



Numerical investigation of the effect of geometric and hydrodynamic parameters of waves on the performance of rectangular floating pontoon breakwater structure

Mehdi Azami¹ , Morteza Bakhtiari^{2✉} , Hossein Bahrami³ 

¹ M.Sc. Graduated of Coastal engineering of ports and marine structures, Department of Marine structure, Khorramshahr university of marine science technology, Khorramshahr, Iran. E-mail: mehdi_azami69@yahoo.com

² Corresponding Author, Associate Professor, Department of Marine structure, Khorramshahr university of marine science technology, Khorramshahr, Iran. E-mail: bakhtiari@kmsu.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Marine structure, Khorramshahr university of marine science technology, Khorramshahr, Iran. E-mail: hossein_bahrami1979@yahoo.com

ABSTRACT

Introduction

Considering that pontoon breakwaters are among the most common floating breakwaters, which have many advantages over other types of fixed breakwaters, these types of breakwaters are used in many recreational ports today. These breakwaters consist of a number of separate pontoons connected to each other, which are usually made of reinforced concrete. The structural design of breakwater parts is done in such a way that its assembly is easy and cheap. The parts of this breakwater can be separated and transported more easily than other breakwaters. Pontoon breakwaters have advantages over other floating breakwaters. A review of past research shows that regarding different types of breakwater structures, various studies have been carried out in both numerical and laboratory (field) studies departments inside and outside the country, and most of the researches have been conducted after investigating the effect of parameters has been effective on the design of this breakwater, while in the present research, a sample of the designed breakwater has been exposed to waves and the effect of these waves on the various displacements of the structure has been investigated.

Methods and materials

In this research, ANSYS AQWA software was used and the analyzes were performed in the form of hydrostatic analysis and time history analysis by applying the 20-year average wave conditions of the region and time history analysis under the conditions of regional limit waves. AQWA software was developed around 1984 by WS Atkins to analyze and evaluate offshore and offshore structures. This software has the ability to create a mesh automatically, and you can also draw the geometry of the structure in CAD software such as CATIA and Solidworks and then import it into this software. Of course, this software has been purchased by ANSYS since 2008 and now it can be used under one of ANSYS software modules. AQWA deals with the hydrodynamic simulation of marine engineering problems such as oil platforms, marine structures, wave motion, etc. and includes two modules, Hydrodynamic Diffraction and Hydrodynamic Time Response.

Results

The results of this research show that the highest amount of displacement occurred in the Heave movement (wave period of 6 seconds) and the lowest amount of displacement occurred in the Surge movement (wave period of 2 seconds). Also, the results show that the amount of rotation around the Z and Y axes against The rotation around the X axis is very small, even the maximum values of the rotation around the Y and Z axes are lower than the minimum rotation around the X axis with a value of 6.7504e-05 (°/m) which occurs in a period of 2 seconds

Keywords: Floating Breakwater, Geometric Parameters, Wave Hydrodynamic, ANSYS AQWA, Heave

Article Type: Research Article

Article history: Received: 19 March 2023 Revised: 01 June 2023 Accepted: 13 June 2023 ePublished: 27 June 2023

Cite this article: Azami, M., Bakhtiari, M., & Bahrami, Hossein. (2023). Numerical investigation of the effect of geometric and hydrodynamic parameters of waves on the performance of rectangular floating pontoon breakwater structure, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(1), 42-60. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9049.1049





فناوری های پیشرفته در بهره وری آب



شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

وبگاه نشریه: <https://atwe.razi.ac.ir>

بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرودینامیک امواج بر عملکرد سازه موج شکن شناور پانتونی مستطیلی

مهدی اعظمی^۱، مرتضی بختیاری^۲، حسین بهرامی^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سواحل بنادر و سازه‌های دریایی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: mehdi_azami69@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه سازه‌های دریایی دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: bakhtiari@kmsu.ac.ir

^۳ استادیار گروه سازه‌های دریایی دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: hossein_bahrami1979@yahoo.com

چکیده

یکی از سازه‌های بسیار مهم در حوزه مهندسی سواحل، موج شکن‌ها می‌باشند که به منظور و اهداف مختلفی ساخته می‌شوند. موج شکن‌های پانتونی از جمله متداول‌ترین موج شکن‌های شناور بوده که نسبت به سایر انواع موج شکن‌های ثابت دارای مزایای فراوانی از جمله اقتصادی بودن و همچنین کارایی بالا می‌باشند. در تحقیق حاضر به مطالعه عملکرد موج شکن پانتونی با مقطع مستطیلی تحت شرایط امواج دریای خزر با دوره بازگشت ۲۰ ساله پرداخته شده است. به منظور انجام تحقیق حاضر از نرم افزار ANSYS AQWA با مقیاس مدل‌های آزمایشگاهی ۱:۵۰ برای مدل سازی استفاده شده است. پس از اجرای مدل‌ها بر اساس سناریوهای مختلف تحلیل‌ها، به صورت هیدرواستاتیک و تحلیل تاریخچه زمانی با اعمال شرایط موج متوسط منطقه و تحلیل تاریخچه زمانی تحت شرایط امواج حدى منطقه انجام گرفته است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد در شرایط تحلیل هیدرواستاتیک بیشترین میزان جابجایی را در حرکت Heave (بالا و پایین رفتن شناور)، و کمترین میزان جابجایی را در حرکت Surge (چپ و راست رفتن شناور) که بسیار ناچیز است، رخ داده است. جابجایی در حرکت Heave تحت پیوند موج ۶ ثانیه دارای بیشترین مقدار (۱/۶۱ متر) و در پیوند ۲ ثانیه دارای کمترین مقدار است همچنین در همین شرایط تحلیل میزان دوران حول محورهای Z و Y در برابر دوران حول محور X بسیار کمتر بوده و مقادیر بیشینه دوران حول محورهای Y و Z از مینیمم دوران حول محور X با مقدار $6.7e-05$ ($^{\circ}/m$) که در پیوند ۲ ثانیه اتفاق می‌افتد، کمتر است.

واژه های کلیدی: موج شکن شناور، پارامترهای هندسی، هیدرودینامیک امواج، نرم افزار آنسیس، بالا و پایین رفتن شناور

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۸ اسفند ۱۴۰۱ اصلاح: ۱۱ خرداد ۱۴۰۲ پذیرش: ۲۳ خرداد ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۳ خرداد ۱۴۰۲

استناد: اعظمی، مهدی،، بختیاری، مرتضی،، و بهرامی، حسین. (۱۴۰۲). بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرودینامیک امواج بر

عملکرد سازه موج شکن شناور پانتونی مستطیلی، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، (۱)۳، ۴۲-۶۰، شناسه دیجیتال:

