

بررسی عددی تاثیر پارامترهای هندسی موج شکن شناور در حالت تک و دو ردیفه بر عملکرد هیدرودینامیکی آن

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: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۷

کلمات کلیدی:

موج شکن شناور

ضریب انتقال موج

پارامترهای هندسی

عملگرهای دامنه پاسخ

سیستم مهاربند

ANSYS AQWA

در زمینه طراحی بنادر یا حفاظت از سازه‌های دریایی، یکی از موارد مورد توجه، پیش‌بینی عملکرد موج شکن‌ها در برابر امواج تابشی می‌باشد. گونه‌ای از موج شکن‌ها که امروزه علاوه بر قابلیت نصب سریع، جابه‌جایی و استفاده مجدد در مناطقی با شرایط مشابه، ارتباط آبی بین فضای حفاظت شده و آب‌های آزاد را حفظ می‌کند، موج شکن شناور می‌باشد. یکی از عوامل تاثیرگذار بر عملکرد موج شکن‌های شناور، پارامترهای هندسی مقطع موج شکن شناور می‌باشد. در این تحقیق، بررسی عددی تاثیر پارامترهای هندسی مقطع موج شکن شناور مستطیلی در حالت تک ردیفه و دو ردیفه بر عملکرد هیدرودینامیکی آن و ضریب انتقال موج در مدل عددی ANSYS-AQWA برای پروده‌های موج در بازه ۳ تا ۷ ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. برای صحت‌سنجی، نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی Ji Deng و همکاران در سال (۲۰۱۹) مقایسه شد که از تطابق خوبی برخوردار بود. نتایج نشان داد که استفاده از موج شکن شناور مستطیلی با نسبت ارتفاع سازه به عرض سازه در محدوده ۰/۳۵ تا ۰/۴۵، بهترین عملکرد را دارد و همچنین افزایش جرم سازه در مقابل موج‌های با پریود کوتاه، باعث بهبود عملکرد و کاهش نیروهای وارده بر کابل مهار می‌شود و در حالیکه در مواجهه با موج‌های با پریود بلند، کاهش جرم سازه باعث بهبود عملکرد موج شکن شناور مستطیلی می‌شود.

Numerical Investigation into Effect Section Geometry parameters of Floating Breakwaters in single and double rows on its Hydrodynamics performance

Saman Yousefi¹, Amin Mahmoudi^{2*}, Sajjad Hajizadeh³

¹ MSc 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: 17 Mar 2023

Accepted: 28 May 2023

Keywords:

Floating breakwater

Wave transmission coefficient

Geometric parameters

Response Amplitude Operator

Mooring system

ANSYS AQWA

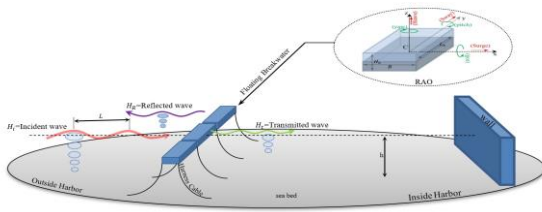
ABSTRACT

In the field of port design or protection of marine structures, one of the important things is predicting the performance of breakwaters against radiation waves. A type of breakwater that today, in addition to being able to be quickly installed, moved and reused in areas with similar conditions, maintains the water connection between protected space and open waters, is a floating breakwater. One of the factors influencing the performance of floating breakwaters is the geometrical parameters of the floating breakwater section. In this research, the numerical investigation of the effect of geometrical parameters of rectangular floating breakwater in single-row and double-row state on its hydrodynamic performance and wave transmission coefficient in ANSYS-AQWA software for wave periods in the range of 3 to 7 seconds has been investigated. For verification, the results of the present numerical model were compared with the laboratory results of Ji Deng et al. in (2019), which is in good agreement. The results showed that the use of a rectangular floating breakwater with the ratio of the height of the structure to the width of the structure in the range of 0.35 to 0.45 has the best performance. Also, increasing the mass of the structure against short-period waves improves performance and reduces the forces on the restraining cable and while in the face of long-period waves, reducing the mass of the structure improves the performance of the rectangular floating breakwater.

انجام داده‌اند [۷]. در سال ۲۰۱۱ پنا و همکاران در مقاله‌ای به بررسی پارامترهای ارتفاع موج ورودی، موج انتقال، نیروهای وارد بر مهاربندها (خطوط پهلوگیری سازه) و نیروهای اتصالات بین ماژول‌ها به وسیله چهار طرح موج‌شکن شناور پرداخته‌اند [۸]. در سال ۲۰۱۲ کنستانتین میخائیلیدیس و همکاران در یک مقاله با معرفی موج‌شکن شناور انعطاف‌پذیر به بررسی مکانیزم هیدرولیکی خطی پاور (PTO) و تجزیه و تحلیل هیدرواستیک خطی در حوزه فرکانس پرداخته است [۹]. در سال ۲۰۱۵ مهدی صناعی و همکاران با روش آزمایشگاهی به بررسی تاثیر فاصله پانتون‌های موج‌شکن شناور پانتونی دو ردیفه بر ضریب انتقال موج پرداخته‌اند [۱۰]. سمعی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از مدل عددی ANSYS AQWA به بررسی موج‌شکن شناور پانتون پرداخته‌اند [۲۰]. در سال ۲۰۱۶ هیونگ‌چو در یک مقاله تعامل بین امواج ورودی و یک موج‌شکن شناور مستطیلی با صفحات جانبی متخلخل عمودی به وسیله نظریه پتانسیل خطی دو بعدی، در برابر امواج تابشی را بررسی کردند. نتایج نشان داد بکارگیری صفحات متخلخل و عمق بیشتر بیرون زدگی صفحات جانبی در کاهش ضرایب انتقال مفید هستند و باعث گسترش دامنه قابل اجرا طول موج بیشتر می‌شوند [۱۱]. در سال ۲۰۱۷، مسعودی و همکاران در یک مقاله عددی به وسیله مدل عددی ANSYS AQWA به بررسی عملکرد چند موج‌شکن شناور با مقاطع مختلف پرداخته‌اند [۲۱]. در سال ۲۰۱۷، رضایی مزیک و همکاران به وسیله مدل عددی ANSYS AQWA به بررسی تاثیر پارامترهای امواج و پارامترهای محیطی بر موج‌شکن شناور نوع پانتون پرداخته‌اند [۲۲]. در سال ۲۰۱۸ جان یان جی و همکاران در یک پژوهش به بررسی عملکرد یک سیستم موج‌شکن شناور استوانه‌ای به روش آزمایشگاهی در حالت سه بعدی پرداخته است [۱۲]. در سال ۲۰۱۸ اریک دمکارد و همکاران در یک مقاله به هدف بررسی دو مکانیسم مختلف میرایی بصورت دو بعدی، چند مقطع موج‌شکن شناور را تجزیه و تحلیل کرده‌اند. که نتایج آن نشان داد تولید گردابه در اطراف لبه‌های موج‌شکن شناور و اتلاف انرژی به دلیل نصب مواد متخلخل در بدنه عمودی موج-شکن باعث میرایی انرژی موج شده و مقاطع موج‌شکن شناوری که دارای صفحات بال و محیط متخلخل متصل به طرفین هستند، بازتاب و انتقال را به طور موثر کاهش می‌دهند [۱۳]. در سال ۲۰۱۹ ژان ژی دنگ به بررسی عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور T شکل به صورت نیمه تحلیلی پرداخته است [۱۴]. شهرابی و همکاران در سال ۲۰۱۹ در یک کار عددی به وسیله مدل عددی ANSYS AQWA به اصلاح عملکرد سیستم مهار موج‌شکن شناور پرداخته‌اند [۲۳]. در سال ۲۰۲۰ هو فو نگوین و همکاران در

امروزه به دلیل گسترش استفاده از دریاها به منظور تأمین و انتقال مواد غذایی و ایجاد روابط اقتصادی در سراسر جهان، توسعه صنایع دریایی افزایش پیدا کرده است. در همین راستا تحقیق و طراحی در زمینه سازه‌های دریایی گسترش بسیاری داشته است، که گونه-ای از این سازه‌های دریایی، موج‌شکن‌های شناور هستند. از دلایلی که موج‌شکن‌های شناور امروزه مورد توجه محققین قرار گرفته است، قابلیت‌های جابجایی و نصب سریع، هزینه ساخت پایین، کارایی‌های گوناگون، بکارگیری در عمق‌های مختلف و حفظ ارتباط آبی بندر و دریا می‌باشد. همین امر باعث شده است تا به امروز تحقیقات بسیاری در زمینه افزایش کارایی و طراحی موج-شکن‌های شناور انجام پذیرد. در سال ۱۹۸۵ مکارتنی و بروس با بررسی چهار نمونه از موج‌شکن‌های شناور از جمله موج‌شکن شناور جعبه‌ای، موارد مهندسی مورد نیاز برای طراحی مناسب موج‌شکن شناور را شرح داده‌اند [۱]. در سال ۱۹۹۳ برگر و همکاران تحقیقاتی در زمینه خواص تضعیف موج و نیروهای مهاربند موج‌شکن شناور در شرایط سه بعدی به وسیله امواج منظم انجام داده‌اند [۲]. در سال ۱۹۹۴ اومراسی و کورتنهاوس در یک مقاله به تجزیه و تحلیل پارامترهای موثر بر پاسخ دینامیکی موج‌شکن کیسون در معرض بارهای موج با استفاده از یک مدل عددی تأیید شده توسط آزمون‌های مدل در مقیاس بزرگ پرداخته‌اند که دو منبع اصلی عدم قطعیت، یعنی بارهای دینامیکی و مدل سازه با پارامترهای دینامیکی آن (جرم، میرایی، سختی) مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. در سال ۲۰۰۰ ویلیامز و همکاران یک جفت موج‌شکن شناور پانتونی با مقطع مستطیلی که به وسیله خطوط پهلوگیری مهار شده است را مورد بررسی خواص هیدرودینامیکی قرار داده‌اند. نتایج نشان داده است که خواص انعکاس موج سازه به شدت به عرض، میزان غوطه‌وری و سختی خط پهلوگیری بستگی دارد، در حالی که شناوری بیش از حد سیستم از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشد [۴]. در سال ۲۰۰۲ مایکل جی بریگز و همکاران در مقاله‌ای به معرفی گونه‌ای جدید از موج‌شکن‌های شناور پرداخته‌اند که با موفقیت در یک مطالعه میدانی در فلوریدا آزمایش شده است و برای حفاظت کشتی‌های در حال عملیات درون دریا مورد استفاده می‌باشد [۵]. در سال ۲۰۰۵ کوتاندوس و همکاران در یک مقاله به بررسی تاثیر متقابل هیدرودینامیکی امواج منظم و نامنظم با موج‌شکن‌های شناور در آب‌های کم‌عمق به صورت تجربی در یک تأسیسات در مقیاس بزرگ پرداخته‌اند و تأثیر ویژگی‌های موج ورودی و مشخصه‌های هندسی خاص، مانند عرض و ارتفاع سازه بر کارایی آن، بررسی شده است [۶]. در سال ۲۰۰۹ فوزرت و همکاران مقاله‌ای در زمینه بهبود عملکرد و تحلیل رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور

به وسیله سه عملکرد که شامل ضریب انتقال موج، ضریب انعکاس موج و عملگرهای دامنه پاسخ هستند، مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.



