

تعیین ضریب انعکاس یک جذب کننده موج پیشرونده با سه درجه آزادی

سید محمدرضا هدائی^۱، شهریار منصورزاده^۲، محمدرضا چمنی^۳^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ sm.hodaiei@cv.iut.ac.ir^۲ استادیار مهندسی مکانیک، عضو هیئت علمی پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ shahriar@cc.iut.ac.ir^۳ دانشیار مهندسی عمران، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، mchamani@cc.iut.ac.ir

چکیده

برای کاهش اثرات انرژی امواجی که از دور دست به سمت ساحل در حرکت هستند از موج شکن استفاده می شود. در مقیاس کوچک در آزمایشگاه های تولید موج از جذب کننده های موج برای از بین بردن اثرات بازتاب موج از انتهای فلوم و یا دیواره های حوضچه کشش استفاده می شود. جذب کننده های موجود در حوضچه ها و یا فلوم های تولید موج دارای انواع مختلفی هستند که از جمله می توان به سطوح شیب دار ساحلی و یا صفحات متخلخل که در برابر حرکت موج قرار می گیرند اشاره کرد. برای کاهش اثرات امواج بازتابی در حوضچه کشش، اخیراً پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریای دانشگاه صنعتی اصفهان اقدام به طراحی و ساخت یک جذب کننده امواج آزمایشگاهی دارای مکانیزمی با سه درجه آزادی نموده است. امواج منظم توسط یک موج ساز گوه ای در فرکانس های مختلف، در حوضچه کشش آزمایشگاه مزبور تولید می شوند. در تحقیق حاضر خصوصیات انعکاسی (ضریب انعکاس، C_r) این جذب کننده امواج در حالت های مختلف قرار گیری صفحات این جذب کننده در مقابل فرکانس های مختلفی از امواج منظم تولیدی موج ساز به دست آمده است. ضریب انعکاس با استفاده از روش گودا و سوزوکی (۱۹۷۶) محاسبه گردیده است.

کلمات کلیدی: موج، جذب کننده موج، حوضچه کشش، ضریب انعکاس موج.

مقدمه

برای بررسی اثرات پدیده هایی که در کنار یک سازه ساحلی نظیر یک موج شکن اتفاق می افتد از مدل فیزیکی آن در حوضچه های تولید موج استفاده می کنند. تولید امواج در آزمایشگاه های تولید موج از طریق دستگاه های موج ساز انجام می گیرد. در این حوضچه ها علاوه بر سیستم تولید موج، برای کاهش اثرات انعکاس موج از دیواره های حوضچه و یا انتهای فلوم تولید موج از یک جذب کننده موج^۱ استفاده می شود. جذب کننده های موج سازه ای است که انرژی موج تابشی را مستهلک می کند و ارتفاع موج انعکاس یافته را به حداقل ممکن می رساند. جذب کننده های موج کاربرد فراوانی در مهندسی سواحل و بنادر برای جذب انرژی موج و به حداقل رساندن اثرات برگشت امواج دارند. جذب کننده های موج به دو بخش جذب کننده های موج فعال^۲ و جذب کننده های موج غیرفعال^۳ دسته بندی می شوند [۵]. تمرکز این تحقیق روی جذب کننده های غیر فعال است که هیچ گونه نیروی محرکه ای در ساختار آنها دخیل نمی باشد. این جذب کننده ها به طور کلی شامل سطوح شیب دار ساحلی با شیب ثابت یا متغیر و یا صفحات متخلخل مشبک است.

گرسلو و ماه^۴ (۱۹۵۴) آزمایش هایی بر روی جذب کننده هایی از جنس سیمان با شکل های ساده و با شیب های ۲:۱ (۲ افقی، ۱ قائم) الی ۳:۱ در حوضچه کشی^۵ با عمق ۰/۶ متر، پیرو ۰/۸ تا ۱/۶ ثانیه و با تیزی موج (نسبت ارتفاع موج به طول موج، H/L) بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۵ انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که ضریب انعکاس (نسبت ارتفاع موج انعکاسی به ارتفاع موج تابشی) برای شیب های ثابت و یکنواخت با افزایش تیزی موج کاهش می یابد. برای تیزی موج ثابت وقتی که شیب کم می شود، ضریب انعکاس کاهش می یابد. ضمناً آنها در این آزمایش ها به ضریب انعکاس ۲۰٪ برای شیب های ملایم تر از ۱۰:۱ رسیدند [۱].