10.22126/ATWE.2023.9049.1049



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

موج‌شکن‌های شناور پانتونی یکی از معمول‌ترین نوع موج‌شکن‌های شناور است. امروزه در بسیاری از بندرهای تفریحی از این نوع موج‌شکن‌ها استفاده می‌شود. این موج‌شکن‌ها شامل تعدادی پانتون مجزای متصل شده به یکدیگر هستند که معمولاً از بتن مسلح ساخته شده‌اند. طراحی سازه‌های قطعات موج‌شکن به گونه‌ای انجام می‌شود که مونتاژ آن آسان و ارزان قیمت باشد. قطعات این موج‌شکن راحت‌تر از موج‌شکن‌های دیگر از یکدیگر جدا شده و حمل می‌گردد. موج‌شکن‌های پانتونی دارای مزایایی نسبت به سایر موج‌شکن‌های شناور هستند، از جمله آن که انتقال این شناورها آسان است. موج‌شکن‌های پانتونی از تعدادی المان‌های شناور مجزا که به هم متصل شده‌اند ساخته شده است. چنانچه نیاز باشد می‌توان با جدا کردن المان‌ها از هم، آن‌ها را به مکانی که مورد نیاز است، منتقل نمود و حتی می‌توان با اتصال المان‌های دیگر، ترکیب‌بندی جدیدی را به وجود آورد. موج‌شکن‌های پانتونی سازه‌های نسبتاً ایمنی هستند که در صورت آسیب‌دیدگی یک یا چند پانتون محدود در اثر سوراخ شدن و نفوذ آب به درون آن‌ها، پانتون‌های مجاور شناوری کافی را برای کل سازه تأمین خواهند کرد. این شناورها دارای طول عمر مفید ۱۰۰ سال می‌باشند و حتی بعد از ۳۰ تا ۵۰ سال می‌توانند برای ساخت شناورهای دیگر در ساحل یا فراساحل به کار روند، بنابراین یکی از دلایل اصلی استفاده از این سازه‌ها می‌تواند طول عمر مفید زیاد آن‌ها باشد. سازه‌های پانتونی سطح مرطوب وسیع و مرکز جرم کوتاهی دارند. معمولاً بسیار پایدار هستند و برای آب‌های کم‌عمق و عمیق کاربرد دارند. با توجه به مطالب بیان شده و نظر به اهمیت بهره‌برداری از سواحل، تحقیقات در خصوص جنبه‌های مختلف مهندسی سواحل به خصوص سازه‌های ساحلی موضوع تحقیق محققین مختلف بوده است. در خصوص انواع مختلف سازه موج‌شکن، از گذشته تاکنون تحقیقات مختلفی در دو بخش مطالعات عددی و آزمایشگاهی (میدانی) در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در این بخش به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود تا در نهایت لزوم انجام تحقیق حاضر در مقایسه با تحقیقات گذشته تبیین گردد (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۴).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بررسی‌های به عمل آمده بر روی هندسه مقطع نشان می‌دهد، موج‌شکن‌های با مقطع مستطیلی عملکرد بهتری نسبت به سایر انواع مقاطع دایره‌ای، مثلثی در کاهش ارتفاع امواج و ضریب آب‌گذری دارند همچنین استفاده از موج‌شکن مستطیلی با نصب تیغه اضافی (بیرون‌زدگی صفحه پایینی) عملکرد بهتری نسبت به مقاطع ساده دارند (ساتکو^۱ و هایدن^۲ ۱۹۷۴، کاتاندوس و همکاران^۳ ۲۰۰۹). در خصوص سیستم مهاربندی موج‌شکن‌های شناور بررسی‌ها نشان می‌دهد چینه‌سازها و همچنین نوع سیستم مهاربندی تأثیر بسیار زیادی در پایداری سازه و عملکرد سازه داشته است (یاماموتو و همکاران^۴ ۱۹۸۰، مارتینلی^۵ و همکاران ۲۰۰۸، اوزرن^۶ ۲۰۰۹). خلیلی و شفیع‌فر (۱۳۸۹)، در پژوهشی به بهینه‌سازی هندسه موج‌شکن شناور پانتونی برای افزایش راندمان آن پرداختند.

در مطالعه عددی انجام شده، ابتدا به بررسی میزان راندمان موج‌شکن شناور پانتونی با شکل مکعب مستطیل پرداخته و حساسیت راندمان موج‌شکن به مقادیر مختلف عمق آب‌خور، عرض موج‌شکن و مهاربندی در برابر امواج نامنظم دریا با مشخصات مختلف ارتفاع، پریود و زاویه موج برخوردی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد موج‌شکن شناور پانتونی از نرم‌افزار Moses استفاده گردیده است. پس از انجام مطالعات بر عملکرد موج‌شکن شناور پانتونی، به بررسی بهینه‌سازی هندسه موج‌شکن شناور پانتونی برای افزایش راندمان پرداخته شده است. هدف از بهینه‌سازی انجام شده، کمینه کردن میزان عبور موج از موج‌شکن (افزایش راندمان موج‌شکن) است. روش بهینه‌سازی بکار رفته در این تحقیق الگوریتم ژنتیک است.

¹ Sutko

² Haden

³ Koutandos et al

⁴ Yamamoto

⁵ Martinelli et al

⁶ Ozeren

حجتی و همکاران ۲۰۱۹، در تحقیقی به مطالعه عملکرد موجشکن‌های جفت و مستغرق شناور با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات صاف پرداختند. در این تحقیق عملکرد سازه در برابر امواج سینوسی شکل با دوره تناوب کمتر از ۳ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد حضور موجشکن‌های شناور در مجاورت موجشکن‌های مغروق کمک زیادی به پایداری فشار و کاهش نوسانات می‌نماید. همچنین نتایج نشان می‌دهد جابجایی Heave عملکرد بهتری نسبت به حرکت دورانی Sway (چپ و راست رفتن شناور) دارد. وو و همکاران^۱ (۲۰۲۲) طرح جدیدی از یک موجشکن با سطح آزاد را به منظور استهلاک امواج مورد بررسی قرار دادند. این سازه از دو بخش ثابت با مقطع مستطیلی و یک بخش اضافی نفوذپذیر (مشبک) مستطیلی شکل تشکیل شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد با لحاظ نمودن بخش نفوذپذیر (مشبک) کارایی سازه به نحوه قابل توجهی افزایش می‌یابد. گائو و همکاران^۲ (۲۰۲۲)، در یک تحقیق به مطالعه تحلیلی مدل موجشکن مشبک با استفاده از تئوری امواج خطی پرداختند. ایشان با استفاده از معادله مرتبه دوم گرین یک معادله با شیب ملایم برای مطالعه امواج مورب برخوردی به سازه مشبک استفاده نمودند. نتایج حاصل از تحقیق مطابقت بسیار خوب نتایج مدل تحلیلی با تحقیقات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل شده شامل انعکاس و استهلاک امواج و در نتیجه کاهش نیروی وارده بر سازه بوده است که در حالت طرح جدید موجشکن مستغرق مشبک کارایی مناسبی داشته است. بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد عمده تحقیقات صورت گرفته در قالب تحقیقات آزمایشگاهی بوده و بیشتر در حد شناخت پدیده‌ها بوده است و در نتیجه با لحاظ نمودن این محدودیت نتایج کاربردی استخراج نشده است. بر این اساس و باهدف رفع نواقص تحقیقاتی گذشته اقدام به مطالعه عددی عملکرد سازه موجشکن شناور با در نظر گرفتن نسبت مقیاسی مناسب از یک طرح واقعی موجشکن و همچنین لحاظ نمودن داده‌های ۲۰ ساله امواج دریای خزر در شرایط مدل‌سازی شده است.

مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد در خصوص انواع مختلف سازه موجشکن، از گذشته تاکنون مطالعات مختلفی در دو بخش مطالعات عددی و آزمایشگاهی (میدانی) در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که عمده تحقیقات انجام شده به دنبال بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر بر طراحی این موجشکن بوده است در حالیکه در تحقیق حاضر نمونه‌ای از موجشکن طراحی شده در معرض امواج قرار گرفته است و تأثیر این امواج بر روی جابجایی‌های مختلف سازه مورد بررسی قرار گرفته است.

روش پژوهش

همان‌گونه که بیان گردید هدف از تحقیق حاضر بررسی عملکرد سازه موجشکن شناور با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA است. به منظور مدل‌سازی‌ها از داده‌های امواج با دوره بازگشت ۲۰ ساله استفاده شده است. لذا در این بخش تحقیق ابتدا به معرفی منطقه مورد نظر و داده‌های مورد استفاده و سپس به معرفی نرم‌افزار یاد شده پرداخته شده است.

تئوری حاکم بر تحقیق

به منظور استخراج روابط حاکم بر تحقیق حاضر هیدرودینامیک موجشکن‌های شناور در قالب شرایط مرزی مربوطه بیان می‌گردد.

شرایط مرزی مربوط به موجشکن‌های شناور

- شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد:

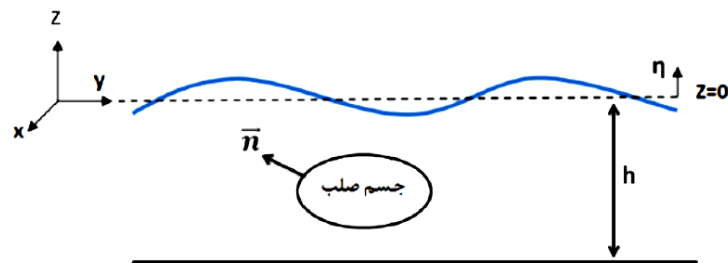
¹ Wu et al

² Guo et al

در شکل (۱) پارامترهای شرایط مرزی نشان داده شده است. فشار در سطح آزاد آب ($\eta=Z$) برابر با فشار اتمسفر است. از آنجاکه امواج با تیزی نسبی کوچک در نظر گرفته می شوند، معادله برنولی برای یک جریان غیر چرخشی غیر استاتیکی به صورت زیر درمی آید:

(۱)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] = 0 \rightarrow Z = \eta$$



شکل ۱. تعریف پارامترهای شرایط مرزی تئوری تفرق-انتشار

- شرط مرزی سینماتیکی سطح آزاد:

سرعت قائم ذره آب در سطح آزاد سیال برابر با سرعت قائم خود سیال است. این توضیح منجر به معادله زیر می گردد:

(۲)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \rightarrow z=0$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \rightarrow z=0$$

- شرط مرزی بستر دریا:

بر اساس این شرط مبادله انرژی قائم در بستر دریا غیرممکن فرض می گردد؛ بنابراین با فرض افقی بودن بستر دریا، سرعت قائم ذرات آب در بستر دریا صفر در نظر گرفته می شود.

(۳)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \rightarrow z=-h$$

در شرایط آب عمیق، امواج آب عمیق از اصطکاک بستر تأثیر نمی پذیرند و معادله به صورت زیر بسط می یابد:

(۴)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad \text{for } z=-h$$

• شرط مرزی سینماتیکی روی سطح جسم شناور:

سرعت یک ذره آب در یک نقطه در سطح جسم معادل با سرعت نقطه‌ای خود این جسم است.

(۵)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{v} \cdot \vec{n}$$

که در این رابطه \vec{V} سرعت یک نقطه از بدنه و \vec{n} بردار نرمال بدنه است که جهت مثبت آن به سمت سیال است. این شرط به دلیل حصول اطمینان از عدم نشت در بدنه لحاظ می‌گردد.

• شرط تابش:

حرکت جسم و پتانسیل‌های تفرق باید شرط تابش را تأمین کنند. شرط تابش بیان می‌دارد هنگامی که فاصله از جسم نوسان کننده افزایش می‌یابد، مقدار پتانسیل به سمت صفر میل می‌کند:

(۶)

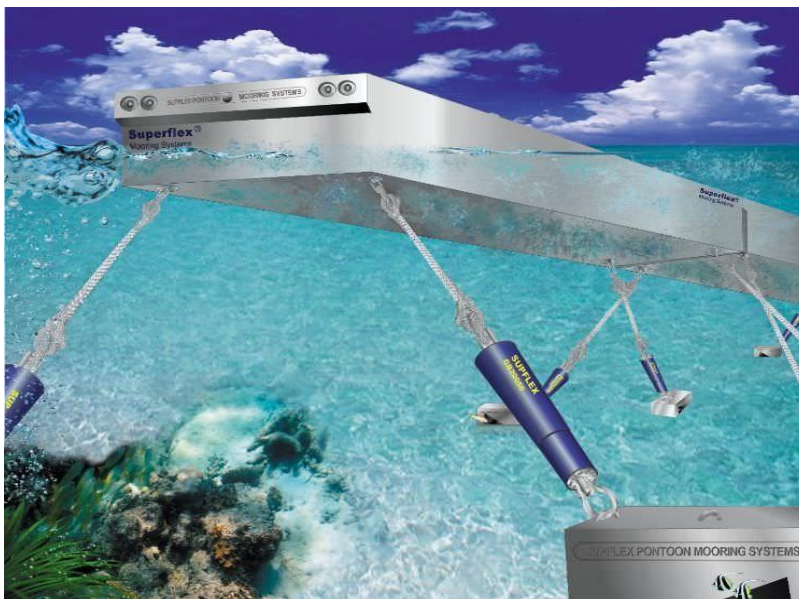
$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial}{\partial R} \pm i\lambda \right) \phi_{r+d} = 0$$

اطلاعات و داده‌های مورد استفاده

مجموعه اطلاعات و داده‌های مورد استفاده برای انجام پژوهش که مربوط به هندسه و مشخصات سازه‌ای موجشکن شناور و اطلاعات مربوط به محل انجام شبیه‌سازی هیدرودینامیکی است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

اطلاعات مربوط به سازه موجشکن شناور

در شکل (۲) تصویر شماتیک از یک نمونه موجشکن پانتونی و در شکل (۳) مشخصات هندسی سازه موجشکن مورد مطالعه ارائه شده است. در طرح‌های مورد مطالعه بعد سوم مطابق نمونه آزمایشگاهی برابر ۸۵ سانتیمتر انتخاب شده است همچنین در شبیه‌سازی آن‌ها، آب‌خور نمونه‌ها ثابت و برابر هشت سانتیمتر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است مقیاس مدل‌های آزمایشگاهی ۱:۵۰ است.



