

بررسی آزمایشگاهی تاثیر فاصله پانتون‌ها بر ضریب عبور موج از موج‌شکن شناور پانتونی دوبل

مهدی صنایعی^۱، مهدی شفیعی‌فر^{۲*}، احمد رضایی مزیک^۳

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس
۲. استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

shafiee@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۳/۱۳]

چکیده - در این پژوهش نتایج بررسی آزمایشگاهی عملکرد یک موج‌شکن شناور پانتونی دوبل متشکل از دو ردیف پانتون جدا ارایه می‌شود. در مجموع ۱۶۰ آزمایش با شرایط مختلف پیرو و ارتفاع موج، فاصله پانتون‌ها و چگونگی مهاربندی آنها در آزمایشگاه سازه‌های دریایی دانشگاه تربیت مدرس و در فلوم امواج با توانایی تولید امواج نامنظم انجام شده است. در مقاله حاضر با در نظر گرفتن ضریب عبور موج (نسبت ارتفاع موج عبوری به ارتفاع موج برخوردی به سیستم موج‌شکن شناور)، به عنوان پارامتر هدف، مقدار ضریب عبور موج تحت اثر تغییرات فاصله بین پانتون‌ها بررسی شده و نتایج به دست آمده مورد مقایسه قرار گرفته اند. برای تحلیل داده‌های خام برداشت شده از آزمایش‌های انجام یافته، روش دامنه فرکانسی مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی تاثیر فاصله قرارگیری پانتون‌ها نسبت به هم به عنوان پارامتر اساسی در این پژوهش آزمایشگاهی مورد نظر قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که میزان عبور موج برای موج‌شکن شناور پانتونی دوبل در فاصله نسبی بین ۰/۸ تا ۰/۹ (فاصله قرارگیری دو پانتون نسبت به هم ۰/۸ تا ۰/۹ برابر طول موج طرح) کمترین مقدار خود را دارد و همچنین بیشترین میزان عبور موج برای حالتی است که دو پانتون در فاصله نسبی ۱/۳ الی ۱/۴ قرار گیرند.

واژگان کلیدی: موج نامنظم، موج‌شکن شناور دوبل، ضریب عبور، فاصله بین پانتون‌ها.

مقدمه

شناور طراحی و ساخته و نصب شد [۱].
برای مناطق ساحلی با عمق زیاد که احتیاج به محافظت در مقابل امواج در یک حد نسبی باشد و نیاز به محافظت کامل به وسیله موج‌شکن‌های سنتی نباشد، موج‌شکن‌های شناور به عنوان گزینه برتر مطرح است. زیرا برای مناطق ساحلی با عمق زیاد، حجم مصالح سنگی مورد نیاز برای احداث موج‌شکن‌های ثابت با افزایش عمق به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد و با توجه به غیر اقتصادی بودن طرح‌های سنتی، موج‌شکن‌های شناور گزینه برتر اقتصادی خواهند بود [۲].
همچنین در مناطقی که بستر دریا دارای شرایط ژئوتکنیکی نامناسب باشد، یک سازه عظیم مانند موج‌شکن سنگریزه‌ای

برای توسعه مناطق ساحلی و امکان بهره‌مندی از زیرساخت‌های دریایی از قبیل حمل و نقل دریایی، توسعه صنایع دریایی، رونق صیادی و نیز صنعت گردشگری، ایجاد بنادر و محیط‌های آبی ایمن در برابر هجوم امواج برای پهلوگیری شناورها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ایده ساخت موج‌شکن‌های شناور برای اولین بار در سال ۱۹۴۴ مقارن با جنگ جهانی اول در سواحل نورماندی انگلستان مطرح شد. کارایی مناسب، هزینه کم، ساخت سریع و برخی مزایای دیگر سبب شد تا موج‌شکن‌های شناور به سرعت رشد پیدا کرده و در آب‌های ساحلی مناطق مختلف جهان جای گیرند. از آن زمان تاکنون انواع مختلفی از این سازه‌های

وسيله‌ی (Teh & Islami, 2013) در مالزی اشاره کرد که با ساخت مدل فیزیکی موج‌شکن شناور با مقطع پله‌ای، عملکرد این نوع مقطع را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [7].

در ایران نیز پژوهش‌های زیادی در زمینه موج‌شکن‌های شناور انجام گرفته است. از مهمترین این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش انجام یافته به وسیله‌ی اکبری و همکاران [8] اشاره کرد که عملکرد موج‌شکن شناور را در چهار شکل پانتونی، کاتاماران، پانتونی انحنادار و کاتاماران انحنادار مورد مطالعه قرار دادند. علاوه بر پژوهش انجام یافته می‌توان به پژوهش‌های چگینی و صادقی [9] نیز اشاره کرد که به بررسی آزمایشگاهی موج‌شکن شناور شیب‌دار پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر نیز پژوهش‌های فراوانی پیرامون عملکرد موج‌شکن‌های شناور انجام یافت که از مهمترین آنها می‌توان بررسی آزمایشگاهی عملکرد موج‌شکن شناور تیغه‌ای در شرایط مختلف از نظر موج و عمق آب‌خور که به وسیله‌ی فروزنده و همکاران [10] انجام گرفته است، را نام برد.

