) عملکرد برابری دارد.



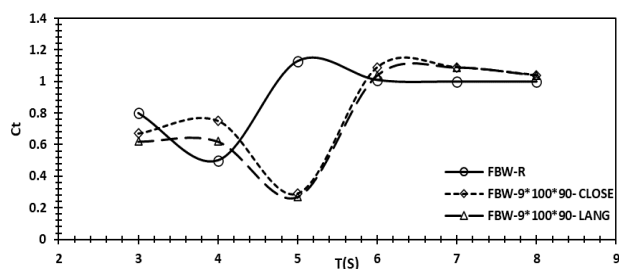
شکل (۱۵): نمودار مقایسه ضریب انتقال موج، موج شکن شناور FBW-T12-100-70 و موج شکن شناور FBW-R در پریود ۸ تا ۳ ثانیه



شکل (۱۴): نمودار مقایسه ضریب انتقال موج، موج شکن شناور FBW-T9-100-70 و موج شکن شناور FBW-R در پریود ۸ تا ۳ ثانیه

مدل FBW-T9-100-90 مربوط به موج شکن شناور مستطیلی با ۹ مجرا به عرض ۹۰ سانتی متر و فاصله بین مجراهای ۱۰۰ سانتی-متری می باشد. که مشخصات سازه های آن در دو مدل (مجرای بسته و مجرای بسته با ارتفاع مجرای بلند) در جدول (۲) بیان و سپس مدل سازی و مورد آنالیز قرار گرفته شده اند. 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 موج شکن شناور تعداد مجاری مدل سازی شده ۹ عدد می باشد. موج شکن شناور FBW-T9-100-90 در دو نوع ارتفاع مجرای ۳/۳ و ۲ متر مدل سازی و توسط امواجی با ارتفاع ۱ متر با پریود (۸ تا ۳) ثانیه آنالیز شده است.

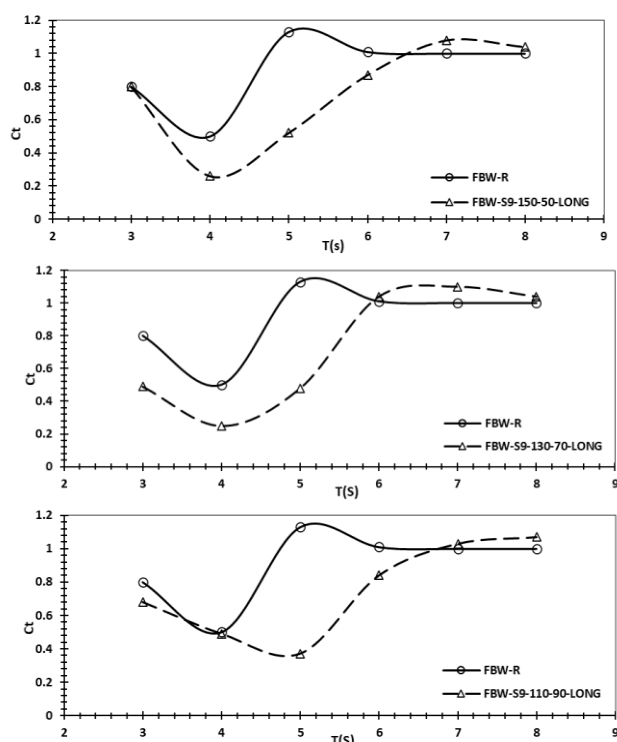
با بررسی عملکرد موج شکن شناور (FBW-T9-100-90)، ضریب انتقال موج سازه مزبور نسبت به موج شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۸ تا ۳) ثانیه عملکردی ضعیف تر دارد، اما در پریود موج ۵ ثانیه تا میزان ۷۶/۱٪ کاهش ضریب انتقال موج را نمایش می دهد که احتمال می رود به دلیل بیشترین اختلاف بین فرکانس موج و فرکانس سازه باشد. در بررسی کلی، می توان بیان کرد که موج شکن شناور (FBW-T9-100-90) نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) عملکرد بهتری ندارد و مشاهده شد در این نوع موج شکن شناور، افزایش ارتفاع مجرای درونی تا بیشتر از ارتفاع آبخور سازه (۲ متر) تاثیر مثبت در عملکرد سازه دارد و باعث کاهش ضریب انتقال موج سازه می شود.