شکل ۲. طرح شماتیک موج شکن پانتونی شناور

1	شماره مدل
	هندسه مدل
$\rho=500 \text{ Kg/m}^3$	مشخصات مدل

شکل ۳. مشخصات هندسی سازه موج شکن شناور با مقیاس ۱:۵۰ (ابعاد به متر)

داده‌ها و اطلاعات مربوط به منطقه مورد مطالعه

برای انجام پژوهش با بهره‌گیری از اطلاعات موج دریای خزر اقدام به مدل‌سازی شرایط هیدرودینامیکی در نرم‌افزار شده است. موقعیت مکانی محل قرارگیری سازه موج شکن در طول جغرافیایی ۴۹.۴۵۶۸ و عرض ۳۷.۴۹۸۷۶ است. عمق آب نیز ۱۰ متر است. مشخصات موج منطقه که با استفاده از توزیع گامبل محاسبه شده است، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات موج منطقه مورد مطالعه

	H_s	T_p	Dir
حالت حدی	۳/۶	۸/۵۶	۴۶
امواج ۲۰ ساله	۰/۴۸۳۴۳۱	۴/۵	۱۰۱/۳

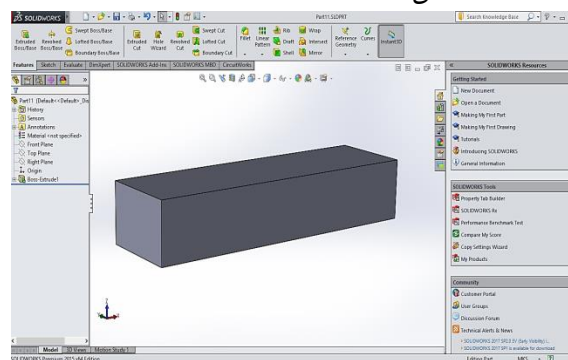
در جدول فوق پارامتر H_s ارتفاع موج شاخص، T_p دوره تناوب موج و Dir زاویه موج می‌باشد.

نرم‌افزار ANSYS AQWA

نرم‌افزار AQWA در حدود سال ۱۹۸۴ برای تحلیل و ارزیابی سازه‌های دریایی و دور از ساحل توسط WS Atkins گسترش یافت. این نرم‌افزار قابلیت ایجاد مش به صورت خودکار را دارد و همچنین می‌توان هندسه سازه را در نرم‌افزارهای CAD نظیر CATIA و Solidworks رسم کرد و سپس وارد این نرم‌افزار نمود. البته این نرم‌افزار از سال ۲۰۰۸ توسط شرکت ANSYS خریداری شده و اکنون تحت یکی از ماژول‌های نرم‌افزار ANSYS قابل کاربرد است. AQWA به شبیه‌سازی هیدرودینامیکی مسائل مهندسی دریایی از قبیل سکوه‌های نفتی، سازه‌های دریایی، حرکت امواج و... می‌پردازد و شامل دو ماژول Hydrodynamic Diffraction و Hydrodynamic Time Response است.

مدل‌سازی هندسه موج‌شکن در Solidworks

با توجه به اطلاعات ارائه شده مربوط به مدل آزمایشگاهی سازه موج‌شکن اقدام به مدل‌سازی هندسی با توجه به مقیاس ۱:۵۰ گردید. در شکل ۴ هندسه مقطع ترسیم شده در نرم‌افزار Solidworks نشان داده شده است.



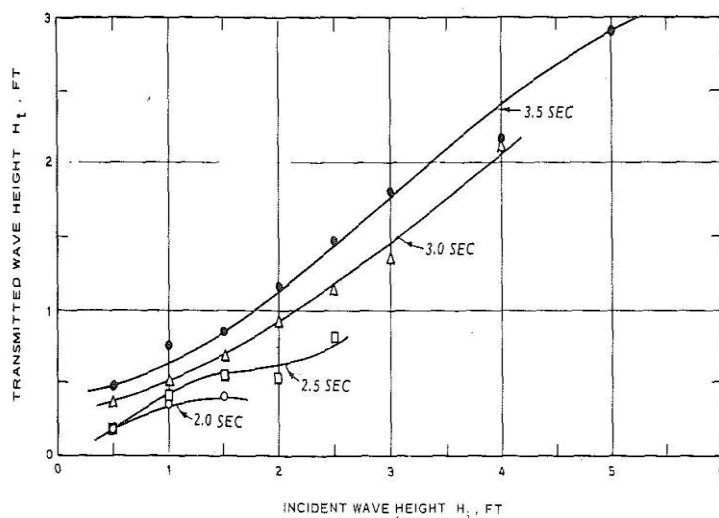
شکل ۴. هندسه مدل

شبیه‌سازی هیدرودینامیکی در نرم‌افزار ANSYS AQWA

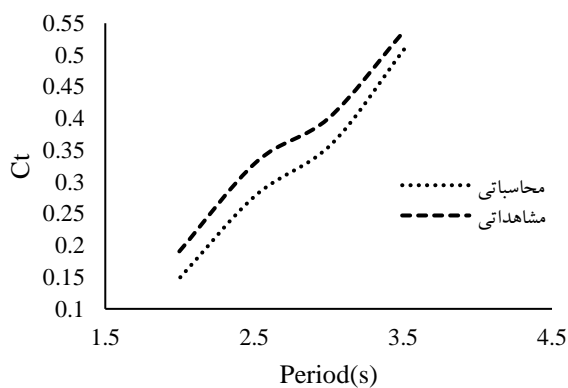
در نرم‌افزار ANSYS برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی مسائل مهندسی دریایی از ماژول AQWA که شامل دو بخش Hydrodynamic Diffraction و Hydrodynamic Time Response است، استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی شرایط هیدرودینامیکی برای موج‌شکن شناور ابتدا شرایط کلی مدسازی را تحت ماژول Hydrodynamic Diffraction برای سازه تبیین کرده و پس از تحلیل موج‌شکن در این ماژول و گرفتن خروجی‌های مختلف، عملکرد سازه را در حالت کلی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. در ماژول Hydrodynamic Time Response عملکرد سازه در بازه زمانی معرفی شده و تحت شرایط بارگذاری موج قرار می‌گیرد. در این ماژول سازه در دو حالت مورد بارگذاری تحت شرایط منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در حالت اول با اعمال میانگین امواج ۲۰ ساله‌ی منطقه مورد مطالعه، سازه تحت این شرایط مورد بارگذاری موج و در حالت دوم سازه تحت شرایط بارگذاری حدی قرار داده شده و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور صحت‌سنجی و کالیبراسیون مدل عددی تهیه‌شده در نرم‌افزار، از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی مک کارتنی^۱ ۱۹۸۵ استفاده گردید. در شکل (۵) نتایج حاصل‌شده از آزمایش‌های انجام‌شده مک کارتنی ۱۹۸۵ بر روی موج‌شکن پانتونی نشان داده شده است. با استفاده از نمودار ارائه شده ضریب انتقال (C_t) مدل آزمایشگاهی را در یک ارتفاع موج ثابت برای پریودهای ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ محاسبه شده است. سپس شرایط موج را بر موج‌شکن مدل‌سازی شده در نرم‌افزار انسیس اعمال کرده و ضریب انتقال را برای آن نیز به‌دست آورده است. نتایج حاصل از صحت‌سنجی در شکل (۶) ارائه شده است. متوسط اختلاف نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی ۱۲/۵٪ است.



شکل ۵. نتایج آزمایشگاهی ارتفاع موج تابیده‌شده به موج عبوری (McCartney (1985)



شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی

¹ McCartney

یافته‌ها

در این بخش نتایج به‌دست‌آمده حاصل از تحقیق که شامل سه حالت تحلیل هیدرواستاتیکی، تحلیل تاریخچه زمانی با اعمال شرایط موج میانگین ۲۰ ساله‌ی منطقه و تحلیل تاریخچه زمانی با اعمال شرایط موج حدی منطقه مورد مطالعه بوده و بحث در خصوص این نتایج ارائه می‌گردد.