در پژوهش حاضر که در آزمایشگاه سازه‌های دریایی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد، رفتار هیدرولیکی مدل فیزیکی موج‌شکن شناور دویل متشکل از دو ردیف پانتون تحت امواج نامنظم با ارتفاع و پریودهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش‌ها فاصله بین دو ردیف پانتون به عنوان پارامتر متغیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. با تغییر فاصله بین پانتون‌ها تغییرات سطح آب در دو طرف سیستم موج‌شکن به وسیله‌ی ۳ عدد سنسور ارتفاع‌سنج در هر طرف ثبت شدند. برای ۱۶ حالت موج نامنظم با ارتفاع و دوره مختلف، ۱۰ فاصله متفاوت بین پانتون‌ها در نظر گرفته شد و در مجموع با انجام ۱۶۰ آزمایش عملکرد موج‌شکن شناور دویل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

تجهیزات آزمایشگاهی

تمامی آزمایش‌ها در فلوم موج آزمایشگاه سازه‌های دریایی دانشگاه تربیت مدرس انجام یافته است. این فلوم دارای ابعاد ۱۶ متر طول، ۱ متر عرض و ۱ متر ارتفاع است و دارای

باعث ایجاد فشار زیادی روی بستر می‌شود که مشکلاتی مانند نشست زیاد خاک بستر را در پی خواهد داشت، پس استفاده از موج‌شکن شناور یک راه حل مناسب برای چنین مناطقی است [۳].

بررسی آزمایشگاهی عملکرد انواع مختلف موج‌شکن‌های شناور به وسیله‌ی پژوهشگران زیادی صورت گرفته است. ایده‌های مطرح شده به وسیله‌ی پژوهشگران در این زمینه را می‌توان در دو زمینه مقطع بهینه موج‌شکن و جانمایی بازوهای موج‌شکن در پلان بندر طبقه‌بندی کرد.

در سال ۲۰۰۵ میلادی Koutadons و همکاران [۳] در مطالعات آزمایشگاهی حدود قابل قبول برای ضرایب عبور، انتقال و استهلاک انرژی امواج را برای موج‌شکن شناور نفوذ ناپذیر و متخلخل به دست آوردند. مطالعات انجام یافته روی مدل فیزیکی موج‌شکن‌های شناور نشان می‌دهند که با افزایش تیزی موج، عبور موج کاهش، با افزایش ارتفاع موج برخوردی مقدار نیروی مهار افزایش و همچنین با افزایش عرض موج‌شکن مقدار نیروی مهار کاهش می‌یابد [۴ و ۵].

Martinelli و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۸ نیروهای مهار و ضریب عبور موج را طی انواع جانمایی موج‌شکن شناور مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش زاویه بین امتداد موج‌شکن شناور و امتداد موج برخوردی به آن، نیروهای مهار و ضریب عبور موج افزایش و کارایی موج‌شکن در برابر امواج کاهش پیدا می‌کند. در سال ۲۰۰۹ پژوهش جامعی در دانشگاه می‌سی‌سی‌پی روی عملکرد موج‌شکن‌های شناور پانتونی انجام شد، که در این پژوهش عبور، انعکاس و شکست موج در موج‌شکن‌های شناور مورد بررسی قرار گرفت و این نتیجه حاصل شد که در صورت استفاده از مهارهای شمعی عبور موج کمتر خواهد بود؛ همچنین در صورت وجود روگذری موج، عبور امواج تیزتر بیشتر خواهد بود و کاهش ارتفاع موج در اثر شکست بیشتر از انعکاس موج خواهد بود [۱].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در جهان روی مقاطع موج‌شکن‌های شناور و شکل و آرایش بهینه آن‌ها انجام شده است. در این مورد می‌توان به پژوهش انجام یافته به

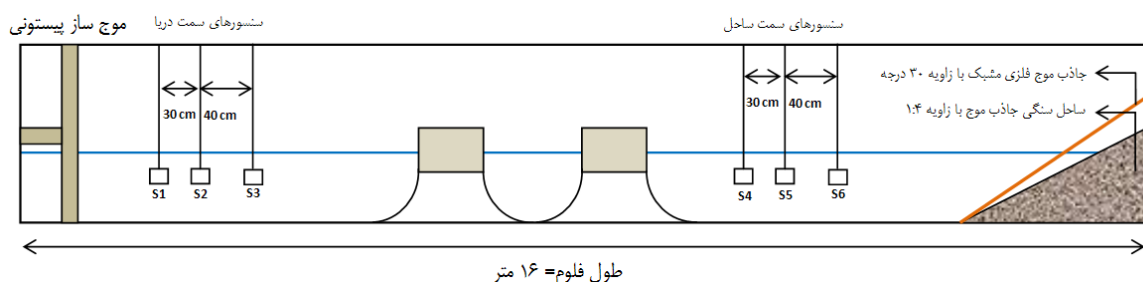
محدودیت تیزی موج و محدودیت طول موج عنوان کرد. بدین معنی که در صورت کاهش دوره و طول موج، تیزی موج زیاد شده و با توجه به عمق محدود آب، امواج تولید شده قبل از رسیدن به سازه می‌شکنند. در حالت دوم در صورتی که دوره و طول موج بزرگ باشد، میزان انعکاس موج از سازه و از انتهای فلوم افزایش می‌یابد و خطای زیادی در محاسبات وارد می‌شود. در این پژوهش طیف وسیعی از امواج با ارتفاع، دوره و تیزی‌های مختلف تولید شده و نسبت به خطاهای وارد در محاسبات مورد حساسیت سنجی قرار گرفتند که در نهایت نتیجه حاصل این بود که در محدوده‌ای از ارتفاع و پریود امواج که منجر به تیزی موج (Sp) بین ۰.۴/۰ تا ۰.۹/۰ می‌شوند، مقدار خطاها در حد قابل قبول است.