استراب و همکاران^۶ (۱۹۵۷) مطالعات محققین پیشین بر روی انعکاس و جذب امواج را مرور کردند. آنها نتایج آزمایشگاهی را به صورت تغییرات ضریب انعکاس در برابر زاویه ی شیب، برای مقادیر مختلف تیزی موج ارائه کردند. آزمایش ها شامل شیب های نفوذپذیر^۷ طبیعی، شیب هایی تشکیل شده از سنگ های فشرده، شیب هایی با شبکه ی سیمی^۸ و شیب های چندگانه بود. نتایج آزمایش ها نشان داد که جذب کننده ای از سنگ های

^۱ Wave absorber^۲ Active wave absorber^۳ Passive wave absorber^۴ Greslou and Mahe^۵ Towing tank^۶ Straub et al^۷ permeable^۸ Wire mesh

فشرده و شیب‌دار بایستی در شیب ۴:۱ قرار گیرد تا ضریب انعکاسی کمتر از ۱۰٪ به‌دست آید [۲].

گودا و ایپن^۱ (۱۹۶۳) به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی به مطالعه‌ی جذب‌کننده‌هایی که از شبکه‌ی توری سیمی^۲ که عمود بر جهت حرکت موج قرار می‌گیرد، پرداختند. نتایج نشان داد که اگر تعداد صفحات زیاد باشد، اثر انعکاس به فاصله‌ی بین صفحات وابسته بوده و به تعداد صفحات چندان بستگی ندارد [۳].

لی‌مهات^۳ (۱۹۷۲) جذب‌کننده‌ی غیرفعال پیشرونده‌ای ارایه کرد که در آن موج با نواحی‌ای مواجه می‌شود که با جلوروی در این نواحی، اتلاف انرژی زیاد می‌شود. در هر ناحیه‌ای از این جذب‌کننده قسمتی از انرژی تلف شده، در حالی که قسمتی دیگر از آن منعکس و بخشی دیگر از آن عبور می‌کند. رویکرد لی‌مهات بهینه‌کردن جذب‌کننده‌ی موج پیشرونده با کمینه کردن اثرات انعکاس و با اتلاف انرژی تدریجی بود. آزمایش‌هایی بر روی این جذب‌کننده به‌طول یک متر در وسط حوضچه‌ی کشش نشان داد با این جذب‌کننده می‌توان به ضریب انعکاس ۲٪ نیز رسید [۴].

اولت و داتا^۴ (۱۹۸۶) با مروری بر مطالعات انجام گرفته توسط برخی از محققین و معرفی سیستم جذب‌کننده‌ی استفاده شده و نتایج تحقیق آنها، پرسش‌نامه‌ای را به ۱۶۲ آزمایشگاه هیدرولیک سراسر دنیا به‌منظور اطلاع از امکانات آزمایشگاهی و سیستم جذب‌کننده‌ی موجود، ارسال کردند و پیشنهادهای نیز برای آینده‌ی کاری محققین توصیه کردند [۵، ۶].

چگینی (۱۹۹۳) آزمایش‌هایی بر روی یک جذب‌کننده‌ی موج متخلخل شیب‌دار که از موی اسب تشکیل شده بود، انجام داد. جذب‌کننده‌ی نفوذپذیر از دو لایه‌ی موی اسب به ضخامت ۲۰ میلی‌متر که بر روی آن دو صفحه‌ی شبکه‌بندی شده‌ی توری جوش داده شده است، تشکیل شده بود. آزمایش‌ها برای سه شیب ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ انجام گرفت. نتایج نشان داد که برای یک شیب ثابت، ضریب انعکاس با افزایش تیزی موج کاهش می‌یابد. بهترین بازدهی جذب‌کننده در شیب ۰/۱ بوده و به‌طور کلی برای محدوده‌ی تیزی موج بین ۰/۱ تا ۰/۱ به ضریب انعکاس کمتر از ۶٪ رسید [۷].