شکل ۱- نمایش عملکرد موج‌شکن شناور در برابر امواج تابشی

به منزله سنجش راندمان موج‌شکن شناور و عملکرد آن معمولاً از ضریبی به نام ضریب انتقال موج استفاده می‌شود. ضریب انتقال، نسبت ارتفاع موج عبوری از موج‌شکن به موج تابشی می‌باشد که اگر ارتفاع موج تابشی به موج‌شکن با H_i و موج عبوری از موج‌شکن را با H_t در نظر گرفته شود، ضریب انتقال موج سازه موج‌شکن شناور عبارت است از:

$$C_t = \frac{H_t}{H_i}$$

۳- مدل‌سازی عددی

فرضیاتی که در تجزیه و تحلیل مسائل هیدرودینامیکی در نظر گرفته شده، سیال را نیوتنی و تراکم ناپذیر معرفی می‌کند، که چنین فرضیاتی برای آب صدق کرده و معادلات بیضوی جریان به عنوان معادلات ناویر استوکس شناخته می‌شود. در زمینه بررسی سازه‌های شناور نیز، با بزرگ در نظر گرفتن ابعاد سازه، ویسکوزیته سیال ناچیز شده و با ایجاد فرض تراکم‌ناپذیری آب، می‌توان سیال را ایده‌آل دانست و معادلات ناویر استوکس را به معادلات اوایلر کاهش داد. بنابراین با استفاده از معادله لاپلاس و با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب می‌توان نیروی وارد بر موج‌شکن شناور را بدست آورد و همچنین پتانسیل سرعت موج تابشی و امواج پراش، توسط قضیه گرین به عنوان یک معادله انتگرال فردهولم از نوع دوم تعریف می‌شود. در این تحقیق به منظور مدل‌سازی هندسه موج‌شکن از مدل عددی SOLIDWORKS و به منظور آنالیز و بررسی عددی تاثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور تحت اثر امواج منظم، از مدل عددی ANSYS AQWA استفاده شده است.

یک مقاله با بررسی نوع محاسبه ضریب انتقال موج موج‌شکن‌های شناور، یک شاخص جدید برای مقایسه عملکرد تضعیف طرح‌های مختلف موج‌شکن شناور سه بعدی ارائه داده است [۱۵]. در سال ۲۰۲۱، مسعودی و لیان‌گان در یک کار تحقیقاتی با بکارگیری مدل عددی ANSYS AQWA به بررسی موج‌شکن شناور مستطیلی پایه‌دار پرداخته‌اند [۲۴]. قربانی و همکاران در سال ۲۰۲۱ میلادی مسئله تاثیرگذاری موج و موج‌شکن مستطیلی شناور لنگردار را با استفاده از روش المان محدود مرزی نیمه تحلیلی بصورت دو بعدی مورد مطالعه قرار دادند [۱۶]. در سال ۲۰۲۱ ژبون یانگ و همکاران در مقاله‌ای به بررسی موج‌شکن شناور نوع بالاست آبی پرداخته‌اند و در این راستا آزمایشاتی برای تحلیل عملکرد این نوع سازه و تحلیل حرکات هیدرودینامیک آن صورت داده‌اند [۱۷]. در سال ۲۰۲۲ کبادار رلنا و همکاران در یک پژوهش در مورد مدلسازی عددی اتصالات و نیروهای وارد بر اتصال دهنده‌های ماژول در موج‌شکن پانتون را گزارش می‌دهد که به وسیله مدل عددی ANSYS AQWA مدلسازی شده‌اند [۲۵]. در مطالعات و تحقیقات پیشین، به منظور بهبود عملکرد موج‌شکن‌های شناور، به بررسی تغییر شکل سطح مقطع موج‌شکن شناور و بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد موج‌شکن‌های شناور به صورت دوبعدی و در حالت تک ردیفه پرداخته شده است. لذا در این تحقیق به بررسی عددی تاثیر پارامترهای هندسی مقطع موج‌شکن شناور مستطیلی در حالت تک و دو ردیفه به صورت سه بعدی بر روی ضریب انتقال موج و عملگرهای دامنه پاسخ موج‌شکن شناور در مدل عددی ANSYS-AQWA برای پیوندهای موج در بازه ۳ تا ۷ ثانیه تحت اثر موج منظم، پرداخته شده است. بررسی تاثیر ارتفاع امواج در مطالعات پیشین [۱۹] نشان داد که، تغییرات ارتفاع امواج در عملکرد ضریب انتقال موج، تاثیر چندانی ندارد، بنابراین در این تحقیق، عملکرد موج‌شکن شناور تحت موج با ارتفاع ثابت ۱ متر و پیوندهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- هیدرودینامیک موج‌شکن‌های شناور

عملکرد موج‌شکن‌های شناور در مقابل موج‌های تابشی، مانند آنچه در شکل (۱) نشان داده شده است، به دو صورت انجام می‌شود. در ابتدا با ایجاد مقاومت در برابر موج به وسیله دیواره عمودی موج‌شکن، درصدی از انرژی موج جذب و درصدی دیگر از آن به سمت دریا به شکل موج، منعکس می‌شود. سپس با ایجاد شش درجه آزادی در حرکات هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور، فرکانس موج ورودی به وسیله موج‌شکن جذب و به فرکانس حرکتی سازه موج‌شکن شناور تبدیل می‌گردد، که فرکانس تبدیل شده باعث ایجاد موج در سمت ساحل موج‌شکن اما با انرژی و ارتفاع کمتر نسبت به انرژی و ارتفاع موج تابشی می‌شود. موج‌شکن‌های شناور

BEM کار می‌کند. علاوه بر شرایط مرزی که در بخش‌های قبلی ذکر شد، در ناحیه سیال همچنین شرط مرزی نیز برقرار می‌شود:

$$\nabla^2 G(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \delta(\vec{x}, \vec{\xi}) \quad (8)$$

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

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

$$\delta(\vec{x} - \vec{\xi}) = \begin{cases} 0 & \vec{x} - \vec{\xi} \neq 0 \text{ زمانی} \\ \infty & \vec{x} - \vec{\xi} = 0 \text{ زمانی} \end{cases} \quad (9)$$

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

$$G(\vec{x}, \vec{\xi}, \omega) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_2} + \int_0^\infty \frac{2(k+v)e^{-kh} \cosh[k(z+h)] \cosh[k(\zeta+h)] j_0(kR) dk}{k \sinh(kh) - v \cosh(kh)} \quad (10)$$

$$= i2\pi \frac{(k_0+v)e^{-k_0h} \cosh[k_0(z+h)] \cosh[k_0(\zeta+h)] j_0(k_0R)}{\sinh(k_0h) + k_0h \cosh(k_0h) - v h \sinh(k_0h)} j_0(k_0R)$$

که j_0 تابع بسل نوع اول می‌باشد.

$$R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$$

$$r = \sqrt{R^2 + (z-\zeta)^2}$$

$$r_2 = \sqrt{R^2 + (z+\zeta-2h)^2}$$

$$v = \frac{\omega^2}{g} \quad v = k_0 \tanh(k_0h) \quad (11)$$

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

عملگرهای دامنه پاسخ (RAO)، حرکت یک سازه شناور در شش درجه آزادی تحت اثر نیروی هیدرودینامیکی موج می‌باشد. RAOها به عنوان داده ورودی برای محاسبات تعیین جابه‌جایی‌ها، شتاب‌ها و سرعت‌ها در هر موقعیتی از سازه شناور دریایی، به کار گرفته می‌شوند. به طور کلی، RAO به وسیله نسبت دامنه پاسخ موج‌شکن شناور (FBW) (X_j) به دامنه موج (A_i) برای حرکت خطی و نسبت دامنه پاسخ FBW به شیب موج (α_i) برای حرکت چرخشی محاسبه می‌شوند، که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۹]:

$$RAO = \frac{X_j}{A_i}, \quad \text{where } X_j = u_j, (j=1,2,3) \quad (12)$$

$$RAO = \frac{X_j}{\alpha_i}, \quad \text{where } X_j = \theta_{j-3}, (j=4,5,6)$$

۳-۱- معادله حرکت و عملگرهای دامنه پاسخ (RAO) در مدلسازی عددی

برای بیان میدان جریان سیال اطراف یک سازه شناور، پتانسیل سرعت بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$\Phi(\vec{X}, t) = A\varphi(\vec{X})e^{-i\omega t} \quad (2)$$

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

$$\varphi(\vec{X})e^{-i\omega t} = \left[\varphi_I + \varphi_D + \sum_{j=1}^6 \varphi_{Rj} X_j \right] e^{-i\omega t} \quad (3)$$

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 می‌شود [۱۹]:

معادله لاپلاس:

$$\nabla^2 \varphi(x, y, z) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

شرط مرزی سطح آزاد خطی S_f در $z = 0$

$$-\omega^2 \varphi + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (5)$$

شرط مرزی روی سطح جسم (S_b):

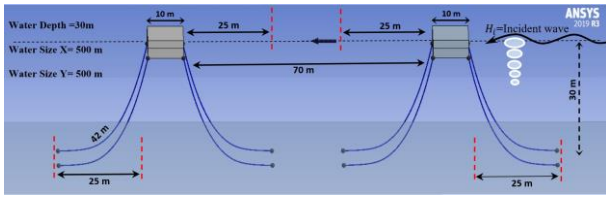
$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega n_j & \text{برای پتانسیل تابشی} \\ -\frac{\partial \varphi}{\partial x} & \text{برای پتانسیل پراش} \end{cases} \quad (6)$$