جدول ۱- مشخصات امواج مورد استفاده در آزمایشات

ردیف	ارتفاع موج (سانتیمتر)	پریود موج	عمق آب	طول موج (متر)	تیزی موج
۱	3.80	0.82	0.40	1.03	0.04
۲	5.20	0.81	0.40	1.01	0.05
۳	5.60	0.81	0.40	1.01	0.06
۴	7.30	0.82	0.40	1.03	0.07
۵	3.90	0.81	0.40	1.01	0.04
۶	5.40	0.82	0.40	1.03	0.05
۷	7.00	0.82	0.40	1.03	0.07
۸	7.70	0.83	0.40	1.06	0.07
۹	4.30	0.81	0.40	1.01	0.04
۱۰	6.00	0.81	0.40	1.01	0.06
۱۱	7.50	0.81	0.40	1.01	0.07
۱۲	9.20	0.81	0.40	1.01	0.09
۱۳	5.60	0.81	0.40	1.01	0.06
۱۴	7.50	0.83	0.40	1.06	0.07
۱۵	8.60	0.82	0.40	1.03	0.08
۱۶	10.20	0.84	0.40	1.08	0.09

سیستم تولید موج پیستونی با قابلیت تولید امواج نامنظم بر اساس طیف موج است. برای برداشت داده‌های مربوط به سطح آب در طول کانال از ۶ سنسور ارتفاع سنج که از نوع مقاومتی است، استفاده شده، که هر یک این قابلیت را دارند که تغییرات ارتفاعی سطح آب را با فرکانس ۱۰ هرتز و دقت یک میلی‌متر ثبت کنند. این سنسورها به وسیله‌ی کابل به قسمت پردازشگر متصل بوده و با راه اندازی نرم‌افزار به صورت پیوسته تغییرات سطح آب، در محل هر سنسور در صفحه نمایش قابل مشاهده است. برای ثبت حرکات پانتون‌ها نیز دو ماژول شتاب‌سنج-ژیروسکوپ به کار گرفته شدند. در انتهای فلوم ساحل سنگی با ابعاد مبه و سیله‌ی سنگ‌دانه ۱۰ سانتی‌متر و شیب ۱:۴ برای جذب انرژی موج و جلوگیری از انعکاس موج از انتهای فلوم قرار گرفته است. ضریب انعکاس موج از انتهای فلوم در این حالت کمتر از ۲/۰ است که در محدوده مجاز استفاده از روابط منسارد برای تفکیک امواج بازتابی و برخوردی به سازه است. برای تفکیک امواج برخوردی و بازتابی از ۳ ردیف سنسور در هر طرف سیستم موج‌شکن شناور مورد استفاده قرار گرفتند. شکل شماتیک فلوم موج و چگونگی جانمایی موج‌ساز، سنسورها، ساحل و جاذب موج فلزی در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۲ نمایی از فلوم این آزمایشگاه و شکل ۳ ساحل سنگی در انتهای فلوم را نشان می‌دهد.

مشخصات امواج مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه‌های مدل‌سازی فیزیکی شرایط دریا را می‌توان به دو صورت



شکل ۱- فلوم موج آزمایشگاه سازه‌های دریایی دانشگاه تربیت مدرس و چگونگی جانمایی جاذب موج

تحلیل داده‌ها

برای تحلیل داده‌های آزمایشگاهی دو رویکرد مختلف وجود دارد که عبارتند از روش دامنه زمانی^۱ و روش دامنه فرکانسی^۲. در روش دامنه زمانی تحلیل به صورت موج به موج^۳ صورت می‌گیرد. بدین صورت که ابتدا داده‌های تراز سطح آب که به وسیله‌ی سنسورهای ارتفاع سنج ثبت شده‌اند، به داده‌های موج تبدیل شده و سپس مشخصات هر موج به دست می‌آید. این روش وقت‌گیر بوده و خطای به‌دست آمده از این روش نیز زیاد است. روش تحلیل دامنه فرکانسی بر خلاف روش دامنه زمانی برای تحلیل از طیف انرژی موج استفاده می‌کند. در این روش خطاهای ناشی از ثبت داده‌های فرکانسی بالا و پایین را که جزو خطاها می‌باشند می‌توان از داده‌های اصلی جدا کرد.

در این تحقیق از روش تحلیل بر اساس دامنه فرکانسی استفاده شده است. بدین صورت که برای به‌دست آوردن ارتفاع موج مشخصه^۴ از روابط (۱) تا (۴) استفاده می‌شود. رابطه (۱) نشانگر ممان مرتبه آم از نمودار طیف انرژی موج می‌باشد. ممان مرتبه صفر که همان سطح زیر نمودار می‌باشد از رابطه (۲) به دست می‌آید. برای امواجی که از توزیع رایلی پیروی می‌کنند، ارتفاع موج مشخصه از رابطه (۳) به دست می‌آید [۱۱].

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i E(f) df \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (1)$$

$$H_s \approx 4\sqrt{m_0} \quad (2)$$

با استفاده از مطالب ارائه شده در بالا مقدار کمی ارتفاع مشخصه H_s آنها به دست آمده و در تحلیل‌ها مورد استفاده

سیستم موج‌شکن شناور که در این پژوهش تحت عنوان موج‌شکن شناور دوپل مورد بررسی قرار گرفته است، متشکل از دو پانتون جدا از هم است که به وسیله‌ی مهارهای زنجیری به کف فلوم وصل شده‌اند. این سیستم موج‌شکن شناور به دلیل جدا بودن پانتون‌ها از هم رفتار هیدرولیکی متفاوتی نسبت به موج‌شکن‌های کاتاماران که از پانتون‌های متصل به هم است، دارند.