نتایج به‌دست آمده در ماژول Hydrodynamic Diffraction

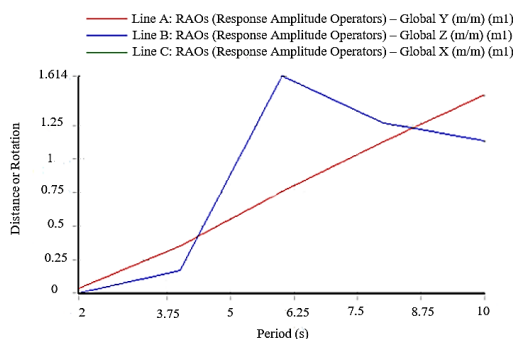
به‌منظور شبیه‌سازی شرایط هیدرودینامیکی برای موج‌شکن شناور ابتدا شرایط کلی مدسازی را تحت ماژول Hydrodynamic Diffraction برای سازه تبیین گردید.

تحلیل هیدرواستاتیکی

در تحلیل هیدرواستاتیکی سازه موج‌شکن از لحاظ پایداری در برابر بارهای ثقلی و شناوری تحلیل می‌شود. از جمله خروجی‌های مهم در این قسمت می‌توان به‌سختی هیدرواستاتیکی، پارامترهای جابجایی هیدرواستاتیکی، خصوصیات پهنه‌ی آبی و پارامترهای پایداری اشاره نمود.

میزان جابجایی Surge و Sway و Heave بر اساس پریود

شکل (۷)، میزان جابجایی سازه برحسب پریود موج را در راستای سه محور X و Y و Z تحت موج تابیده‌شده با زاویه 90° درجه، نشان می‌دهد.

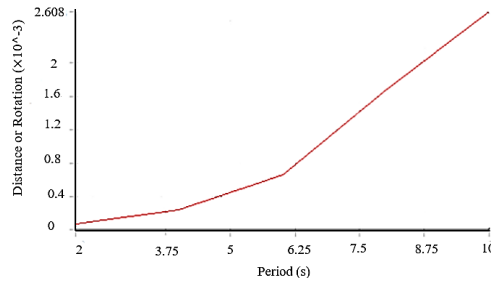


شکل ۷. میزان جابجایی در امتداد X و Y و Z بر اساس پریود

بیشترین میزان جابجایی را در حرکت Heave و کمترین میزان جابجایی را در حرکت Surge که بسیار ناچیز است رخ داده است. جابجایی در حرکت Heave تحت پریود موج ۶ ثانیه دارای بیشترین مقدار (۱/۶۱۴۲ متر) و در پریود ۲ ثانیه دارای کمترین مقدار است. میزان جابجایی در حرکت Sway نیز همواره با افزایش پریود به‌صورت خطی افزایش می‌یابد لذا در پریود ۱۰ ثانیه شاهد بیشترین میزان جابجایی در این حرکت به مقدار ۱/۴۷۶۴ متر هستیم. دلیل ناچیز بودن جابجایی در راستای X ، جهت موج برخوردی است که عمود بر محور طولی موج‌شکن است.

میزان دوران در حرکت Roll (چپ شدن شناور) و Pitch (اوج گرفتن شناور) و Yaw (پیچیدن شناور) بر اساس پریود

در شکل (۸)، میزان دوران سازه پریود موج برخوردی را حول محورهای X ، Y ، Z نشان داده شده است.

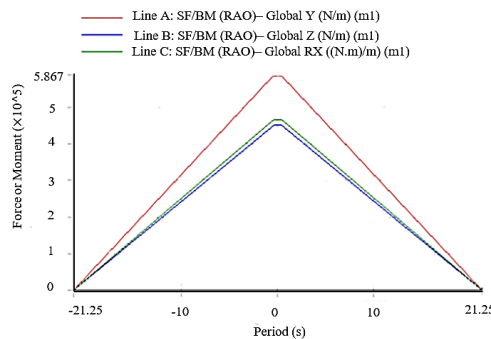


شکل ۸. میزان دوران حول X و Y و Z بر اساس پریود

دوران حول محورهای مربوطه حاصل از موجی است که با زاویه‌ی ۹۰ درجه به سازه برخورد کرده است به همین دلیل میزان دوران حول محورهای Z و Y در برابر دوران حول محور X بسیار ناچیز است حتی مقادیر بیشینه دوران حول محورهای Y و Z از مینیمم دوران حول محور X با مقدار 6.7504×10^{-5} ($^{\circ}/m$) که در پریود ۲ ثانیه اتفاق می‌افتد نیز کمتر است. میزان دوران حول محور X با افزایش پریود زیاد شده و در پریود ۱۰ ثانیه بیشترین میزان دوران به مقدار 2.6082×10^{-3} ($^{\circ}/m$) رخ داده است.

تغییرات نیروی برشی و گشتاور خمشی در طول سازه

شکل (۹)، تغییرات نیروی برشی در امتداد Y و Z و گشتاور خمشی حول X را در امتداد طولی سازه نشان می‌دهد.

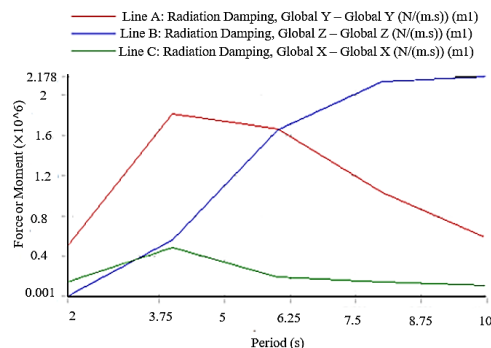


شکل ۹. تغییرات نیروی برشی و گشتاور خمشی در طول سازه

همان‌گونه که از نمودار مشخص است که بیشینه مقادیر فوق در مرکز موج شکن رخ خواهد داد و در گوشه‌های انتهایی سازه این مقادیر صفر خواهند شد. بیشترین مقدار نیروی برشی در امتداد محور Y اتفاق می‌افتد که مقدار آن $5/867 \times 10^5$ نیوتن بر متر است. بیشینه مقدار نیروی برشی در راستای Z نیز $4/5 \times 10^5$ است. بیشینه مقدار گشتاور خمشی حول X نیز $4/64 \times 10^5$ است.

میزان میرایی موج تابشی در امتداد X و Y و Z بر اساس پریود

شکل (۱۰) میزان میرایی موج تابشی در راستای محور X، Y، Z را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. میزان میرایی موج تابشی در امتداد X و Y و Z بر اساس پریود

نمودار فوق میزان میرایی موج تابشی در راستای محور X، Y، Z را نشان می‌دهد. نمودارهای فوق در پریود ۹ ثانیه تا ۴ ثانیه یک روند افزایشی در میزان میرایی را ارائه می‌دهند. با افزایش پریود موج میزان میرایی در راستای Z همواره صعودی و رو به افزایش است ولی از مقادیر میرایی در راستای محورهای Y و X کاسته می‌شود. بیشترین مقدار میرایی مربوط به راستای Z به میزان 2.178×10^6 در پریود ۱۰ ثانیه رخ می‌دهد و کمترین میزان میرایی نیز مربوط به راستای Z به میزان 507.94 است. در راستای Y نیز بیشترین مقدار در پریود ۴ ثانیه به میزان 1.808×10^6 و کمترین آن در پریود ۲ ثانیه و مقدار 0.495×10^6 است. همچنین در راستای X بیشترین مقدار در پریود ۴ ثانیه، 0.476×10^6 و کمترین آن در پریود ۱۰ ثانیه به میزان 0.105×10^6 است.