شرط مرزی بستر دریا (S_z) در $Z = -h$

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

$$|\nabla \varphi| \rightarrow 0 \quad (7)$$

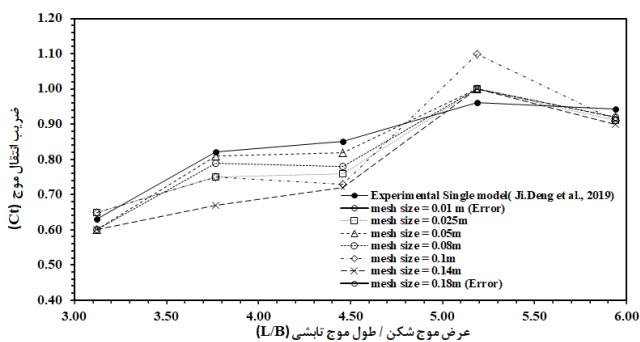
در این تحقیق از نرم افزار ANSYS AQWA برای حل معادله پتانسیل سرعت به کار برده شده است که بر مبنای پتانسیل



شکل ۳- نمایی از دامنه محاسباتی و موج شکن شناور تک ردیفه و دو ردیفه در مدل عددی ANSYS AQWA

مدل تک ردیفه و دو ردیفه مقاله مزبور [۱۸] در مدل عددی ANSYS AQWA برحسب پارامترهای سازه‌ای و شرایط مرزی و اولیه، مدل سازی و در برابر امواجی با ارتفاع ۰/۱ متر و پریودهای (۱، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴) ثانیه آنالیز شده است.

به منظور بررسی تاثیر ابعاد شبکه محاسباتی بر نتایج مدل سازی و استقلال نتایج مدل سازی از شبکه محاسباتی، مدل سازی عددی با اندازه شبکه محاسباتی (۰/۰۱، ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۸، ۰/۱، ۰/۱۴، ۰/۱۸) متر انجام شد. نتایج این مدل سازی‌ها برای ضریب انتقال موج و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی در شکل (۴) و مقایسه پارامترهای آماری در جدول (۱) آورده شده است. همانطور که از روی شکل (۴) و مقایسه پارامترهای آماری در جدول (۱) مشاهده می‌شود، با کاهش اندازه شبکه محاسباتی به ۰/۰۵ متر، نتایج مدل عددی مطابقت بهتری با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد ولی با کوچکتر کردن اندازه شبکه محاسباتی، مدل همگرا نشده و دچار خطای آنالیز شده است. بنابراین با توجه به نتایج ارائه شده، می‌توان اندازه شبکه محاسباتی ۰/۰۵ متر را به عنوان شبکه محاسباتی بهینه برای این مدل سازی در نظر گرفت.



شکل ۴- مقایسه ضریب عبور موج در مدل سازی عددی با اندازه شبکه محاسباتی‌های متفاوت با نتایج آزمایشگاهی [۱۸]

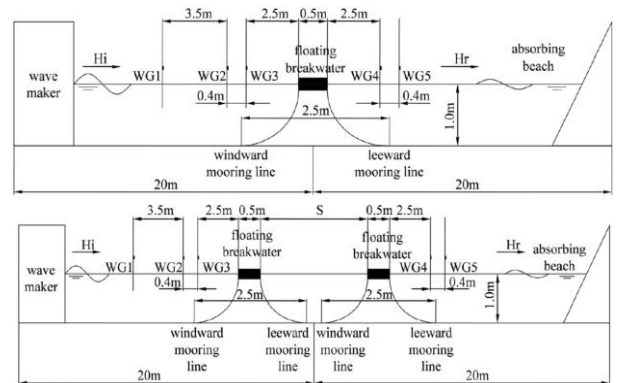
جدول ۱- مقایسه مقادیر A_r ، P_d و $RMSE$ برای تعیین اندازه شبکه محاسباتی بهینه

	A_r	P_d	$RMSE$
Mesh size=0.025m	۰/۹۷	۰/۰۶۶	۰/۰۰۳۱۸

که α_i شیب موج، A_i دامنه موج و X_j دانه پاسخ موج شکن شناور در حرکت چرخشی ($\theta_{j=3}$) و در مود جابه‌جایی (u_j) می‌باشد. مدل عددی ANSYS AQWA معادلات جبری خطی را برای دستیابی به پاسه هارمونیک جسم نسبت به امواج منظم آنالیز می‌کند. این مشخصات پاسخ به طور معمول به عنوان RAO بیان می‌شوند و به دامنه موج بستگی دارند.

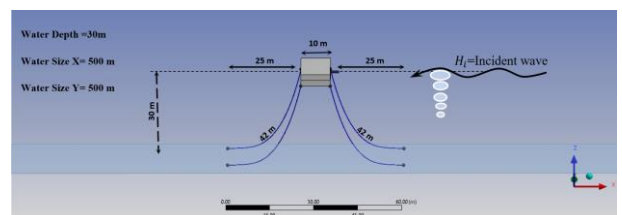
۳-۲- صحت سنجی مدل عددی

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، در زمینه بررسی عملکرد موج شکن‌های شناور از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط Ji.Deng و همکاران در سال ۲۰۱۹ استفاده شده است [۱۸]. در این تحقیق یک موج شکن شناور مستطیلی در حالت تک ردیفه و دو ردیفه به طول ۰/۷۶ متر، عرض ۰/۵ متر، ارتفاع ۰/۲ متر و عمق آبخور ۰/۱ 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. آزمایشات در یک فلوم موج به طول ۴۰ متر، عرض ۰/۸ متر و عمق ۱/۴ متر انجام شده و تاثیر ارتفاع امواج بر عملکرد موج شکن شناور در زمینه ضریب انتقال موج و عملگرهای دامنه پاسخ آن صورت گرفته است. نمایی از فلوم آزمایش و پارامترهای مدل سازی در شکل (۲) آورده شده است. همچنین نمایی از دامنه محاسباتی و مدل سازی عددی موج شکن شناور تک ردیفه و دو ردیفه در مدل عددی ANSYS AQWA در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۲- نمایی شماتیک از فلوم موج آزمایشگاهی

Ji.Deng و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۸]



همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج عددی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی از تطابق نسبتاً مناسبی برخوردار می‌باشند. اختلاف بین نتایج حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی می‌تواند به وسیله سه پارامتر آماری زیر به صورت کمی بیان شود:

$$A_r = \left(\frac{\sum_i (Var_i^{num})^2}{\sum_j (Var_i^{exp})^2} \right)^{1/2} \quad (13)$$

$$P_d = \left(\frac{\sum_i (Var_i^{num} - Var_i^{exp})^2}{\sum_j (Var_i^{exp})^2} \right)^{1/2} \quad (14)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_i (Var_i^{num} - Var_i^{exp})^2}{N} \right)^{1/2} \quad (15)$$

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 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 (۲) مقادیر A_r ، P_d و $RMSE$ حاصل برای نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه مقادیر A_r ، P_d و $RMSE$ برای نتایج مدل عددی

حاضر با نتایج آزمایشگاهی مقاله [۱۸]

	A_r	P_d	$RMSE$
C_t	۱/۰۲۹	۰/۰۳۹	۰/۰۳۴
C_t (Double)	۱/۰۱۲	۰/۰۵۵	۰/۰۴۲
RAO Heave	۱/۰۰۷	۰/۰۲۱	۰/۰۱۹
RAO Surge	۱/۰۶۸	۰/۰۱۷	۰/۰۳۴

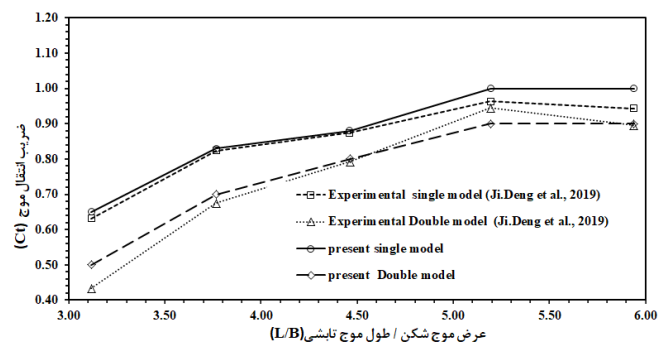
هر سه پارامتر آماری نشان می‌دهند که نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی از مطابقت مناسبی برخوردار می‌باشد.

۳-۳- مشخصات مدل‌های مختلف موج‌شکن شناور

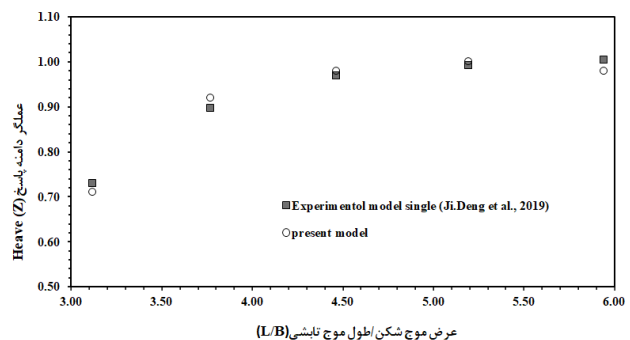
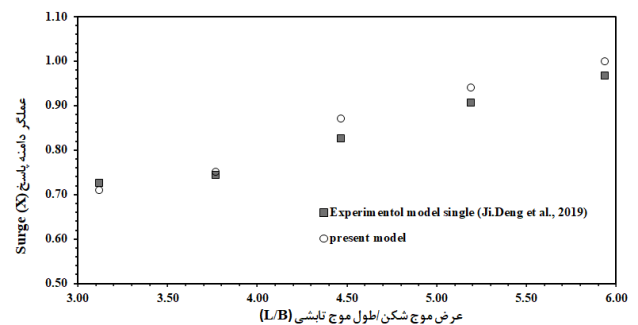
در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر پارامترهای هندسی سازه موج‌شکن شناور مستطیلی بر عملکرد ضریب انتقال موج و عملگرهای دامنه پاسخ آن، از مدلسازی‌های مختلف موج‌شکن شناور مستطیلی بسته به بررسی تاثیر هر یک از پارامترهای آن استفاده شده است. در زمینه بررسی پارامترهای عمق غوطه‌وری، عرض سازه و جرم سازه در حالت‌های تک و دو ردیفه، مدل‌های مزبور در مدل عددی SOLIDWORKS مدلسازی و پارامترهای سازه‌ای آن (شامل ممان اینرسی، چگالی، مرکز جرم) از مدل

Mesh size=0.05m	۰/۹۹	۰/۰۳۳	۰/۰۰۰۷۹
Mesh size=0.08m	۰/۹۷	۰/۰۴۹	۰/۰۴۱
Mesh size=0.1m	۰/۹۵	۰/۱	۰/۰۰۸۰۴

عملکرد موج‌شکن شناور با استفاده از ضریب انتقال موج (C_t) و عملگرهای دامنه پاسخ (Heave) و (Surge) با در نظر گرفتن ابعاد شبکه محاسباتی بهینه، ۰/۰۵ متر مورد ارزیابی قرار گرفته و مقایسه ضریب انتقال موج و عملگرهای دامنه پاسخ به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی حاضر در برابر پارامتر بدون بعد (L/B) و به ازای ($S/B = 5$) برای امواجی با پرید (۱، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴) ثانیه و ارتفاع (۰/۱) متر در شکل (۵) و شکل (۶) آورده شده است.