تو و چپو^۵ (۲۰۰۰) به مطالعه‌ی موج‌شکنی که بتواند ضرایب انعکاس و عبور کوچکی داشته باشد پرداختند. موج‌شکن استفاده شده در این تحقیق از n صفحه‌ی مشبک و همچنین تخلخل‌های متفاوت تشکیل شده است. نظر به این که یک صفحه‌ی تکی اتلاف انرژی در حد زیاد ندارد به دنبال استفاده از یک سیستمی بودند که حتی‌الامکان بتواند ضریب عبور (نسبت ارتفاع موج عبوری از جذب‌کننده به ارتفاع موج تابشی) را کاهش دهد و جذب انرژی موج را بالا ببرد. نتایج نشان داد که ضرایب انعکاس با افزایش b که فاصله‌ی بین صفحات مشبک است، ابتدا افزایش یافته و سپس به‌صورت نوسانی به مقدار ثابتی می‌گراید. در این نتایج به وضوح دیده شد که ضریب انعکاس با کم کردن تخلخل افزایش می‌یابد و ضریب عبور موج با افزایش فاصله‌ی بین صفحات، b ، کاهش تدریجی دارد. اگر مقدار b و تخلخل افزایش یابد، هر دو ضریب تغییرات کمی دارند. آنها همچنین نتیجه گرفتند که ضریب انعکاس با افزایش عمق نسبی (نسبت عمق آب در فلووم موج به طول موج) تغییر چندانی نمی‌کند [۸].

کوان و همکاران^۶ (۲۰۰۳) از جذب‌کننده‌ی جدیدی که از یک ماده‌ی انعطاف‌پذیر تشکیل شده است، استفاده کردند. به‌منظور رسیدن به بهترین عملکرد، این جذب‌کننده برای طول و ضخامت‌های متفاوت آزمایش شد. این جذب‌کننده بر روی سطح آزاد آب به‌صورت شناور قرار گرفته و مستقل از عمق آب داخل فلووم عمل می‌کند. از دو حسگر یکی در پشت و یکی در جلوی جذب‌کننده استفاده کردند تا ارتفاع موج در پایین‌دست جذب‌کننده (h) و بالادست آن (H) را به‌دست آورند و از ضریب جذب (نسبت h/H) استفاده کنند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت جذب‌کننده، عملکرد آن بهتر شده و ضریب جذب کمتری به‌دست می‌آید [۹].

لیو و همکاران^۷ (۲۰۰۷) برای یک جذب‌کننده‌ای شامل یک صفحه‌ی قائم مشبک، دیوار قائم انتهایی کانال و یک صفحه‌ی افقی مستغرق که بین آنها قرار دارد، به‌صورت عددی ضرایب انعکاس مربوط به صفحات افقی و قائم را مطالعه کردند. صفحه‌ی افقی قدرت جذب موج و پایداری جذب‌کننده را افزایش می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق نسبی استغراق، ضریب انعکاس ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حل عددی نشان داد که برای عملکرد بهتر، صفحه‌ی افقی متخلخل باید در نزدیکی سطح آب قرار گیرد [۱۰].

در این مقاله جذب‌کننده‌ی جدیدی که از صفحات مشبک با تخلخل متغیر تشکیل شده و همچنین قابلیت تغییر مکان بر روی حوضچه‌ی کشش پژوهشکده‌ی علوم و تکنولوژی زیردریای دانشگاه صنعتی اصفهان را داراست، معرفی خواهد شد و خصوصیات انعکاسی این جذب‌کننده در برابر امواج منظم تولیدی آزمایشگاه مزبور در فرکانس‌های مختلف بررسی خواهد شد.