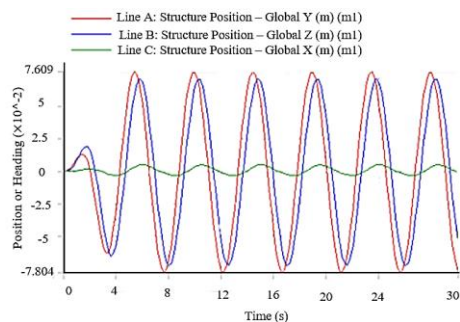
نتایج به‌دست‌آمده از ماژول Hydrodynamic Time Response

در ماژول Hydrodynamic Time Response عملکرد سازه در بازه زمانی معرفی و تحت شرایط بارگذاری موج قرار می‌گیرد. در این ماژول سازه در دو حالت مورد بارگذاری تحت شرایط منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت اول با اعمال میانگین امواج ۲۰ ساله‌ی منطقه مورد مطالعه و در حالت دوم سازه تحت شرایط بارگذاری حدی قرار گرفته و عملکرد آن را مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج به‌دست‌آمده تحت بارگذاری میانگین امواج ۲۰ ساله

میزان جابجایی Surge و Sway و Heave بر اساس (RAO) بر حسب زمان

شکل (۱۱)، میزان جابه‌جایی سازه را بر اساس عملکرد پاسخ دامنه در راستای سه محور X، Y، Z بر حسب زمان نشان می‌دهد.

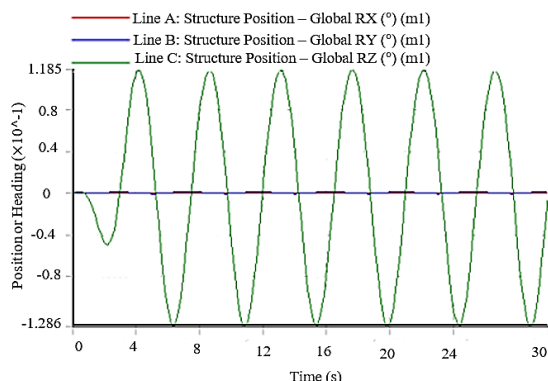


شکل ۱۱. میزان جابجایی Surge و Sway و Heave بر اساس (RAO) بر حسب زمان

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیشترین جابه‌جایی به ترتیب مربوط به حرکت Sway سپس حرکت Heave است. حرکت Surge نیز دارای کمترین میزان جابه‌جایی است. دلیل این اختلاف میزان جابه‌جایی‌ها مربوط به جهت موج برخوردی به سازه است که با زاویه $101/3$ درجه به آن برخورد می‌کند. بنابراین باید انتظار یک همچنین واکنشی را از سازه داشت.

میزان دوران Roll و Pitch و Yaw بر اساس (RAO) برحسب زمان

شکل (۱۲)، بیانگر میزان دوران حول محورهای X، Y، Z برحسب زمان است.

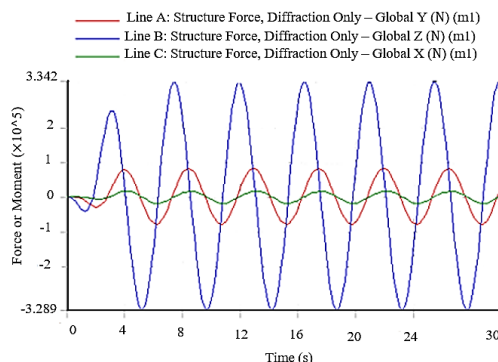


شکل ۱۲. میزان دوران در حرکت Roll و Pitch و Yaw بر اساس (ROA) برحسب زمان

با توجه به زاویه موج برخوردی (۱۰/۳ درجه) میزان دوران حول محور Z دارای بیشترین مقدار است و دوران در حول محور X، Y خیلی ناچیز است. بازه دورانی سازه حول محور Z در یک حرکت سیکلیک از 0.118 درجه تا -0.128 درجه است.

میزان نیروی تفرق در امتداد X، Y، Z برحسب زمان

شکل (۱۳) بیانگر میزان نیروی تفرق ایجاد شده در امتداد محورهای X، Y، Z برحسب زمان است.

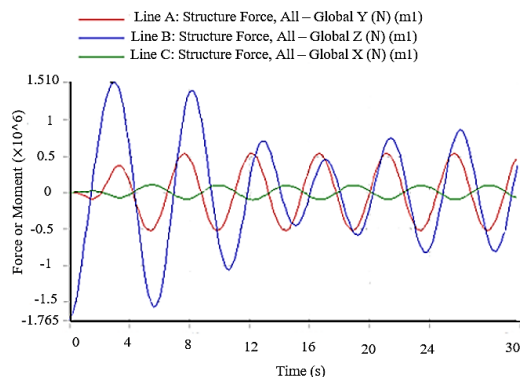


شکل ۱۳. میزان نیروی تفرق در امتداد X، Y، Z برحسب زمان

بیشترین نیروی تفرق مربوط به نیروی ایجاد شده در امتداد محور Z است که دامنه تغییرات آن از 3.289×10^5 تا 3.342×10^5 است. در راستای Y دامنه تغییرات این نیرو بین 0.82×10^5 تا -0.79×10^5 است. در راستای X نیز کمترین میزان این نیرو به وجود می آید که این مقادیر بین -0.18×10^5 و 0.16×10^5 است.

میزان نیروی کل در جهت X، Y، Z برحسب زمان

شکل (۱۴)، بیانگر نیروی کل به وجود آمده در راستای محورهای X، Y، Z برحسب زمان است.



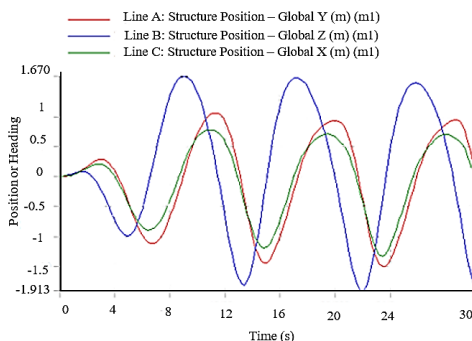
شکل ۱۴. میزان نیروی کل در جهت Y, Z, X برحسب زمان

مهم‌ترین این نیروها شامل نیروی تفرق، نیروی به‌دست‌آمده توسط سیستم مورینگ و نیروی فرود کریلف می‌باشد. در راستای محور Z نیروی کل به وجود آمده بین مقادیر 1.51×10^6 و -1.76×10^6 متغیر است. در راستای محور Y نیز این مقادیر بین 0.537×10^6 و -0.527×10^6 متغیر است. همچنین در راستای محور X که شاهد کمترین میزان نیرو در این راستا هستیم این مقادیر بین 0.103×10^6 و -0.101×10^6 متغیر است.

نتایج به‌دست‌آمده تحت بارگذاری موج حدی

میزان جابجایی در امتداد Y, Z, X بر اساس (RAO) برحسب زمان

شکل (۱۵)، میزان جابجایی سازه را برحسب زمان بر اساس عملکرد پاسخ دامنه ارائه می‌کند.