شکل ۵- نمودار عملکرد ضریب انتقال موج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی [۱۸] در حالت تک و دو ردیفه

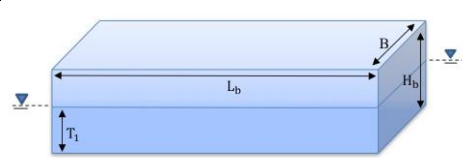


شکل ۶- نمودار عملگرهای دامنه پاسخ مدل عددی و مدل آزمایشگاهی [۱۸]

۲۰۲۱ [۱۹] بهره گرفته شده، که در جدول (۳) آورده شده است. پارامترهای معرفی شده جدول (۴) عبارتند از: L_b طول موج‌شکن شناور، H_b ارتفاع موج‌شکن شناور، B عرض موج‌شکن، T_1 عمق غوطه‌وری موج‌شکن شناور و I_{xx} ، I_{yy} و I_{zz} به ترتیب ممان اینرسی مقطع موج‌شکن شناور حول محورهای x و y و z انتخابی می‌باشد.

عددی استخراج شد و سپس در مدل عددی ANSYS AQWA فراخوانی شده و تحت امواج منظم با ارتفاع ۱ متر و پریودهای (۳) تا (۷) ثانیه با بکارگیری تئوری موج استوکس مرتبه دوم آنالیز شده- اند. مشخصات کامل نمونه‌های مدل‌سازی شده در این تحقیق به همراه نام اختصاری در نظر گرفته شده برای آن‌ها و شرایط محیطی و شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی در جدول (۳) و جدول (۴) آورده شده است و همچنین پارامترهای مدل‌سازی کابل‌های مهار و مدل مینا، از مقاله Rajabi و همکاران

جدول ۳- پارامترهای طراحی موج‌شکن مستطیلی مینا و کابل‌های مهار

مدل مستطیلی	
	
پارامترهای هندسی سازه	شرایط محیطی
mass (kg) = 410000 Length (m) = 20 Width (m) = 10 Draft (m) = 2	Water depth = 30 m water density = 1025 kg/m ³ water size x = 500 water size y = 500
مشخصات طراحی کابل‌های مهار	
8.27 kg/m ³ = واحد طول / جرم 10000 N = ماکزیم کشش 0.02 m = قطر معادل	0.002 m ² = سطح مقطع معادل 5000000 N = سختی 42 m = طول کابل

جدول ۴- پارامترهای طراحی و مشخصات هندسی موج‌شکن‌های شناور جعبه‌ای مدل‌سازی شده

Name	L_b (m)	B (m)	H_b (m)	T_1 (m)	m (kg)	I_{XX} (kg.m ³)	I_{yy} (kg.m ³)	I_{zz} (kg.m ³)
FBW-T1=1/5	20	10	3.5	1.5	410000	14110833	3860833	17083333
FBW-T1=2	20	10	4	2	410000	14213333	3963333	17083333
FBW-T1=2/5	20	10	4.5	2.5	410000	14384166	4134166	17083333
FBW-T1=3	20	10	5	3	410000	14623333	4373333	17083333
FBW-T1=3/5	20	10	5.5	3.5	410000	14930833	4680833	17083333
FBW-B=10	20	10	4	2	410000	14213333	3963333	17083333
FBW-B=11	20	11	4	2	410000	14213333	4680833	17800833
FBW-B=12	20	12	4	2	410000	14213333	5466666	18586666
FBW-B=13	20	13	4	2	410000	14213333	6320833	19440833
FBW-M=310000	20	10	4	2	310000	10746666	2996666	12916666
FBW-M=360000	20	10	4	2	360000	12480000	3480000	15000000
FBW-M=410000	20	10	4	2	410000	14213333	3963333	17083333
FBW-M=460000	20	10	4	2	460000	15946666	4446666	19166666
FBW-M=510000	20	10	4	2	510000	17680000	4930000	21250000

اختصاری FBW-T1 با ثابت نگه‌داشتن سایر مشخصات هندسی، در برابر امواجی با ارتفاع ۱ متر و پریود (۳ تا ۷) ثانیه آنالیز شده اند. مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی این مدل‌ها، بوسیله ضریب- انتقال موج و عملگرهای دامنه پاسخ در شکل (۷) و شکل (۸) آورده شده است.

۴- بحث و بررسی نتایج

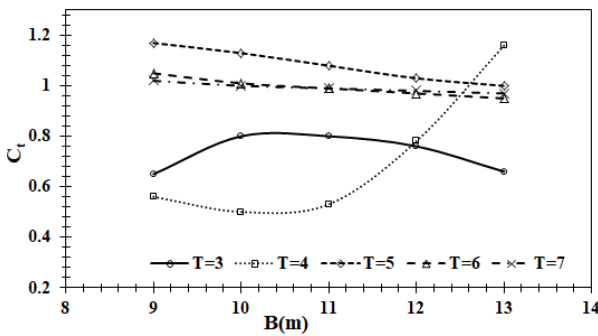
۴-۱- بررسی تاثیر پارامتر عمق غوطه‌وری (T_1)

به منظور بررسی تاثیر عمق غوطه‌وری بر عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور مستطیلی در حالت تک ردیفه، پنج مدل موج شکن با عمق‌های غوطه‌وری مختلف (۱/۵ تا ۳/۵) متر با نام‌های

بررسی عملگرهای دامنه پاسخ موج‌شکن‌های شناور با عمق-های غوطه‌وری متفاوت در شکل (۸) نشان داد، تغییرات عمق غوطه‌وری سازه، بر عملکرد هیدرودینامیکی Heave سازه تأثیری نمی‌گذارد و فقط افزایش پریود موج باعث افزایش آن می‌شود. تغییر عمق غوطه‌وری به نسبت پریودهای مختلف عملکردهای Surge مختلفی را ارائه می‌دهد و از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کند، اما بطور کلی می‌توان بیان کرد که عملکرد Surge سازه وابسته به عمق غوطه‌وری می‌باشد. در خصوص حرکت Pitch سازه نیز می‌توان بیان کرد که در مقابل امواجی با پریودهای پایین، افزایش عمق غوطه‌وری باعث کاهش حرکت Pitch سازه می‌شود اما افزایش پریود موج، باعث می‌شود با افزایش عمق غوطه‌وری، حرکت Pitch سازه افزایش پیدا کند.

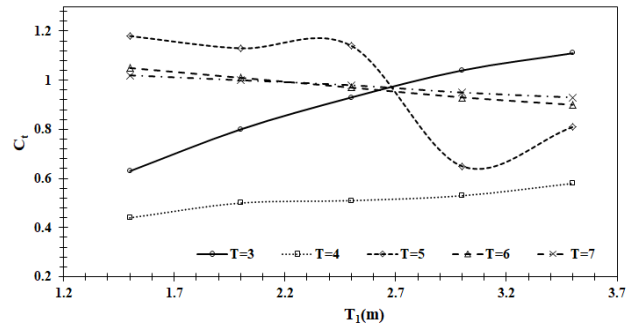
۴-۲- بررسی پارامتر عرض سازه (B)

به منظور بررسی تأثیر عرض موج‌شکن شناور بر عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور مستطیلی در حالت تک ردیفه، پنج مدل موج‌شکن با عرض‌های مختلف (۹ تا ۱۳) متر با نام‌های اختصاری FBW-B با ثابت نگاه‌داشتن سایر مشخصات هندسی، در برابر امواجی با ارتفاع ۱ متر و پریود (۳ تا ۷) ثانیه آنالیز شده اند. مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی این مدل‌ها، بوسیله ضریب-انتقال موج و عملگرهای دامنه پاسخ در شکل (۹) و شکل (۱۰) آورده شده است.



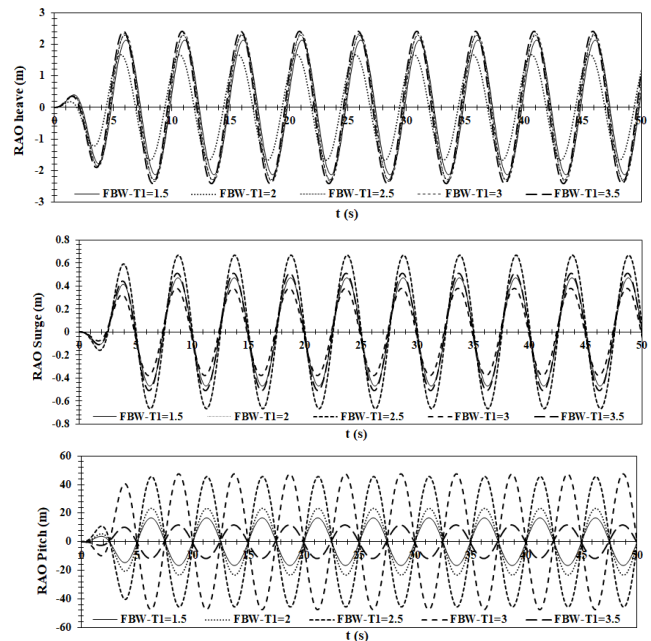
شکل ۹- نمودار ضریب انتقال موج موج‌شکن‌های با عرض‌های متفاوت