ابعاد پانتون‌های مورد استفاده عبارتند از: ۲۰ سانتی‌متر عرض، ۱۶ سانتی‌متر ارتفاع و ۸۰ سانتی‌متر طول. پانتون‌ها در عرض فلوم به شکل متقارن قرار گرفته و امکان عبور موج از دو طرف به گونه‌ی متقارن فراهم شد که این تقارن باعث حفظ شرایط دوبعدی آزمایش می‌شود. در انتخاب ابعاد مدل سعی بر آن شد ابعادی انتخاب شود که با انتخاب مقیاس مناسب و انجام آنالیز ابعادی، نتایج به دست آمده برای مدل را بتوان به پروتوتیپ نیز ادامه داد.



شکل ۲- نمایی از فلوم موج مورد استفاده در آزمایشگاه



شکل ۳- ساحل سنگی انتهای فلوم موج

^۱ Time Domain Analysis

^۲ Frequency Domain Analysis

^۳ Wave By Wave Analysis

^۴ Significant Wave Height

مولفه انرژی متفرق شده و انرژی عبوری از زیر موج‌شکن به علت عدم وجود مانع در برابر ذرات است. موج‌شکن‌های شناور کاتاماران از دو پانتون تک که به یکدیگر متصل شده و به عنوان یک جسم صلب شناور عمل می‌کند، در بنادر زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و پژوهش‌های زیادی نیز در این زمینه انجام یافته است. در صورتی که دو پانتون تک را در مقابل موج قرار دهیم، میزان انرژی عبوری از سیستم علاوه بر پارامترهای مطرح در موج‌شکن شناور تک، تابعی از فاصله بین دو پانتون نیز است. با تغییر فاصله بین دو پانتون، حرکت آنها نیز تغییر می‌یابد و با تغییر فاز حرکتی دو موج‌شکن، میزان انرژی عبوری کل سیستم نیز تغییر می‌کند. در صورتی که دو پانتون موج‌شکن حرکت هم‌فاز داشته باشند، به گونه‌ای که در یک لحظه انرژی وارد شده از هر دو پانتون به ذرات آب در یک جهت باشد، مقدار انرژی عبوری در اثر حرکت موج‌شکن Erad به میزان بیشینه خود رسیده و انرژی عبوری کل نیز بیشینه خواهد بود. ولی در صورتی که دو پانتون موج‌شکن حرکت غیر هم‌فاز داشته باشند، به گونه‌ای که نیروی وارد شده از دو پانتون به ذرات آب در یک لحظه در جهت مخالف هم باشند، مقدار انرژی مستهلک شده در بین دو پانتون به علت افزایش میزان اغتشاش، افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان انرژی عبوری در اثر حرکت موج‌شکن Erad و به سبب آن میزان انرژی عبوری کل نسبت به حالتی که دو پانتون حرکت هم‌فاز دارند، کاهش چشم‌گیری خواهد داشت.

قرار گرفته است. برای به دست آوردن مقدار دوره متناظر با فرکانس پیک نیز مختصات نقطه بیشینه نمودار برازش داده شده به هر طیف به دست آمده و مقدار طول نقطه بیشینه بیانگر فرکانس پیک fp خواهد بود که مقدار Tp نیز با استفاده از آن طبق رابطه (۴) به دست می‌آید.

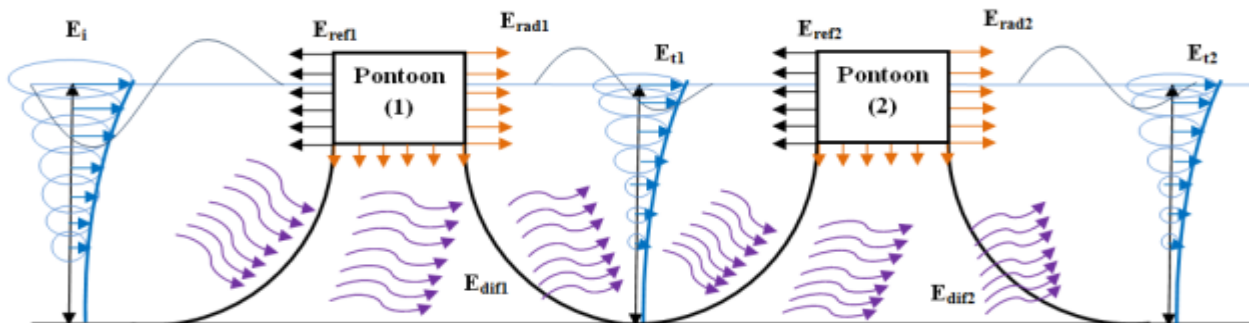
$$T_p = \frac{1}{f_p}$$

برای تحلیل و تفکیک امواج برخوردی و امواج انعکاسی از روش فونک و منسارد [۱۲] استفاده شده است. در این روش که اساس آن مبتنی بر تکنیک برازش کمینه مربعات است، برای جدا کردن امواج منعکس شده پروفیل سطح آب در سه نقطه و دو اختلاف فاز زاویه‌ای به وسیله سه سنسور با موقعیت ثابت اندازه‌گیری می‌شود.