^۱ Goda and Ippen

^۲ Mesh screen

^۳ Le Mehaute

^۴ Ouellet and Datta

^۵ Twu and Chieu

^۶ Kown et al

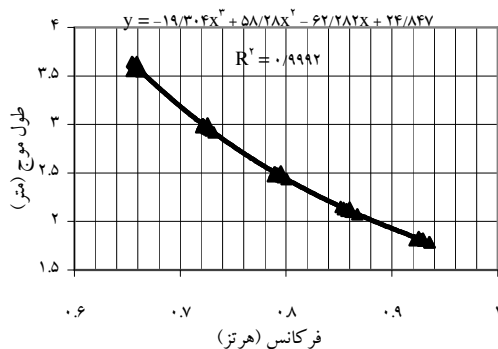
^۷ Liu et al

مشخصات آزمایشگاهی

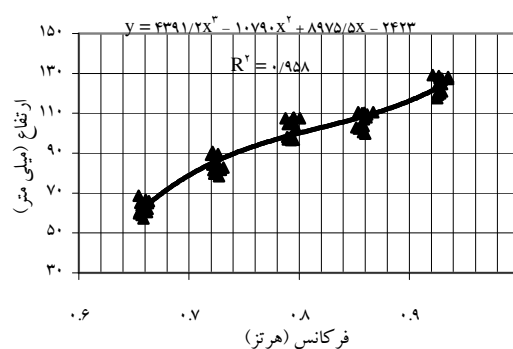
آزمایش‌های انجام شده در این مقاله در حوضچه‌ی کشش آزمایشگاه هیدرودینامیک پژوهشکده‌ی علوم و تکنولوژی زیردریای دانشگاه صنعتی اصفهان صورت گرفته است که دارای ۱۰۸ متر طول، ۳ متر عرض و ۲/۵۰ متر ارتفاع است. سطح آب داخل حوضچه در آزمایش‌های این تحقیق برابر ۲/۲۳ متر است. این حوضچه به یک دستگاه موج‌ساز گوه‌ای با مقطع مثلثی که با حرکت رفت و برگشتی قایم، قابلیت تولید امواج منظم را دارد مجهز شده است. با توجه به محدوده‌ی طول موج‌های تولیدی توسط دستگاه موج‌ساز (۱/۸ تا ۳/۶ متر) امواج تولیدی در شرایط آب عمیق قرار گرفته‌اند. منحنی‌های مشخصه‌ی ارتفاع و طول موج موج‌ساز گوه‌ای برحسب فرکانس موج در شکل (۱)، و مشخصات موج‌ساز گوه‌ای نیز در جدول (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (۱) مشخص است با افزایش فرکانس ارتفاع امواج تولیدی افزایش و طول موج آنها کاهش می‌یابد.

جدول ۱: مشخصات موج‌ساز گوه‌ای.

دامنه‌ی گوه (mm)	ارتفاع گوه (mm)	عرض گوه (mm)	طول گوه (mm)	قدرت موتور (KW)	فرکانس گوه (Hz)
۱۷۰	۴۳۰	۳۳۰	۳۰۰۰	۵/۵	۰/۶۵ - ۱



(ب)



(الف)

شکل ۱: منحنی‌های (الف) ارتفاع موج، (ب) طول موج، موج‌ساز گوه‌ای پژوهشکده‌ی علوم و تکنولوژی زیردریای دانشگاه صنعتی اصفهان بر حسب فرکانس موج.

در این تحقیق از سه عدد حسگر موج نگار استفاده شده است. یکی از این حسگرها در فاصله‌ی ۱۸ متری موج‌ساز و برای برداشت پروفیل سطح موج تابشی و دو حسگر دیگر برای برداشت پروفیل موج ترکیبی در جلوی جذب‌کننده طبق روش گودا و سوزوکی (۱۹۷۶) قرار گرفته‌اند. حسگرهای استفاده شده در این تحقیق از نوع مقاومتی^۱ بوده و شامل دو میله‌ی فولادی موازی باهم است که در آب قرار می‌گیرند. حسگرهای موج‌نگار هرکدام دارای یک مبدل الکتریکی^۲ است. مقاومت الکتریکی حجم آب بین دو میله با تغییر ارتفاع سطح آب بین دو میله‌ی حسگر تغییر می‌کند و این باعث ایجاد ولتاژهای مختلف در دو سر میله‌های حسگر می‌گردد. ولتاژ خروجی مبدل الکتریکی از طریق کابلی به کارت جمع‌آوری داده^۳ داخل کامپیوتر انتقال داده می‌شود. قبل از برداشت پروفیل سطح موج توسط حسگرهای موج‌نگار این حسگرها از نظر ایستایی^۴ و پویایی^۵ کالیبره شده‌اند.