بررسی آنالیزهای انجام شده در زمینه ضریب انتقال موج در شکل (۹) نشان داد، موج‌شکن شناور مستطیلی در پریود سه ثانیه با عرض ۹ و ۱۳ متر ضریب انتقال موج را تا حدود ۰/۶۵ کاهش می‌دهد و در محدوده عرض ۱۰ تا ۱۲ متر ضریب انتقال موج را تا حدود ۰/۸ می‌رساند. در پریود موج ۴ ثانیه محدوده عرضی ۹ تا ۱۱ متر ضریب انتقال موج را به صورت نسبتاً خطی در محدوده ۰/۵ حفظ می‌کند و در عرض‌های ۱۲ و ۱۳ روندی افزایشی را



شکل ۷- نمودار ضریب انتقال موج، مدل‌های با عمق غوطه‌وری متفاوت (۱/۵ تا ۳/۵) متر در حالت تک ردیفه

نتایج ارائه شده در شکل (۷) نشان داد که، در پریود ۳ ثانیه افزایش عمق غوطه‌وری سازه، از ۱/۵ متر تا ۳/۵ متر بصورت خطی باعث کاهش عملکرد سازه تا میزان ۴۳٪ می‌شود. در پریود ۴ ثانیه افزایش عمق غوطه‌وری سازه از ۱/۵ متر تا ۳/۵ متر بصورت نسبتاً خطی کاهش عملکرد موج‌شکن را با شیب کمتری نشان می‌دهند و ضریب انتقال موج سازه را از میزان ۰/۴۴ به میزان ۰/۵۸ می‌رساند. در پریود ۵ ثانیه سازه‌هایی با عمق غوطه‌وری ۱/۵ تا ۲/۵ متر باعث افزایش ضریب انتقال موج تا میزان حدود ۱/۱۵ می‌شوند، اما افزایش عمق غوطه‌وری آن‌ها از ۳ تا ۳/۵ متر، باعث کاهش ضریب انتقال موج تا میزان میانگین ۲۷٪ می‌شود و در پریودهای ۶ تا ۷ ثانیه، افزایش عمق غوطه‌وری سازه از ۱/۵ تا ۳/۵ متر بطور نسبتاً خطی باعث کاهش ضریب انتقال موج تا میزان ۱۱٪ می‌شود.



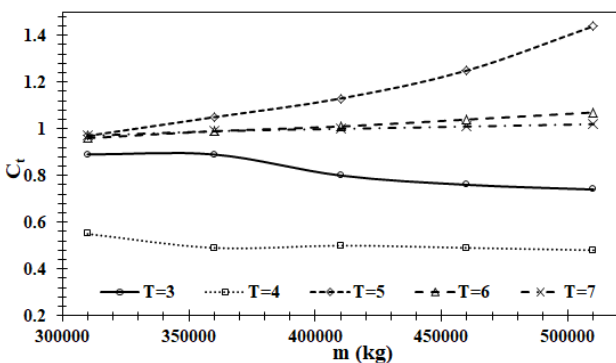
شکل ۸- نمودار عملگرهای دامنه پاسخ موج‌شکن شناور با عمق-های غوطه‌وری متفاوت تحت اثر موج منظم با پریود ۵ ثانیه

سازه موج‌شکن شناور مستطیلی تاثیری در عملکرد دامنه پاسخ Surge سازه ندارد. بررسی عملکرد پاسخ Pitch سازه موج-شکن شناور مستطیلی بر تغییرات عرض سازه نیز نشان داد، در پریودهای ۳ تا ۴ ثانیه افزایش عرض سازه باعث افزایش حرکت Pitch سازه تا میزان میانگین ۵۱٪ و در پریود ۵ ثانیه، افزایش عرض سازه باعث کاهش حرکت Pitch سازه تا میزان ۸۶٪ می‌شود. بطور کلی تغییرات عرض سازه در تمام پریودهای موج بر حرکت Pitch سازه تاثیرگذار است و تاثیرپذیری حرکات Heave و Surge سازه بستگی به پریودهای مختلف موج دارد.

بررسی آنالیزهای تنش در کابل‌های مهار نشان داد، افزایش عرض سازه موج‌شکن شناور در تمام پریودهای موج (۳ تا ۷) ثانیه باعث کاهش تنش در کابل‌ها تا میزان بیش از (۱۵ تا ۲۸) درصد می‌شود.

۳-۴- بررسی پارامتر جرم سازه

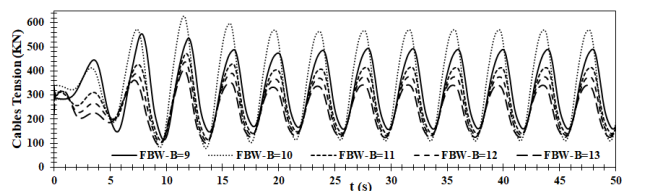
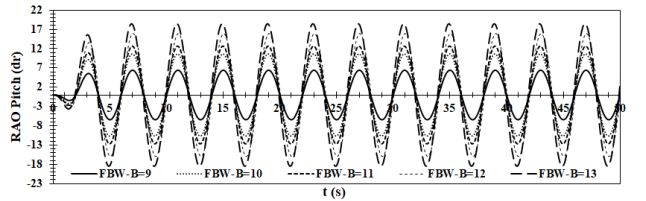
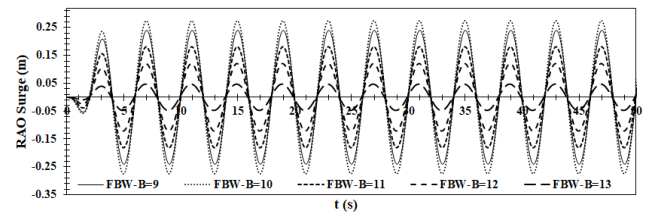
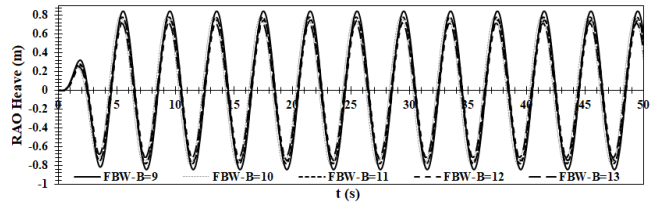
آنالیزهای صورت گرفته در زمینه بررسی میزان تاثیرگذاری جرم موج‌شکن شناور مستطیلی بر عملکرد آن بر روی پنج مدل موج-شکن شناور با جرم سازه (۳۱۰۰۰۰، ۳۶۰۰۰۰، ۴۱۰۰۰۰، ۴۶۰۰۰۰، ۵۱۰۰۰۰) کیلوگرم و با ثابت نگهداشتن پارامترهای ساختاری دیگر، صورت گرفته است. سازه‌های مورد آنالیز در این بخش با اسامی FBW-M معرفی شده و در برابر امواجی با ارتفاع یک متر و پریود (۳ تا ۷) ثانیه مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. تاثیر این پارامتر بوسیله ضریب انتقال موج و میزان عملکرد دامنه پاسخ به صورت مقایسه‌ای در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل ۱۱- نمودار ضریب انتقال موج سازه‌هایی با جرم‌های متفاوت

بررسی نمودارهای ضریب انتقال موج با جرم سازه متفاوت در شکل (۱۱) نشان داد که افزایش جرم سازه در پریودهای (۵ تا ۷) ثانیه، باعث تضعیف عملکرد موج تا ضریب انتقال موج ۱/۴ شده و فقط افزایش جرم در پریودهای (۳ و ۴) ثانیه به میزان میانگین ۱۲٪ باعث کاهش ضریب انتقال موج می‌شود.

نشان می‌دهد. در محدوده پریود ۵ تا ۷ ثانیه، موج‌شکن‌های شناور با عرض‌های ۹ تا ۱۳ باعث افزایش ضریب انتقال موج شده و عملکرد خوبی را نشان نمی‌دهد. بطور کلی می‌توان بیان کرد در پریودهای موج پایین (۳ تا ۴) ثانیه، عرض سازه به تنهایی در عملکرد موج‌شکن شناور تاثیرگذار است و افزایش آن تاثیر منفی تا حدود ۵۲٪ در عملکرد موج‌شکن شناور می‌گذارد و با افزایش پریود، عرض سازه موج‌شکن شناور تاثیرگذاری خود را تا میزان زیادی از دست می‌دهد.



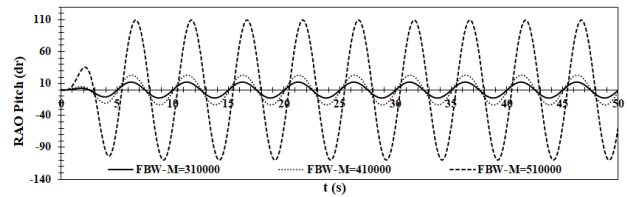
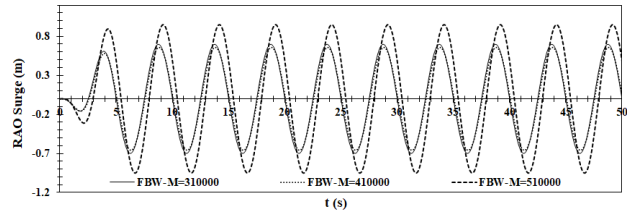
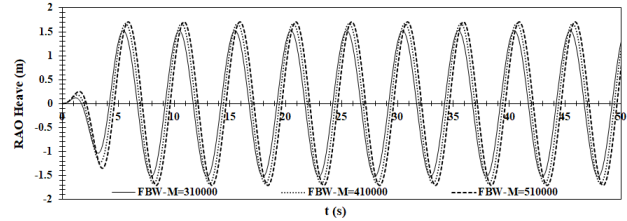
شکل ۱۰- نمودار عملکرد دامنه پاسخ و تنش در کابل‌های مهار، موج‌شکن‌های شناور با عرض متفاوت تحت اثر موج با پریود ۴ ثانیه

بررسی عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور مستطیلی با عرض‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داد، افزایش عرض موج-شکن شناور از ۹ تا ۱۳ متر، تا پریود ۴ ثانیه تاثیری چندانی در عملکرد هیدرودینامیکی Heave سازه ندارد، اما با افزایش پریود موج، در پریود ۵ ثانیه با افزایش عرض سازه، عملکرد حرکتی Heave سازه تا میزان ۲۷٪ کاهش می‌یابد. بررسی عملکرد حرکتی Surge سازه موج‌شکن شناور با عرض ۹ تا ۱۳ متر نشان داد، جز در پریود ۴ ثانیه که افزایش عرض سازه باعث کاهش حرکت Surge سازه می‌شود، می‌توان بیان کرد، تغییرات عرض

متفاوت، نسبتاً برابر بوده و فقط بر حسب تغییرات زمان متفاوت می‌باشند.