نتایج و بحث

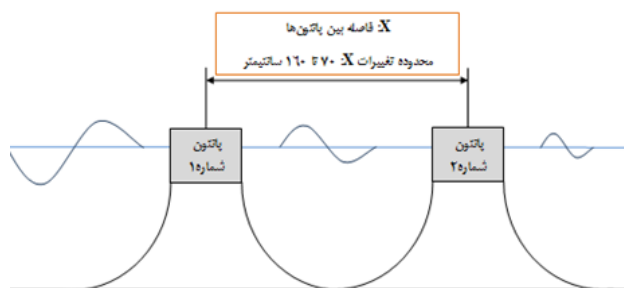
همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با برخورد موج با انرژی Ei به پانتون ۱، مقداری از انرژی موج به سمت دریا منعکس شده Eref، مقداری از انرژی در اثر اغتشاش ایجاد شده مستهلک شده و بخشی از انرژی موج نیز با متفرق شدن و عبور از زیر پانتون Edif به سمت ساحل منتقل می‌شود. مقدار انرژی عبوری از موج‌شکن را می‌توان به دو قسمت اصلی تقسیم کرد که عبارتند از:

- (۱) انرژی حاصل از حرکت موج‌شکن شناور Erad که در این حالت حرکت موج‌شکن شناور با انتقال مومنتوم به ذرات آب به عنوان یک سیستم مولد موج عمل می‌کند.
- (۲) انرژی عبوری از زیر موج‌شکن که خود متشکل از دو



شکل ۴- شکل شماتیک سیستم موج‌شکن شناور دابل و نحوه رفتار آن در برابر موج

برخوردی به موج‌شکن در آزمایش‌های مربوط به داده‌هایی که هر نمودار را تشکیل داده‌اند، کاملاً یکسان و برابر هستند. با توجه به اینکه ارتفاع موج عبوری از موج‌شکن شناور دابل با تغییر فاصله بین دو پانتون تغییر می‌کند، می‌توان گفت با تغییر فاصله بین دو پانتون، الگوی انتقال انرژی موج به سمت ساحل تغییر می‌یابد. در صورتی که سامانه سازه‌ای و مهاربندی موج‌شکن شناور را خطی فرض کنیم (در مدل آزمایشگاهی کاملاً غیر خطی است)، با انجام تحلیل در حوزه فرکانس، می‌توان گفت که پاسخ حرکتی پانتون ۱ تابعی خطی از طیف موج برخوردی، و پاسخ حرکتی پانتون ۲ تابعی از طیف موج برخوردی و طیف پاسخ پانتون ۱ می‌باشد. با تغییر فاصله بین دو پانتون، سامانه سازه‌ای تغییر می‌کند و معادلات حرکتی و توابع انتقالی از جمله RAO نیز به سبب آن دچار تغییر می‌شوند. در این حالت الگوی انتقال انرژی به پشت سازه نیز با حالت‌های دیگر متفاوت خواهد بود.



شکل ۵- موج‌شکن شناور پانتونی دابل

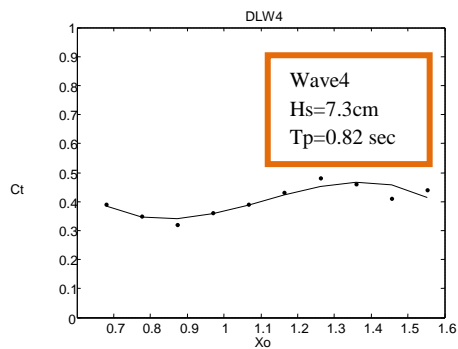
حرکت‌های سازه‌ها برای به دست آوردن توابع انتقالی مانند RAO به وسیله‌ی دو عدد مازول شتاب‌سنج-ژیروسکوپ به شکل کامل ثبت شدند. در مرحله تحلیل نتایج تابع انتقالی یگه‌ای برای جانمایی مشخصی به دست نیامد. دلیل این امر این بود که تابع RAO برای سیستم‌های خطی تعریف می‌شود و با وجود مهاربندی Catenary که باعث ورود یک ترم غیرخطی به معادلات حرکتی می‌شود، وجود چنین تابعی تعریف مشخصی نخواهد داشت.

برای بررسی تاثیر فاصله دو پانتون در عملکرد موج‌شکن شناور، پارامتر بدون بعدی به صورت نسبت فاصله دو پانتون به طول موج برخوردی تعریف می‌شود که به آن فاصله نسبی (X₀) گفته می‌شود.

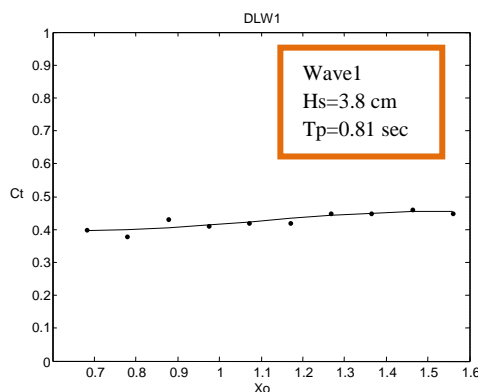
$$X_0 = \frac{X}{L_{OP}} = \frac{\text{Distance Between Pontoons}}{\text{Incident Wave Length}} \quad (3)$$

برای مطالعه تاثیر فاصله نسبی روی ضریب عبور موج‌شکن شناور دابل، ۱۶ موج با ۱۰ فاصله مطابق شکل ۵ مورد آزمایش قرار گرفته است.