جذب‌کننده‌ی موج پیشرونده با سه درجه آزادی

برای طراحی جذب‌کننده‌ی امواج، از ترکیب صفحات مشبک متخلخل و سطوح شیب‌دار استفاده شده است. به‌منظور جذب بهتر موج، امکان تغییر زاویه صفحات مشبک و قاب نگهدارنده‌ی آنها فراهم گردیده است. این سیستم توانایی قرارگیری در قسمت‌های مختلف حوضچه (حرکت در طول حوضچه) را دارا است. جذب‌کننده‌ی موج استفاده شده در این تحقیق از نوع پیشرونده^۶ (کاهش تخلخل صفحات مشبک از سمت بالادست به

^۱ Resistive type

^۲ Transducer

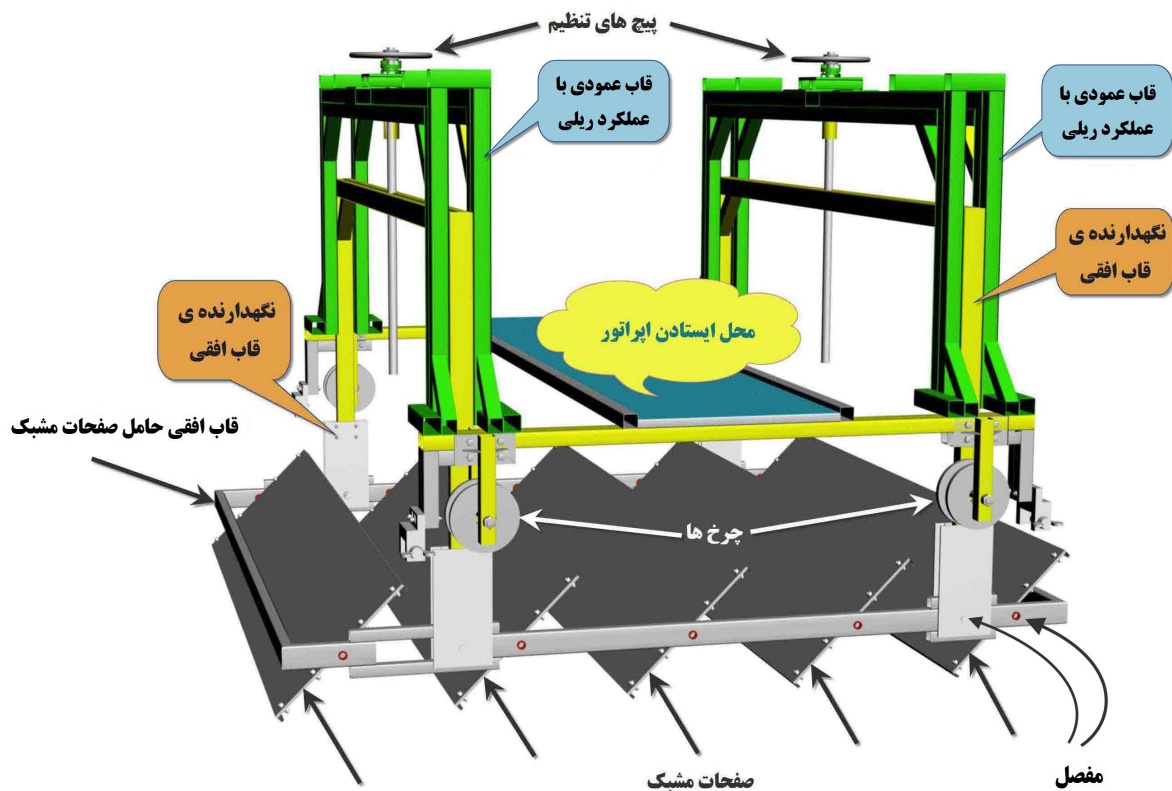
^۳ Data Acquisition Card

^۴ Static calibration

^۵ Dynamic calibration

^۶ Progressive wave absorber

پایین دست جریان آب) است. این سیستم با سه درجه آزادی^۱ (تغییر زوایای صفحات مشبک، تغییر زاویه‌ی قاب پایینی حامل صفحات مشبک و تغییر ارتفاع استغراق صفحات)، می‌تواند در جذب انرژی موج مؤثر واقع شود، شکل (۲).