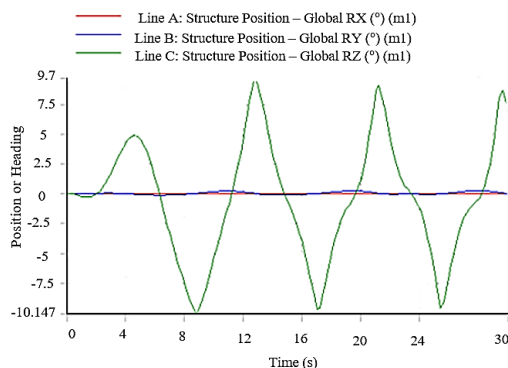


شکل ۱۵. میزان جابجایی Surge و Sway و Heave بر اساس (RAO) برحسب زمان

در امتداد محور Z شاهد بیشترین میزان جابه‌جایی سازه هستیم که بین مقادیر ۱.۶۷ متر و -1.913 متغیر است. در راستای محور X و Z شاهد تقریباً جابه‌جایی‌های یکسانی در زمان‌های مختلف هستیم که به علت جهت موج تابشی است.

میزان دوران حول X و Y و Z بر اساس (RAO) برحسب زمان

شکل (۱۶)، میزان دوران حول محورهای X, Y, Z را بر اساس عملکرد پاسخ دامنه برحسب زمان نشان می‌دهد.

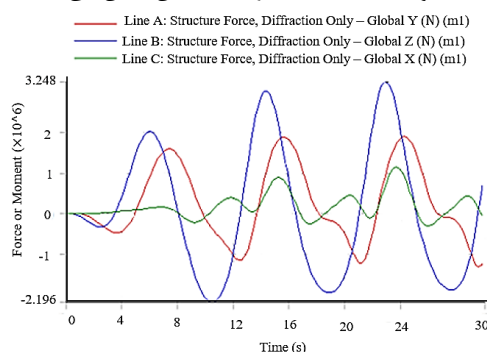


شکل ۱۶. میزان دوران در حرکت Roll و Pitch و Yaw بر اساس (RAO) برحسب زمان

با توجه به نمودار بیشترین میزان دوران حول محور Z رخ می‌دهد که بین 9.7 درجه و -10.14 درجه تغییر می‌کند. میزان دوران حول محورهای Y, X هم بسیار ناچیز است.

میزان نیروی تفرق در امتداد Y, Z, X برحسب زمان

شکل (۱۷)، میزان نیروی تفرق را در امتداد محورهای X, Y, Z برحسب زمان نشان می‌دهد.

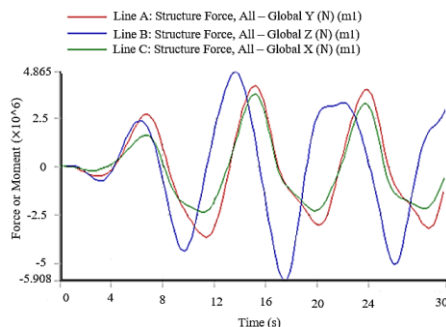


شکل ۱۷. میزان نیروی تفرق در امتداد Y, Z, X برحسب زمان

در حالت فوق بیشترین نیرو در امتداد محور Z روی می‌دهد که مقدار آن بین 3.247×10^6 و -2.196×10^6 نیوتن متغیر است. همچنین نیروی تفرق در راستای Y بین 1.89×10^6 و -1.33×10^6 در حال تغییر است. در راستای X نیز نیروی تفرق بین 1.14×10^6 و -0.322×10^6 متغیر است.

میزان نیروی کل در امتداد Y, Z, X برحسب زمان

شکل (۱۸)، بیانگر نیروی کل به وجود آمده در راستای محورهای X, Y, Z برحسب زمان است.

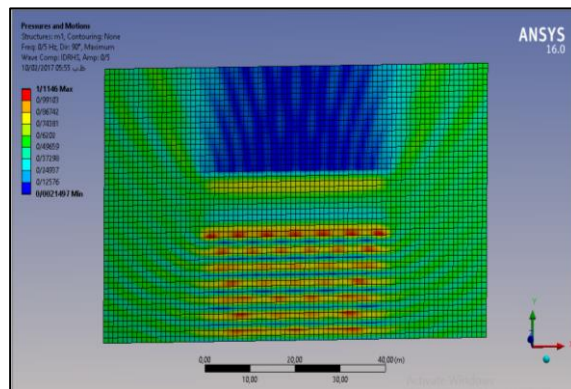


شکل ۱۸. میزان نیروی کل در امتداد X, Z, Y برحسب زمان

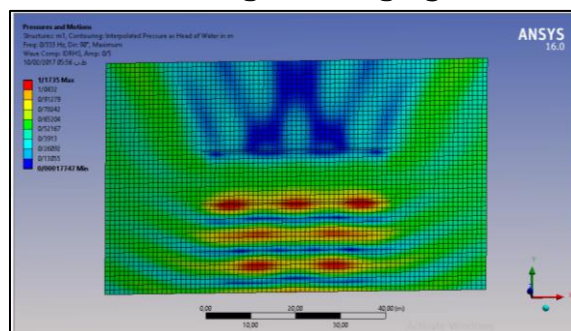
مهم‌ترین این نیروها شامل نیروی تفرق، نیروی به‌وجودآمده توسط سیستم مورینگ و نیروی فرود کرلیف می‌باشد. در راستای محور Z نیروی کل به وجود آمده بین مقادیر $4/865 \times 10^6$ و $-5/908 \times 10^6$ متغیر است. در راستای محور Y نیز این مقادیر بین $4/147 \times 10^6$ و $-3/66 \times 10^6$ متغیر است. همچنین در راستای محور X که شاهد کمترین میزان نیرو در این راستا هستیم این مقادیر بین $3/733 \times 10^6$ و $-2/379 \times 10^6$ متغیر است.

بررسی راندمان موج‌شکن‌های شناور در پریودهای مختلف

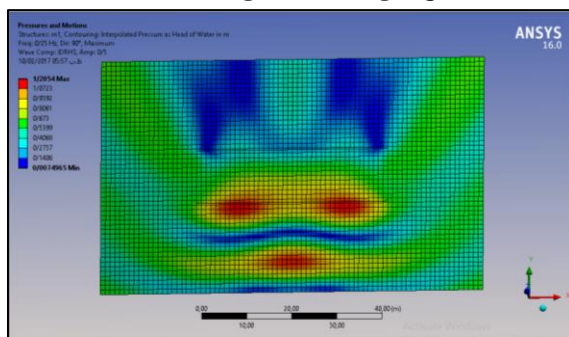
راندمان موج‌شکن شناور را با ضریبی به نام ضریب انتقال می‌سنجند. ضریب انتقال، نسبت ارتفاع موج عبوری از موج‌شکن به موج تابشی است. به‌منظور بررسی راندمان سازه، موج‌شکن تحت تابش پریودهای مختلف با ارتفاع موج ثابت قرار گرفته است.