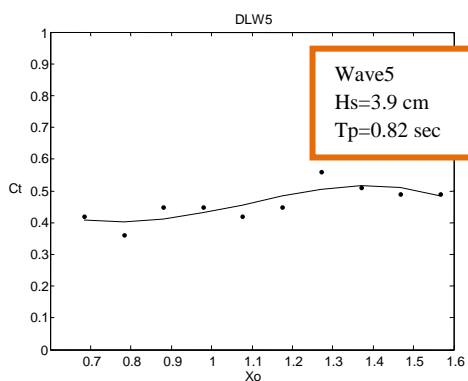
همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۶ الی ۲۱ مشاهده می‌شود، ضریب عبور موج از موج‌شکن شناور دابل با تغییر فاصله نسبی دو پانتون رفتار دوره‌ای دارد. به گونه‌ای که با افزایش فاصله دو پانتون ابتدا ضریب عبور موج کاهش می‌یابد و پس از اینکه تابع نقطه کمینه نسبی خود را تجربه کرد، دوباره سیر صعودی پیدا می‌کند. سیر صعودی ضریب عبور نیز زیاد پایدار نبوده و با افزایش دوباره فاصله بین پانتون‌ها، پس از ثبت یک نقطه بیشینه نسبی دوباره مقدار ضریب عبور کاهش می‌یابد. با توجه به نمودارهای شکل ۶ تا شکل ۲۱ می‌توان گفت موج‌شکن شناور دابل مورد مطالعه در فاصله ۰/۸ تا ۰/۹ برابر طول موج برخوردی بهترین بازده را دارد و در این فاصله ارتفاع موج ایجاد شده سمت ساحل کمترین مقدار را دارد. در بیشتر آزمایش‌های انجام یافته همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۶ تا شکل ۲۱ مشخص است، در حالتی که فاصله محور به محور دو پانتون ۱/۳ الی ۱/۴ برابر طول موج برخوردی است، سیستم موج‌شکن شناور دابل کمترین راندمان و به سبب آن بیشترین مقدار عبور موج را به سمت ساحل دارد. نقاط تشکیل دهنده هر کدام از نمودارهای شکل‌های ۶ الی ۲۱ مربوط به یک موج است که دارای ارتفاع و دوره مشخصی است و فقط سامانه سازه‌ای موج‌شکن (فاصله بین پانتون‌ها) تغییر یافته‌اند. از آنجایی که در آزمایش‌های با امواج مشابه از یک داده موج ورودی به دستگاه موج‌ساز استفاده شده است، موج



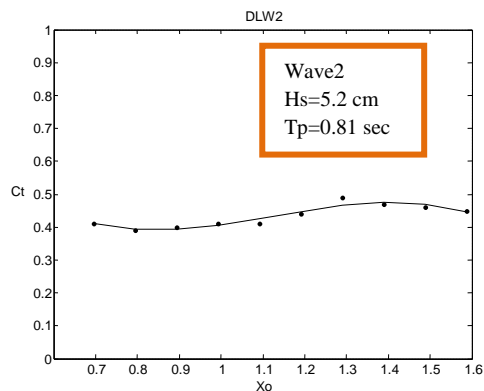
شکل ۹ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۴



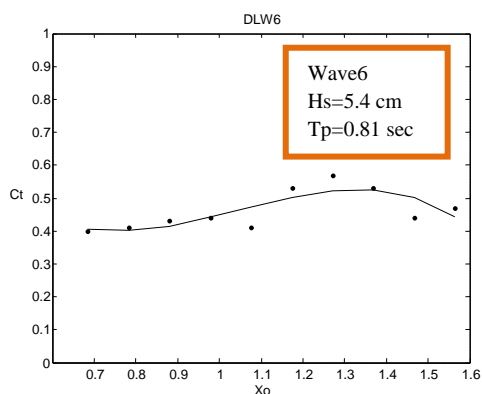
شکل ۶- ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۱



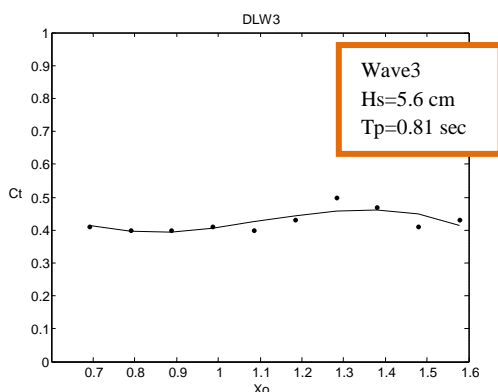
شکل ۱۰ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۵



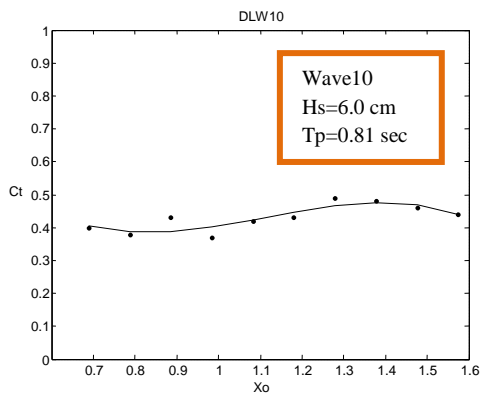
شکل ۷ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۲



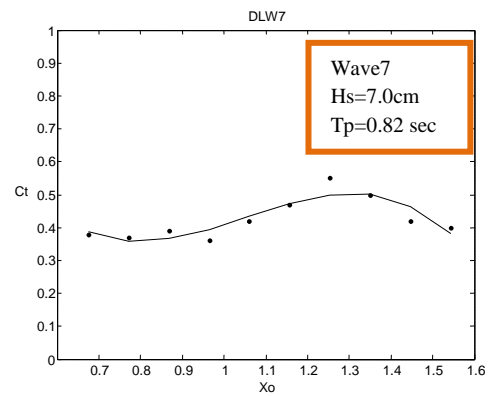
شکل ۱۱ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۶