شکل ۲: جذب کننده‌ی پیشرونده با سه درجه آزادی.

یکی از اجزای این جذب کننده، قاب‌های عمودی است که به عنوان تکیه‌گاه برای بخش داخل آب عمل می‌کنند. هر یک از دو قاب عمودی با استفاده از پیچ‌های تنظیم می‌تواند ابتدا یا انتهای قاب حامل صفحات مشبک را از نظر مکان و زاویه تنظیم کند. قاب‌های عمودی از دو قسمت تشکیل شده‌اند که بخش نگهدارنده‌ی قاب حامل صفحات، در بین آنها حرکت می‌کند. چرخ‌ها از جنس تفلون و به منظور جابجایی بهتر سیستم روی حوضچه و قرار دادن جذب کننده در هر موقعیتی از حوضچه در نظر گرفته شده است. برای ایجاد تغییرات دلخواه در درجه‌های آزادی مورد نیاز از قبیل ارتفاع قاب حامل صفحات مشبک، زاویه‌ی آن و تغییر زاویه‌ی صفحات مشبک، از پیچ‌های تنظیم استفاده می‌شود.

قاب پایینی حامل صفحات مشبک در داخل آب قرار می‌گیرد و زاویه و ارتفاع آن قابل تنظیم است. این قاب حاوی پنج عدد صفحه‌ی مشبک بوده که محور آنها عمود بر راستای کانال است. نگهدارنده‌های قاب افقی متصل به صفحات مشبک به صورت کشویی درون قاب‌های عمودی حرکت می‌کنند. آنها به پیچ‌های تنظیم بسته شده و حرکت می‌کنند. انتهای نگهدارنده‌ها به قاب افقی متصل می‌شود. اتصال نگهدارنده‌ها به قاب افقی به صورت مفصل بوده و قابلیت تغییر زاویه‌ی قاب را فراهم می‌کند، شکل (۲).

صفحات مشبک مهم‌ترین بخش سیستم جذب کننده بوده که به قاب پایینی مفصل شده و وظیفه استهلاک انرژی موج را دارند. این جذب کننده دارای قابلیت تعویض صفحات مشبک است که امکان تغییر قطر سوراخ‌ها و همچنین درصد تخلخل را فراهم می‌سازد. تخلخل هر یک از صفحات می‌تواند با سایر صفحات متفاوت باشد. به منظور به دام انداختن موج در بین صفحات، تخلخل صفحات از سمت پیشروی حرکت موج به داخل جذب کننده‌ی موج کم می‌شود، به طوری که صفحه‌ی جلویی در برخورد با امواج دارای بیشترین درصد تخلخل و صفحه‌ی عقبی دارای کمترین تخلخل است. برای مثال، در جذب کننده‌ی موجود چیدمان و تخلخل صفحات مشبک در جدول (۲) آورده شده است. تخلخل صفحات از تقسیم مساحت کل سوراخ‌ها به سطح کل ورق مستطیلی به عرض ۶۰۰ میلی‌متر و طول ۲/۸۳ متر به دست می‌آید. صفحات متخلخل استفاده شده در این جذب کننده با توجه به تخلخل‌های موجود در صنعت انتخاب گردیده است.

^۱ Degree of freedom

جدول ۲: مشخصات ورق‌های متخلخل جذب‌کننده.