شکل ۱۹. ارتفاع موج عبوری از موج‌شکن تحت پریود ۲ ثانیه



شکل ۲۰. ارتفاع موج عبوری از موج شکن تحت پریود ۴ ثانیه



شکل ۲۱. ارتفاع موج عبوری از موج شکن تحت پریود ۴ ثانیه

بر اساس نتایج به دست آمده در شکل های ۱۹ تا ۲۱ در صورتی که ارتفاع موج عبوری از موج شکن به ترتیب حدود ۰/۱۲ متر، ۰/۲۸ متر و ۰/۵ متر بوده است، ضریب انتقال در این حالات به ترتیب برابر ۰/۱۲، ۰/۲۸، ۰/۵ بوده است. با توجه به کانتورهای ارتفاع موج عبوری همواره ضریب انتقال با افزایش پریود افزایش میابد به نحوی که از پریود ۴ ثانیه به بعد کارایی موج شکن به شدت کاهش یافته و ضریب انتقال به ۱ نزدیک می شود.

بحث

در این بخش بر اساس تئوری حاکم بر تحقیق و همچنین بر اساس مطالعات پیشین صورت گرفته اقدام به تحلیل و بحث در خصوص نتایج به دست آمده می گردد. به صورت کلی شاخص های مختلفی توسط محققین به عنوان پارامترهای هدف در تحلیل رفتار و عملکرد یک موج شکن شناور مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این پارامترها می توان به ضریب عبور موج از موج شکن (نسبت ارتفاع موج عبور کرده به موج نزدیک شونده)، ضریب بازتاب موج از موج شکن، حرکات شش گانه این جسم شناور و عملکرد سیستم مهاربندی آن اشاره نمود. در خصوص نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر در خصوص پارامترهای جابجایی، دوران نیروی برشی، گشتاور خمشی، نیروی تفرق و نیروی کل و همچنین میزان میرایی موج تابشی بر اساس تحقیقات گذشته (حجتی و همکاران ۲۰۱۹)، مشخص گردیده که دوره تناوب بیشترین تأثیر را بر روی آن ها داشته که در تحقیق حاضر نیز این موضوع به دست آمده است. نظر به اینکه در سناریوهای تحقیق حاضر نسبت $\frac{D}{L} = 0.67 > 0.2$ لذا بر اساس تئوری تفرق - انتشار باید اقدام به محاسبه نیروی وارد بر سازه موج شکن شناور گردد. از آنجاکه سیال غیرقابل تراکم و جریان سیال غیر چرخشی فرض می شود، میدان سیال را می توان با تابع پتانسیل تعریف نمود و این تابع پتانسیل باید در معادله لاپلاس صدق کند. به منظور حل معادله لاپلاس با در نظر گرفتن شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد معادله نهایی به شکل زیر در می آید.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] = 0 \rightarrow Z = \eta$$

(۷)

با در نظر گرفتن حل معادله لاپلاس بر اساس شرایط مرزی دینامیکی سطح آزاد، تغییرات سطح آب تابعی از مقادیر Z است که با نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر که نشان می دهد بیشترین میزان نیروی وارده بر سازه موج شکن شناور در راستای محور Z بوده است مطابقت دارد همچنین این موضوع با نتیجه حاصل شده برای جابجایی حداکثر که بر اساس تئوری تفرق - انتشار در حرکت $Heave$ رخ داده مطابقت دارد و این موضوع در تحقیق حجتی و همکاران ۲۰۱۹ نیز اثبات شده است

نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- بیشترین میزان جابجایی را در حرکت Heave (پریود موج ۶ ثانیه) و کمترین میزان جابجایی را در حرکت Surge (پریود موج ۲ ثانیه) رخ داده است.
- میزان دوران حول محورهای Z و Y در برابر دوران حول محور X بسیار ناچیز بوده حتی مقادیر بیشینه دوران حول محورهای Y و Z از مینیمم دوران حول محور X با مقدار $6.7504e-0^5$ ($^{\circ}/m$) که در پریود ۲ ثانیه اتفاق می افتد نیز کمتر است.
- با افزایش پریود موج میزان میرایی در راستای Z همواره صعودی و رو به افزایش بوده ولی از مقادیر میرایی در راستای محورهای Y و X کاسته می شود.
- بیشترین مقدار نیروی برشی در امتداد محور Y اتفاق می افتد که مقدار آن $5/867 \times 10^5$ نیوتن بر متر است. بیشینه مقدار نیروی برشی در راستای Z نیز $4/5 \times 10^5$ است. بیشینه مقدار گشتاور خمشی حول X نیز $4/64 \times 10^5$ است.
- با توجه به زاویه موج برخوردی ($10.1/3$ درجه) میزان دوران حول محور Z دارای بیشترین مقدار است و دوران در حول محور X، Y خیلی ناچیز است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر به جهت ایجاد شرایط لازم جهت انجام تحقیق، سپاسگزاری نمایند.

منابع

حجتی، امیرحسین، امانی فرد، نیما، لشته نشایی، میراحمد، و دولتی، سامرا. (۱۳۹۸). بررسی عددی اثر موج شکن شناور در میرایی امواج ساحلی با روش هیدرودینامیک ذرات هموار. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۵۱(۲)، ۴۳۶-۴۲۷. <https://doi.org/10.22060/mej.2016.789>

خلیلی، هادی. (۱۳۸۹). بهینه سازی هندسه موج شکن شناور برای افزایش راندمان. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.

References

- Guo, Y.C., Mohapatra, S.C., & Guedes Soares, C. (2022). Submerged breakwater of a flexible porous membrane with a vertical flexible porous wall over variable bottom topography. *Journal of Ocean Engineering*, 243, 109989. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109989>
- Hojjati, A.H., Amanifard, N., Neshaei, M.A.L., & Dolati, S. (2019). Numerical Investigation of Floating Breakwater Effect on Coastal Waves Attenuation by Smoothed Particle Hydrodynamics Method. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(2), 125-127. <https://doi.org/10.22060/mej.2016.789> [In Persian]
- Khalili, H. (1389). Optimization of floating breakwater geometry to increase efficiency. Master's thesis. Tarbiat Modares University. [In Persian]
- Koutandos, E., Prinos, P., & Gironella, X. (2005). Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics. *Journal of Hydraulic Research*, 43(2), 174-188. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2005.9641234>

- Martinelli, L., Ruol, P., & Zanuttigh, B. (2008). Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts. *Applied Ocean Research*, 30(3), 199-207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2008.09.002>
- McCartney, B.L. (1985). Floating Breakwater Design. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111(2), 304-318. https://www.researchgate.net/profile/K-G-Vijay/post/Floating_breakwater_design/attachment/5cb18a183843b01b9b99adc2/AS%3A747121674297344%401555139096640/download/1985+Floating+Breakwater+Design+-+McCartney.pdf
- Ozeren, Y., & Wren, D.G., (2009). Technical Note: Predicting Wind-Driven Waves in Small Reservoirs. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*, 52(4), 1213. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.27793>
- Sutko, A.A., & Haden, E.L. (1974). The effect of surge, heave and pitch on the performance of a floating breakwater. *Proceedings of Floating Breakwater Conference, Rhode Island*, 41-53. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/COM741163703.xhtml>
- Wu, J., Me, T., & Zou, Z. (2022). Experimental study on wave attenuation performance of a new type of free surface breakwater. *Journal of Ocean Engineering*, 244, 110447. <https://doi.org/10.3390/en14248316>
- Yamamoto, T., Yoshida, A., & Ijima, T. (1980). Dynamics of elastically moored floating objects. *Applied Ocean Research*, 2(2), 85-92. [https://doi.org/10.1016/0141-1187\(80\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0141-1187(80)90034-6)