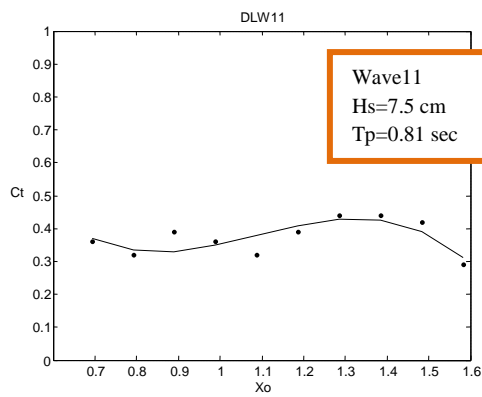
شکل ۸ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۳



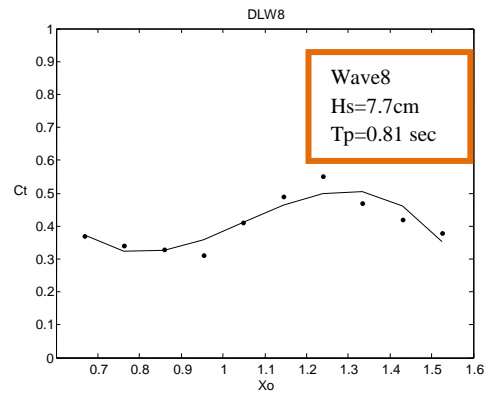
شکل ۱۵ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۱۰



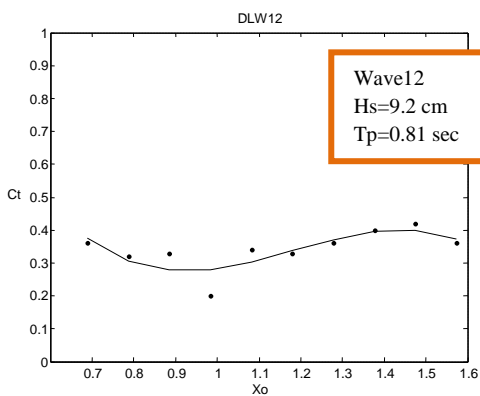
شکل ۱۲ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۷



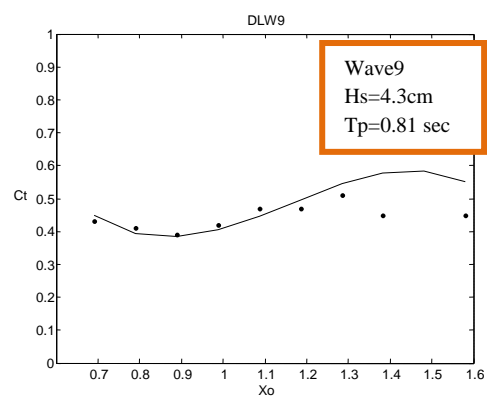
شکل ۱۶ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۱۱



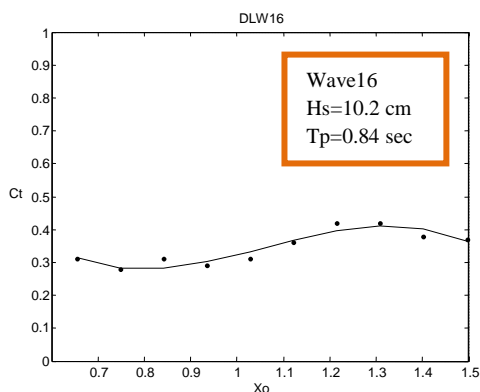
شکل ۱۳ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۸



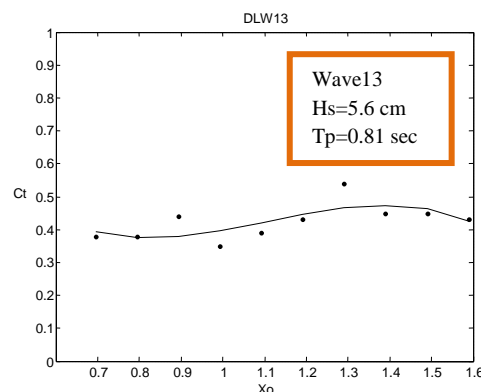
شکل ۱۷ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۱۲



شکل ۱۴ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دوبل به ازای فواصل مختلف برای موج ۹



شکل ۲۱ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دویل به ازای فواصل مختلف برای موج ۱۶



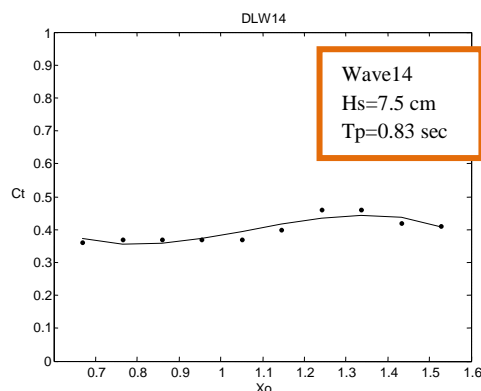
شکل ۱۸ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دویل به ازای فواصل مختلف برای موج ۱۳