شکل (۱۶): نمودار مقایسه ضریب انتقال موج، موج شکن شناور FBW-T9-100-90 و موج شکن شناور FBW-R در پریود ۸ تا ۳ ثانیه

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

با بررسی عملکرد موج شکن شناور (FBW-T12-100-70)، ضریب انتقال موج سازه مزبور در مدلی که مجراهای آن بصورت کانال های درونی به ارتفاع میزان عمق غوطه وری موج شکن شناور (۲ متر) می باشد، مشاهده شد که ضریب انتقال موج سازه نسبت به موج شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۵ تا ۳) ثانیه بطور میانگین تا میزان ۳۲/۲٪ کاهش و در پریودهای موج (۸ تا ۶) ثانیه بطور میانگین 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 موج شکن 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 موج شکن شناور مستطیلی مبنا (FBW-R) در پریودهای موج (۵ تا ۳) ثانیه بطور میانگین تا میزان ۴۹/۳٪ کاهش و در پریودهای موج (۸ تا ۶) ثانیه بطور میانگین 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 موج شکن شناور (FBW-T12-100-70) نسبت به موج شکن شناور مبنا (FBW-R) عملکرد بهتری دارد و در این نوع موج شکن شناور، افزایش ارتفاع مجرای درونی تا بیشتر از ارتفاع آبخور سازه (۲ متر) تاثیر مثبت در عملکرد سازه دارد و باعث کاهش ضریب انتقال موج سازه می شود.



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

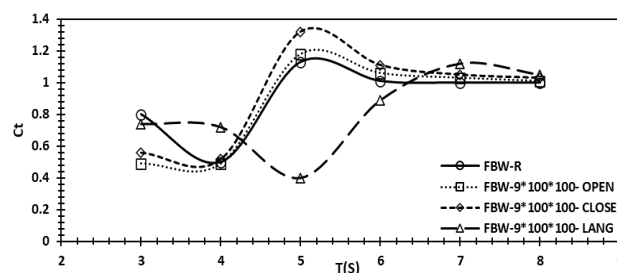
با بررسی عملکرد این نوع سازه مشاهده شد که استفاده از مجاری با طرح هندسی شیر تسلا در بدنه موج‌شکن‌های شناور مستطیلی با جرم و ابعاد برابر، از پریود (۳ تا ۶) ثانیه باعث بهبود عملکرد این نوع سازه تا حدود ۳۶/۵٪ و در پریودهای (۷ و ۸) ثانیه باعث کاهش عملکرد تا حدود ۵٪ می‌شود و ابعاد مجاری بکار رفته در بدنه 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 مینا 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 مدلسازی‌ها عملکرد مناسبی ارائه داده بودند، در شکل (۱۹) آورده شده‌اند.

موج‌شکن شناور FBW-T9-100-100 در سه حالت مجرای مختلف طراحی و در پریود امواج (۳ تا ۸) ثانیه با ارتفاع امواج ۱ متر آنالیز شده‌اند، 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 مینا 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 مینا (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 مدل‌هایی که مجراهای آن بصورت کانال‌های درونی به ارتفاع میزان آبخور موج‌شکن شناور (۲ متر) می‌باشد، ضعیف‌تر از موج‌شکن شناور مینا بوده است و در مدل‌هایی که مجراهای آن بصورت کانال‌های درونی به ارتفاع (۳/۳ متر) می‌باشد، ضریب انتقال موج سازه نسبت به موج‌شکن شناور مستطیلی مینا (FBW-R) در همه پریودهای موج جز (۵ و ۶) ثانیه ضعیف‌تر 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 مینا (FBW-R) عملکرد ضعیفی دارد و مشاهده شد در این نوع موج‌شکن شناور، افزایش ارتفاع مجرای درونی تا بیشتر از ارتفاع آبخور سازه (۲ متر) تاثیری مثبت در عملکرد سازه دارد.