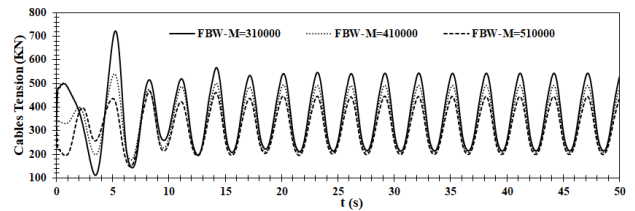
۴-۴- بررسی عملکرد موج‌شکن‌های شناور در حالت دو ردیفه

استفاده از موج‌شکن‌های شناور در حالت دو ردیفه به نسبت موج-شکن‌های شناور تک ردیفه عملکرد بهتری را در زمینه کاهش ضریب انتقال موج و کاهش عملگرهای دامنه پاسخ نشان می‌دهند. در ابتدای این بخش به دلیل استفاده از یک مدل مینا برای بررسی آنالیز موارد مختلف، به بررسی عملکرد موج‌شکن شناور دو ردیفه پرداخته شده است تا بتوان از آن به عنوان یک مدل مینا بهره گرفت شود. مدل مینا، موج‌شکن شناور (FBW-T1=2) در نظر گرفته شده است و آنالیزهای انجام شده در برابر امواجی با پریود (۳ تا ۷) ثانیه و ارتفاع موج ۱ متر می‌باشد. پارامتر مورد ارزیابی، نسبت (S/B) (شکل (۱۴)) در نظر گرفته شده است. نمودار ضریب انتقال موج و نمودارهای RAO در شکل (۱۵) و شکل (۱۶) آورده شده است.



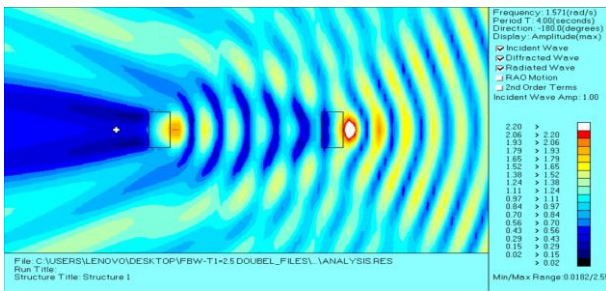
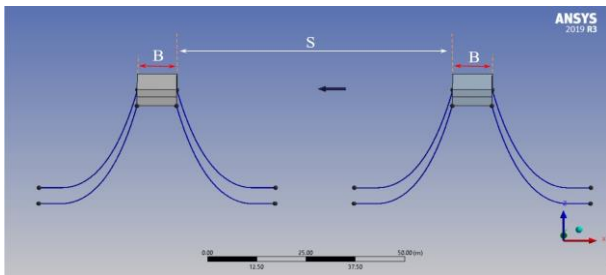
شکل ۱۲- نمودار عملگرهای دامنه پاسخ در سازه‌هایی با جرم متفاوت (۳۱۰۰۰۰ تا ۵۱۰۰۰۰ kg) تحت موج با پریود ۵ ثانیه

بررسی نمودارهای عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور در شکل (۱۲) نشان داد، در پریودهای پایین (کمتر از ۴ ثانیه) افزایش جرم سازه تا ۵۱۰۰۰۰ kg باعث کاهش حرکات Heave تا میزان ۲۲٪، کاهش حرکت Surge به میزان ۲۵٪ و کاهش حرکت Pitch سازه تا میزان ۳۶٪ می‌شود و در پریودهای بیشتر از ۴ ثانیه، کاهش جرم سازه تا میزان ۳۱۰۰۰۰ kg باعث کاهش حرکات Heave تا میزان ۱۲٪، کاهش حرکت Surge به میزان ۲۶٪ و کاهش حرکت Pitch سازه تا میزان ۹۵٪ می‌شود.

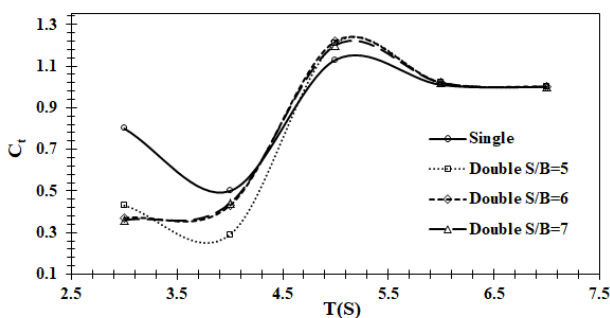


شکل ۱۳- نمودار تنش در کابل‌های مهار، سازه‌هایی با جرم متفاوت (۳۱۰۰۰۰ تا ۵۱۰۰۰۰ کیلوگرم) تحت موج با پریود ۳ ثانیه

بررسی تنش وارده به کابل‌های مهار در آنالیز سازه‌هایی با جرم‌های متفاوت در شکل (۱۳) نشان داد، در پریودهای کمتر از ۴ ثانیه افزایش جرم باعث کاهش ۳۴٪ تنش وارد بر کابل‌ها می‌شود و در پریودهای بالاتر از ۴ ثانیه، عملکرد کابل‌های مهار موج‌شکن‌های شناور مستطیلی با جرم

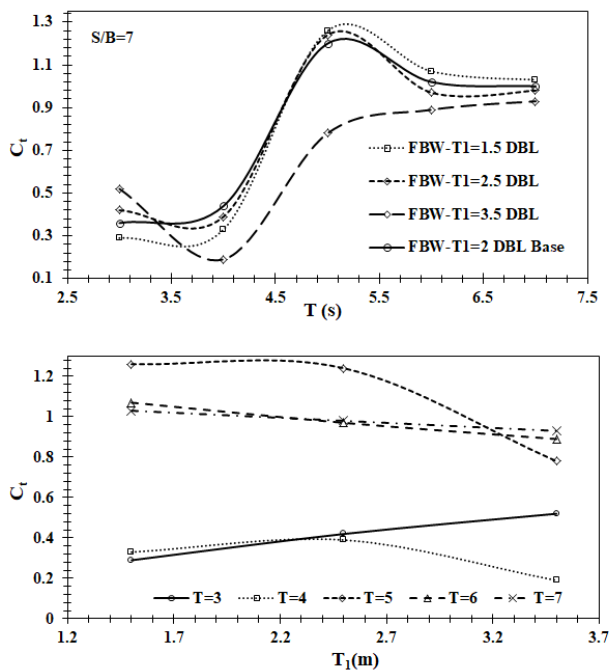


شکل ۱۴- نمایی از موج‌شکن شناور دو ردیفه

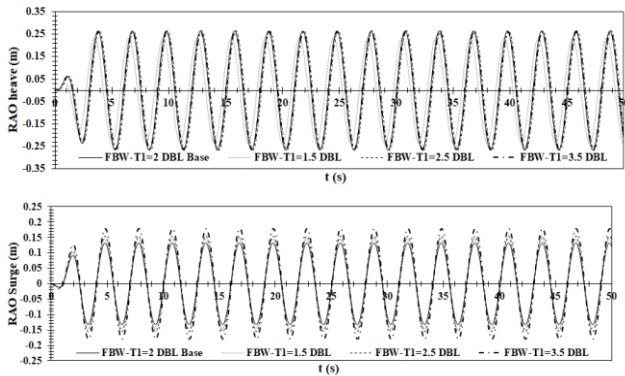


مدل موج‌شکن شناور با عمق غوطه‌وری‌های (۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵) متر، در برابر امواجی با ارتفاع یک متر و پریودهای (۳ تا ۷) ثانیه انجام شده است. نمودار ضریب انتقال و عملگرهای دامنه پاسخ سازه موج‌شکن شناور مورد ارزیابی قرار گرفت.

مدل‌های مزبور با مدل مبنا در حالت (S/B=7) مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته شده‌اند و برای نامگذاری مدل‌های طراحی شده در حالت دو ردیفه، از حروف DBL در انتهای نام هر موج‌شکن شناور مستطیلی استفاده شده است. (به عنوان نمونه FBW-T1=2 DBL به معنای موج‌شکن شناور دو ردیفه با عمق غوطه‌وری ۲ متر می‌باشد)

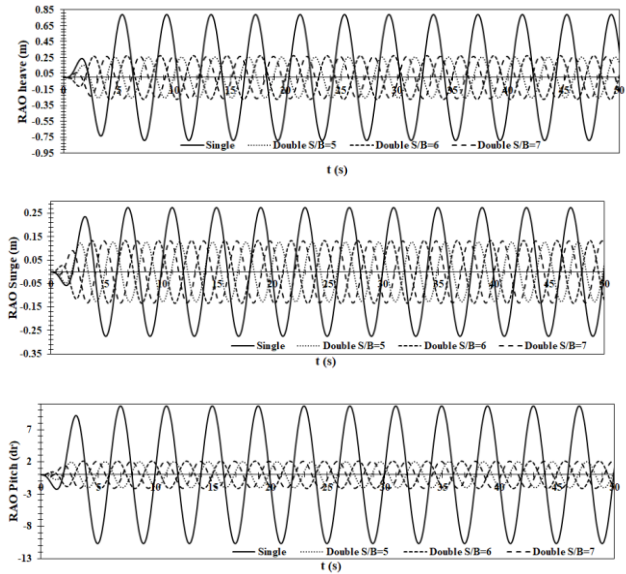


شکل ۱۷- نمودار ضریب انتقال موج سازه‌هایی با عمق غوطه‌وری متفاوت (۱/۵ تا ۳/۵) متر در حالت دو ردیفه



شکل ۱۵- نمودار ضریب انتقال موج، موج‌شکن شناور دو ردیفه

بررسی نمودار ضریب انتقال موج در شکل (۱۵) نشان داد، بکارگیری موج‌شکن شناور دو ردیفه در پریودهایی که موج‌شکن شناور تک آن عملکرد مناسبی دارد بر حسب پریود موج از میزان ۱۰ تا ۵۵ درصد باعث کاهش ضریب انتقال موج می‌شود. بطور کلی عملکرد موج‌شکن شناور دو ردیفه، در بیشتر موارد رابطه مستقیم با عملکرد موج‌شکن شناور آن سازه در حالت تک دارد.