نتیجه گیری

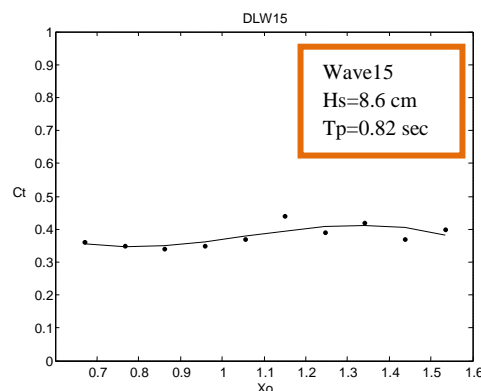
در صورتی که دو پانتون موج شکن حرکت هم فاز داشته باشند، به گونه‌ای که در یک لحظه انرژی وارد شده از هر دو پانتون به ذرات آب در یک جهت باشد، مقدار انرژی عبوری در اثر حرکت موج شکن E_{rad} به میزان بیشینه خود رسیده و انرژی عبوری کل نیز بیشینه خواهد بود. ولی در صورتی که دو پانتون موج شکن حرکت غیر هم فاز داشته باشند، به گونه‌ای که نیروی وارد شده از دو پانتون به ذرات آب در یک لحظه در جهت مخالف هم باشند، مقدار انرژی مستهلک شده در بین دو پانتون به علت افزایش میزان اغتشاش، افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان انرژی عبوری در اثر حرکت موج شکن (E_{rad}) و به سبب آن میزان انرژی عبوری کل نسبت به حالتی که دو پانتون حرکت هم فاز دارند، کاهش چشم‌گیری خواهد داشت.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که میزان عبور موج برای موج شکن شناور پانتونی دویل در فاصله نسبی X_o بین $0/8$ تا $0/9$ عبور موج کمترین مقدار خود را دارد. همچنین بیشترین میزان عبور موج برای حالتی است که دو پانتون در فاصله نسبی $1/3$ الی $1/4$ قرارگیرند. به طور کلی می‌توان گفت.

از آنجایی که در آزمایش‌های با امواج مشابه از یک داده موج ورودی به دستگاه موج ساز استفاده شده است، موج برخوردی به موج شکن در آزمایش‌های مربوط به داده‌هایی که هر سری آزمایش را تشکیل داده‌اند، کاملاً یکسان و



شکل ۱۹ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دویل به ازای فواصل مختلف برای موج ۱۴



شکل ۲۰ - ضریب عبور موج از موج شکن شناور دویل به ازای فواصل مختلف برای موج ۱۵

[5] Dong, G.H., (2008). "Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters". *Ocean Engineering*; 35, (2008), 931-938.

[6] Martinelli, L., Ruol, P., Zanuttigh, B., (2008). "Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts". *Applied Ocean Research* 30 (2008), 199-207.

[7] H.M, Teh., H. Ismail., (2013). "Hydraulic Characteristics of a Stepped-slope Floating Breakwater". 4th International Conference on Energy and Environment 2013 (ICEE 2013)

[8] Behzad, M. and Akbari, M. (2007). "Experimental Investigation on Response and Efficiency of Moored Pontoon Type Floating Breakwater". *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, Vol. 31, No. B1, pp 95-99. Shiraz University.

[۹] سهیلی صادقی، محمدرضا. چگینی، وحید. سنجانی، محمد سعید. (۱۳۷۹). "بررسی عملکرد موج شکن شناور شبیدار با استفاده از مدل فیزیکی". چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی. مجتمع بندری شهید رجائی. بندرعباس - ایران.

[۱۰] فروزنده، نرگس. (۱۳۸۴). "بررسی عملکرد موج شکن های شناور پانتونی با استفاده از مدل های فیزیکی". پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

[۱۱] عطایی آشتیانی؛ بهزاد، نجفی جیلانی؛ عطاله؛ "مهندسی سواحل، هیدرودینامیک سواحل"؛ انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.

[12] Mansard, E.P.D., Funke, R.R., (1980). "The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method" *Coastal Engineering* (1980), 154-172.

برابر هستند. با توجه به اینکه ارتفاع موج عبوری از موج شکن شناور دوپل با تغییر فاصله بین دو پانتون تغییر می کند، می توان گفت با تغییر فاصله بین دو پانتون، الگوی انتقال انرژی موج به سمت ساحل تغییر می یابد. در صورتی که سیستم سازه ای و مهاربندی موج شکن شناور را خطی فرض کنیم (در مدل آزمایشگاهی کاملاً غیر خطی هستند)، با انجام تحلیل در حوزه فرکانس، می توان گفت که پاسخ حرکتی پانتون ۱ تابعی خطی از طیف موج برخوردی، و پاسخ حرکتی پانتون ۲ تابعی از طیف موج برخوردی و طیف پاسخ پانتون ۱ می باشد. با تغییر فاصله بین دو پانتون، سامانه سازه ای تغییر می کند و معادلات حرکتی و توابع انتقالی از جمله RAO نیز به سبب آن دچار تغییر می شوند و در این حالت الگوی انتقال انرژی به پشت سازه نیز با حالت های دیگر متفاوت خواهد بود.

مراجع

[1] Ozeren, Y., (2009). "Experimental and Numerical Investigations of Floating Breakwater Performance". Ph.D. thesis. University of Mississippi.

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

[3] Koutandos, E., Prinos, P., Gironella, X., (2005). "Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics". *Journal of Hydraulic Research* Vol. 43, No. 2.

[4] Vittal Hegde, A., Kiran, K., Magadam, A., (2007). "Performance Characteristics of Horizontal Interlaced Multilayer Moored Floating Pipe Breakwater". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.