شکل (۱۷): نمودار مقایسه ضریب انتقال موج، موج‌شکن شناور
FBW-T9-100-100 و موج‌شکن شناور FBW-R در پریود ۳ تا ۸ ثانیه

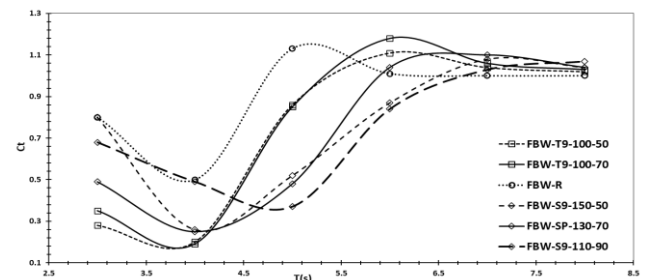
موج‌شکن‌های شناور نوع تسلا در سه حالت مجرای مختلف طراحی و در پریود امواج (۳ تا ۸) ثانیه با ارتفاع امواج ۱ متر آنالیز شده‌اند، که برای بررسی عملکرد سازه‌های مزبور از نمودار ضریب انتقال موج بر حسب پریود موج در شکل (۱۸) بصورت مقایسه شده با عملکرد سازه موج شکن شناور مینا استفاده شده است.

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 می توان بیان کرد که موج شکن های شناور مجرادر عملکردی بهتر نسبت به موج شکن شناور مستطیلی مینا دارند و با اجرای مجرا در بدنه موج شکن شناور مستطیلی می توان باعث افزایش راندمان عملکرد آن شد.

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

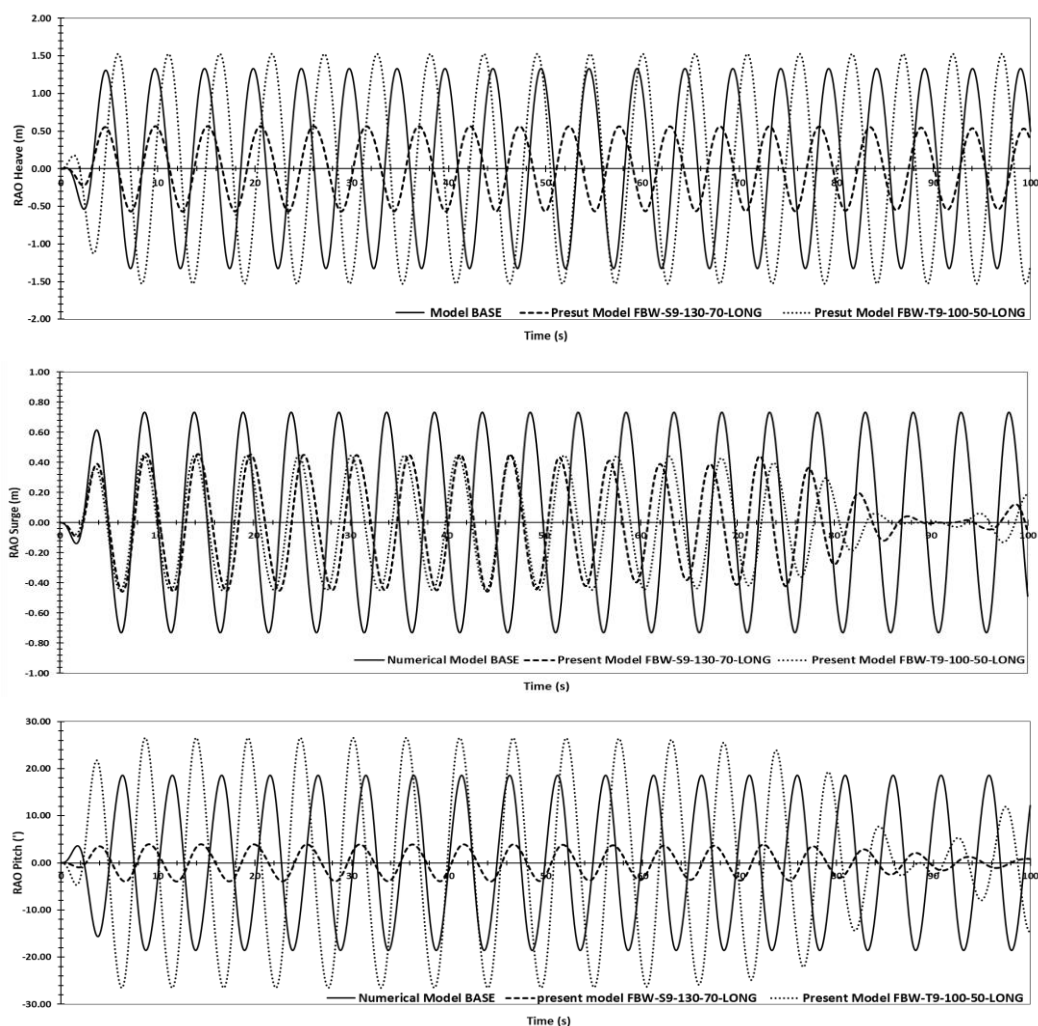
۲-۴- بررسی تاثیر مجاری عرضی بر روی عملکردهای دامنه پاسخ