شکل ۱۶- نمودار عملگرهای دامنه پاسخ موج‌شکن شناور دو ردیفه در پریود ۳ ثانیه

بررسی عملگرهای دامنه پاسخ نیز در شکل (۱۶) نشان داد، موج‌شکن شناور مستطیلی در حالت دو ردیفه بسته به عملکرد آن در میزان تضعیف موج باعث کاهش یا افزایش حرکات RAO سازه می‌شود، که طبق بررسی‌های صورت گرفته از نمودارهای شکل (۱۵) در پریودهای پایین (پریودهای ۳ و ۴ ثانیه)، حرکات هیدرودینامیکی سازه کاهش چشم‌گیری داشته است. بطور کلی می‌توان بیان کرد، عملکرد هیدرودینامیکی سازه بطور مستقیم وابسته به پریود موج و عملکرد موج‌شکن مزبور در حالت تک می‌باشد و نسبت S/B (تغییر فاصله‌ی بین ماژول‌ها دو موج‌شکن در حالت دو ردیفه) بر عملکرد هیدرودینامیکی سازه در پریودهای مختلف، تاثیری تا حدود ۱۰٪ دارد.

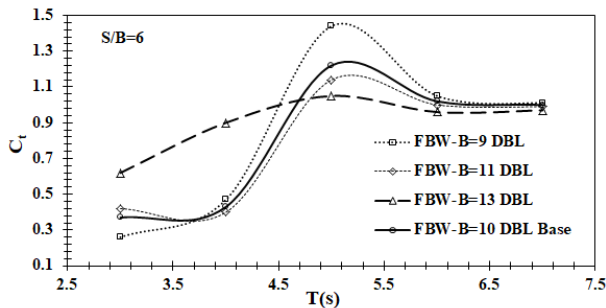
۴-۴-۱- بررسی تاثیر عمق غوطه‌وری در حالت دو ردیفه

این بخش از آنالیزهای صورت گرفته در زمینه بررسی تاثیرات عمق غوطه‌وری در حالت دو ردیفه موج‌شکن شناور، به وسیله سه

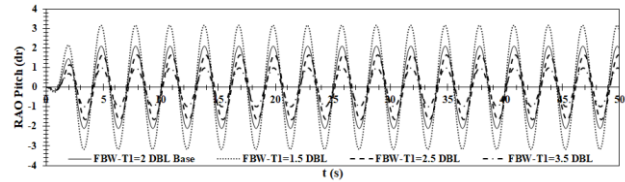
در حرکت Surge به میزان ۲۷٪ افزایش و در حرکت Pitch به میزان ۶۷٪ کاهش را شامل می‌شوند. همچنین بررسی عملکرد هیدرودینامیکی در پرپود ۵ ثانیه برای سازه‌هایی با عمق غوطه-وری (۱/۵ تا ۳/۵) متر براساس شکل (۱۹) نشان داد که در حرکت Heave به میزان ۵۸٪، در حرکت Surge نسبتاً یکسان و در حرکت Pitch ۶۰٪ تغییرات را نشان می‌دهد که از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کنند. بطور کلی می‌توان بیان کرد، علاوه بر بهبود عملکرد موج‌شکن شناور در حالت دوتایی نسبت به حالت تکی، تغییرات عمق غوطه‌وری در حالت دو ردیفه می‌تواند در مواردی بسته به طراحی هندسه سازه، باعث بهبود عملکرد ضریب انتقال موج و عملگرهای دامنه پاسخ سازه شود.

۲-۴-۴- بررسی تأثیر عرض سازه در حالت دو ردیفه

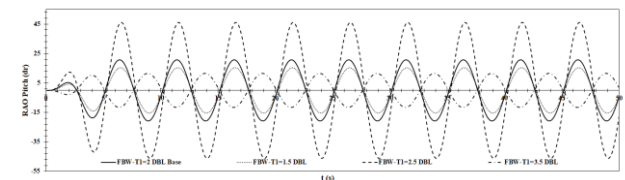
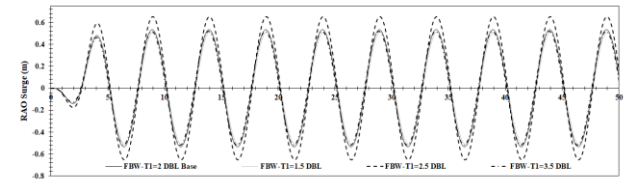
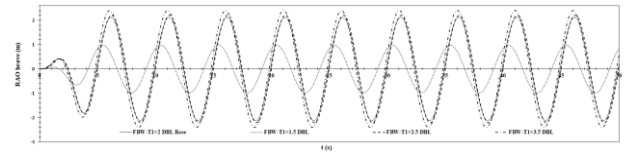
در این بخش به بررسی تأثیر پارامتر عرض سازه بر عملکرد موج-شکن شناور در حالت دو ردیفه با در نظر گرفتن $S/B=6$ تحت اثر امواجی با ارتفاع یک متر و پرپودهای (۳ تا ۷) ثانیه پرداخته شده است. مقایسه نمودارهای ضریب انتقال موج، عملگرهای دامنه پاسخ سازه و میزان تنش در کابل‌ها در مدلهای با عرض‌های در شکل‌های ۱۹ تا ۲۰ آورده شده است.



شکل ۲۰- نمودار ضریب انتقال موج سازه‌هایی با عرض‌های متفاوت در حالت دو ردیفه



شکل ۱۸- نمودار عملگرهای دامنه پاسخ سازه‌های با عمق غوطه‌وری متفاوت در حالت دو ردیفه در پرپود ۳ ثانیه

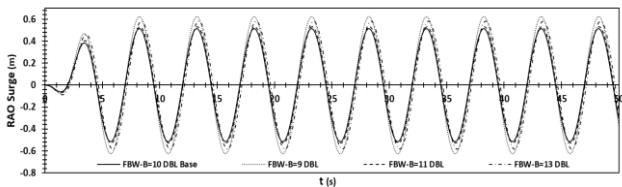
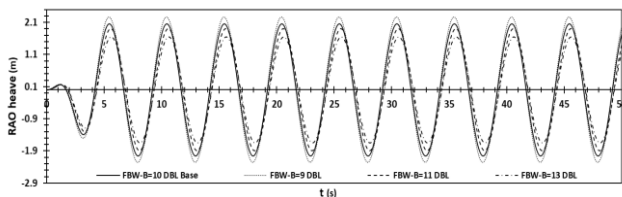


شکل ۱۹- نمودار عملگرهای دامنه پاسخ سازه‌های با عمق غوطه‌وری متفاوت در حالت دو ردیفه در پرپود ۵ ثانیه

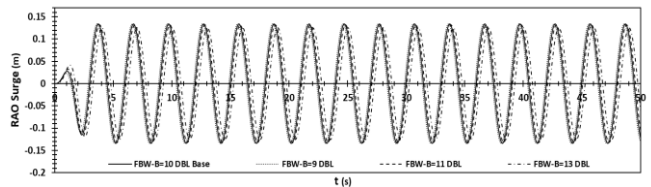
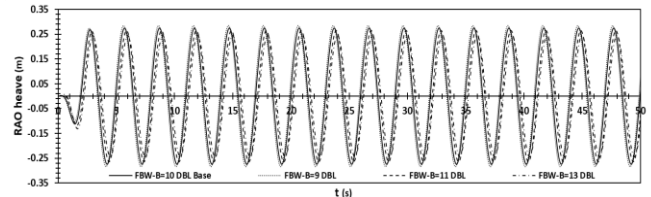
بررسی حالت دو ردیفه با عمق غوطه‌وری متفاوت نشان داد (شکل (۱۷))، موج‌شکن‌هایی با محدوده ابعاد غوطه‌وری (۱/۵ تا ۲/۵) متر ضریب انتقالی نسبتاً یکسان اما با اختلافی تا حدود ۲۵٪ در پرپود-های مختلف را شامل می‌شوند و عمق غوطه‌وری ۳/۵ متر بطور محسوسی بهترین عملکرد را در تضعیف موج در حالت دو ردیفه نشان می‌دهد.

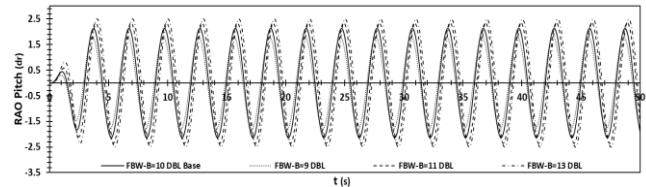
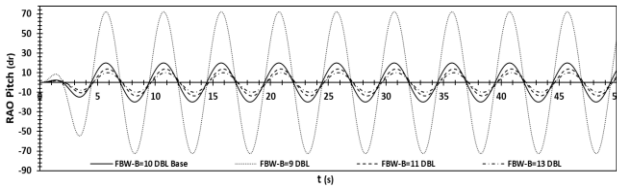
بررسی عملکرد هیدرودینامیکی سازه‌های مزبور براساس شکل (۱۸) نشان داد که در پرپود ۳ ثانیه تغییرات عمق غوطه‌وری از ابعاد ۱/۵ تا ۳/۵ متر در حرکت Heave به میزان ۱۴٪ افزایش،

RAO (T=5s)

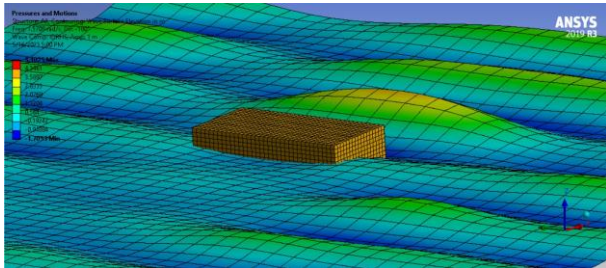


RAO (T=3s)

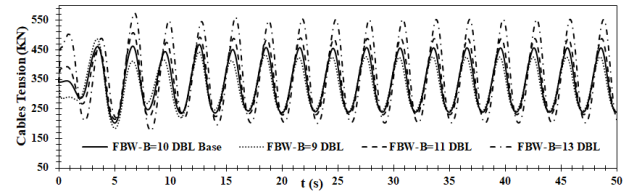




شکل ۲۱- نمودار عملگرهای دامنه پاسخ در سازه‌های با عرض‌های متفاوت در حالت دو ردیفه در پرپود ۳ و ۵ ثانیه



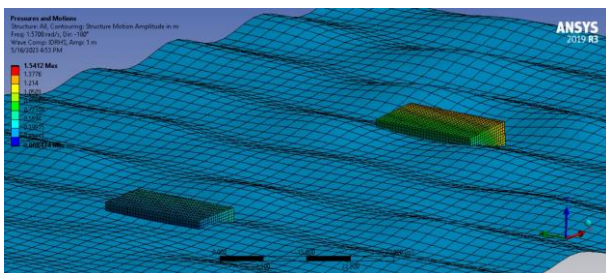
شکل ۲۳- کانتور ارتفاع امواج اطراف موج شکن شناور دو و تک ردیفه



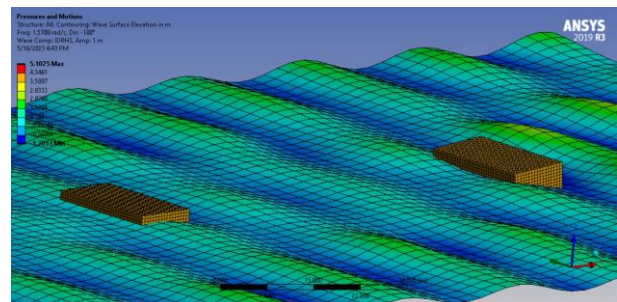
شکل ۲۲- نمودار تنش در کابل‌های مهار سازه‌های با عرض‌های متفاوت در حالت دو ردیفه در پرپود ۳

عملکرد موج شکن شناور به گونه‌ای 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 می‌گردد. اندازه‌گیری ارتفاع موج پشت سازه به منزله سنجش مستقیمی از راندمان موج شکن شناور در کاهش اثر موج است. شکل (۲۳) نمایش سه بعدی از کانتور ارتفاع امواج، اطراف موج شکن شناور مستطیلی در حالت دو و تک ردیفه می‌باشد که نشان می‌دهد، امواج تابشی پس از برخورد با هر ردیف از موج شکن‌های شناور، بخشی انرژی خود را از دست داده و موجی با ارتفاع کمتر به پشت موج شکن منتقل می‌گردد و از این نظر راندمان موج شکن‌های شناور دو ردیفه مناسبتر می‌باشد.

بررسی نمودار ضریب انتقال موج سازه‌های موج شکن شناور مستطیلی با عرض (۹ تا ۱۳) متر در شکل (۲۰) نشان داد که با ثابت نگهداشتن فاصله بین دو ماژول موج شکن‌های دو ردیفه (S) و ثابت بودن تمام شرایط مدلسازی به جز پارامتر عرض سازه نسبت به مدل مبنا (FBW-B=10 DBL Base)، تغییر عرض سازه موج شکن شناور از مقدار ۹ تا ۱۳ متر باعث تغییر عملکرد تضعیف موج، از میزان ۵ تا ۵۸٪ در حالت دو ردیفه می‌شود. بررسی عملگرهای دامنه پاسخ سازه در شکل (۲۱) نیز نشان داد، تغییرات عرض سازه موج شکن شناور از (۹ تا ۱۳) متر در حرکت Heave (در پرپود ۳ و ۵ ثانیه، ۲۴٪ کاهش)، در حرکت Surge (در پرپود ۳ ثانیه ۱۵٪ کاهش و در پرپود ۵ ثانیه ۱۸٪ تغییرات عملکرد بدون الگو) و در حرکت Pitch (در پرپود ۳ ثانیه ۲۸٪ افزایش و در پرپود ۵ ثانیه ۸۵٪ کاهش) را به دنبال دارد. بررسی تنش در کابل‌های مهار نشان داد (شکل (۲۲))، در حالت دو ردیفه در پرپود ۳ ثانیه، افزایش عرض سازه موج شکن شناور باعث افزایش تنش در کابل‌های مهار به میزان ۳۰٪ شده است.



شکل ۲۴- کانتور حرکات سازه موج شکن شناور دو ردیفه



شکل (۲۴) نمایش کانتور حرکات سازه موج شکن شناور مستطیلی دو ردیفه بر حسب نقطه‌ی مرکز جسم سازه می‌باشد که نشان می‌دهد، بیشترین میزان جابجایی سازه در راستای محور Z و حول محور Y می‌باشد و میزان تحرکات سازه بستگی به پارامترهای امواج تابشی و ابعاد و شکل هندسی مقطع موج شکن دارد.

3. Oumeraci, H., & Kortenhaus, A. (1994), *Analysis of the dynamic response of caisson breakwaters*. Coastal Engineering, 22(1-2), 159-183.
4. Williams, A. N., Lee, H. S., & Huang, Z. (2000), *Floating pontoon breakwaters*. Ocean Engineering, Vol.27(3), P.221-240.
5. Briggs, M., Ye, W., Demirbilek, Z., & Zhang, J. (2002), *Field and numerical comparisons of the RIBS floating breakwater*. Journal of Hydraulic Research, 40(3), 289-301.
6. 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, port, coastal, and ocean engineering, Vol.130(5), P. 243-255.
7. 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.
8. Peña, E., Ferreras, J., & Sanchez-Tembleque, F. (2011), *Experimental study on wave transmission coefficient, mooring lines and module connector forces with different designs of floating breakwaters*. Ocean Engineering, Vol.38(10), P.1150-1160.
9. Michailides, C., & Angelides, D. C. (2012), *Modeling of energy extraction and behavior of a Flexible Floating Breakwater*. Applied Ocean Research, 35, 77-94.
10. Sanayei, M., Shafieefar, M., Rezayi Mazik, A., (2015), *Effects of distance between pontoons on wave transmission coefficient of dual floating breakwaters*, Modares Civil Engineering journal, Vol. 15 , pp.107-116. (In Persian)
11. 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.
12. 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
13. Christensen, E. D., Bingham, H. B., Friis, A. P. S., Larsen, A. K., & Jensen, K. L. (2018), *An experimental and numerical study of floating*

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عددی تاثیر پارامترهای هندسی مقطع موج‌شکن شناور مستطیلی در حالت تک و دو ردیفه به صورت سه بعدی بر روی ضریب انتقال موج و عملگرهای دامنه پاسخ موج-شکن شناور در مدل عددی ANSYS-AQWA برای پریودهای موج در بازه ۳ تا ۷ ثانیه تحت اثر موج منظم، پرداخته شد که می‌توان به مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر اشاره کرد.

۱- بررسی تاثیر پارامتر عمق غوطه‌وری نشان داد که در پریودهای موج پایین (کمتر از ۴ ثانیه) سازه‌هایی با عمق غوطه‌وری کمتر، منجر به عملکرد مناسب‌تری تا میزان بیش از ۴۰٪ شده و در پریودهای بالای ۵ ثانیه، افزایش عمق غوطه‌وری باعث بهبود عملکرد موج‌شکن شناور شده است.

۲- افزایش عرض موج‌شکن شناور در تمام پریودهای موج (۳ تا ۷) ثانیه باعث کاهش تنش در کابل‌ها تا میزان بیش از (۱۵ تا ۲۸) درصد شده است.

۳- افزایش جرم سازه در پریودهای پایین باعث کاهش ضریب انتقال موج سازه تا میزان ۲۷٪ و کاهش عملگرهای دامنه پاسخ سازه شده است و کاهش جرم سازه در پریودهای بالا با وجود عملکرد ضعیف سازه، باعث کاهش ضریب انتقال موج تا میزان ۴۴٪ و کاهش عملگرهای دامنه پاسخ سازه شده است.

۴- موج‌شکن‌های شناور دو ردیفه با عمق غوطه‌وری بیشتر، عملکرد بهتری در تضعیف موج را نشان داده است و در برابر امواجی با پریودهای پایین، با افزایش عمق غوطه‌وری موج‌شکن شناور دو ردیفه، حرکات Surge و Heave و Pitch آن تا ۶۷٪ کاهش را نشان داده است.

۵- براساس آنالیزهای انجام شده در این تحقیق در بررسی ضریب انتقال موج، موج‌شکن‌های شناور با نسبت ارتفاع سازه به عرض سازه $H_b/B = 0.35$ تا 0.45 بهترین عملکرد را دارند.

۶- منابع

1. McCartney, B. L. (1985), *Floating breakwater design*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.111(2), P.304-318.
2. Burgers, R. W. J. (1993), *Vryhof floating breakwater: A Preliminary Study on Wave Attenuation and Mooring Forces*, Vol.1.

20. Samaei, S. R., Azarsina, F., Ghahferokhi, M. A., (2016), *Numerical simulation of floating pontoon breakwater with ANSYS AQWA software and validation of the results with laboratory data*, Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, Vol.85, pp.1487-1499.
21. Masoudi, E., Zeraatgar, H., (2017), *Hydrodynamic analysis of various cross sections of floating breakwaters*, In Proceedings of 7th international offshore industries conference (Sharif University of technology, Tehran, Iran) pp.82.
22. Rezaie Mazyak, A., Sanayei, M., Shafieefar, M., Panahi, R., (2017), *Pattern of Wave Height Changes Around of Pontoon's Floating Breakwater*, Journal of Marine Science and Technology, Vol.16, pp. 29-45.
23. Shahrabi, M., & Bargi, Kh., (2019), *Enhancement the Fatigue Life of Floating Breakwater Mooring System Using Tuned Liquid Column Damper*, Latin American Journal of Solids and Structures, Vol.16, pp. 1-23, 2019.
24. Masoudi, E., & Gan, L., (2021), *Diffraction waves on general two-legged rectangular floating breakwaters*, Ocean Engineering, Vol.235, 109420, pp. 1-9.
25. Cebada-Relea, A. J., López, M., & Aenlle, M., (2022), *Time-domain numerical modelling of the connector forces in a modular pontoon floating breakwater under regular and irregular oblique waves*, Ocean Engineering, Vol.243, pp. 110263, pp. 1-9.
- breakwaters. Coastal Engineering Vol.137, P.43-58.
14. Deng, Z., Wang, L., Zhao, X., & Huang, Z. (2019), *Hydrodynamic performance of a T-shaped floating breakwater*. Applied Ocean Research, 82, 325-336.
15. 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.
16. 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, P.108450.
17. Yang, Z., Ji, X., Xie, M., Li, J., Zhang, H., & Wang, D. (2021), *Experimental study on the dynamic response of a water ballast type floating breakwater*. Ocean Engineering, Vol.233, p.109012.
18. 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.
19. Rajabi, M., Ghassemi, H, (2021), *Hydrodynamic performance improvement of double-row floating breakwaters by changing the cross-sectional geometry*, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2021, Article ID 2944466, 21 pages