عملگرهای دامنه پاسخ (RAO) سازه های مدل سازی شده موج شکن های شناور دارای مجاری مستقیم و موج شکن های 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 مینا در شکل (۲۰) نمایش داده شده است.



شکل (۱۹): نمودار مقایسه ضریب انتقال امواج موج شکن های شناور مجرادر

مقایسه نتایج نشان می دهد، بهبود عملکرد موج شکن های شناور مجرادر نسبت به مدل مینا 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



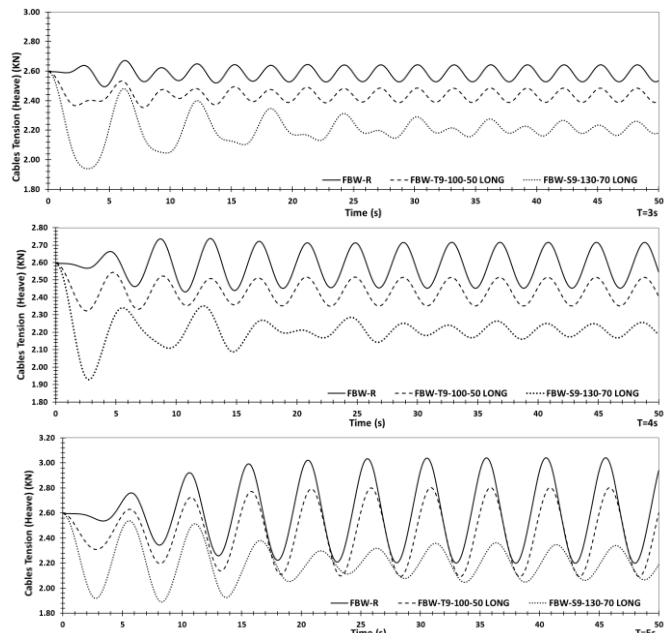
شکل (۲۰): نمودارهای مقایسه عملکردهای دامنه پاسخ موج شکن های شناور مجرادر با موج شکن مینا

نتایج بدست آمده در این بخش نشان می‌دهد که

میزان عملکرد RAO سازه موج‌شکن شناور FBW-T9-100-50 LONG در عملکرد Heave، ۱۷٪ افزایش در عملکرد Surge، ۴۰٪ کاهش و در عملکرد pitch ۳۰٪ افزایش را نسبت به عملکردهای مشابه سازه مبنا، دارا می‌باشد.

میزان عملکرد RAO سازه موج‌شکن شناور FBW-S9-130-70 LONG در عملکرد Heave، ۶۰٪ کاهش در عملکرد Surge، ۴۰٪ کاهش و در عملکرد pitch ۷۸٪ کاهش را نسبت به عملکردهای 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 می‌دهد که از آنجائیکه میزان تنش وارد بر موج‌شکن‌های شناور مجرادار در سه حرکت هیدرودینامیکی Surge و Heave و Pitch نسبت به موج‌شکن 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 موج-شکن 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 (۱/۵ و ۱) 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 غوطه‌وری 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 دوره‌های (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 پریودهای ۳ تا ۶ ثانیه باعث بهبود عملکرد موج‌شکن 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,

- 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*, 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.