مساحت کل ورق / مساحت کل سوراخ‌ها = درصد تخلخل	قطر سوراخ (mm)	شماره صفحه از جلو به عقب
۴۱/۳	۱۵	۱
۳۱/۱	۱۲	۲
۲۷/۳	۶	۳
۱۸	۵	۴
۱۸	۵	۵

کالیبراسیون حسگرهای موج‌نگار

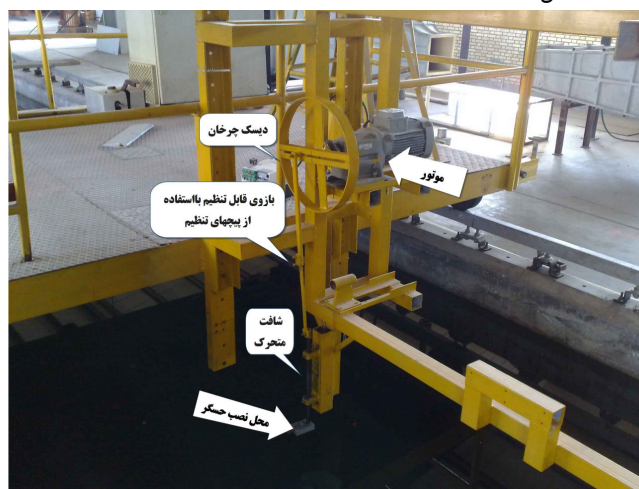
کالیبراسیون حسگرهای موج‌نگار به‌طور کلی به دو صورت ایستا و پویا انجام می‌گیرد. در آزمایشگاه، کالیبراسیون حسگرهای موج‌نگار توسط سیستم جمع‌آوری اطلاعات^۱ انجام می‌گیرد. سیستم جمع‌آوری اطلاعات مجموعه‌ای از حسگرهای موج‌نگار، مبدل الکتریکی، کارت جمع‌آوری داده، رایانه و نرم‌افزار داده‌برداری از پروفیل موج است.

الف) کالیبراسیون ایستا

در این نوع کالیبراسیون، حسگر موج‌نگار به‌صورت عمودی در فواصل مشخصی نسبت به تراز آب ساکن^۲ و به‌آرامی پایین و بالا می‌رود و خروجی حسگر در هر موقعیت ضبط می‌شود [۶]. کالیبراسیون ایستا با استفاده از سازه‌ی نگهدارنده‌ای که از دو طرف به بدنه‌ی حوضچه متصل شده است و همچنین پایه‌های فلزی و میله‌های رابط که در فواصل معینی نشانه‌گذاری شده است، انجام می‌گیرد. با نصب پایه‌ی فلزی بر روی سازه‌ی نگهدارنده و نصب حسگر به میله‌ی رابط نشانه‌گذاری شده روی پایه‌ی فلزی، حسگر موج‌نگار برای حرکت عمودی در آب آماده می‌شود. میله‌ی اتصال بین حسگر و پایه‌ی فلزی، در فواصل ۵۰ میلی‌متری نشانه‌گذاری شده است. قبل از حرکت حسگر، کابل اتصال حسگر به مبدل الکتریکی وصل شده و با اتصال مبدل الکتریکی به کارت جمع‌آوری داده در داخل رایانه، راه‌اندازی حسگر و مبدل الکتریکی انجام می‌گیرد. با پایین و بالا بردن حسگر در فواصل ۵۰ میلی‌متری و با برقراردن شرایط سکون در هر گام، ولتاژ متناظر هر موقعیت ارتفاعی با استفاده از رایانه قرائت می‌شود. با جمع‌آوری داده‌ها و ترسیم رفتار بین خروجی‌های ضبط شده (ولتاژها) و ارتفاع‌های متناظر با آن خروجی‌ها و برازش^۳ یک منحنی از این داده‌ها، رابطه‌ی کالیبراسیون هر حسگر به‌دست می‌آید.

ب) کالیبراسیون پویا

کالیبراسیون پویا با قرار دادن یک دیسک چرخان که حسگر به‌آن متصل است، انجام می‌گیرد. حرکت حسگر به‌صورت رفت و برگشتی در داخل آب صورت می‌گیرد. کالیبراسیون پویا نشان‌دهنده‌ی صحت پاسخ دینامیکی حسگر در برابر تغییرات سریع در تراز سطح آب است [۶]. در آزمایشگاه با استفاده از سیستم نوسان‌گر چرخ و لنگ که شامل موتور و درایور آن و دیسک چرخان همراه با بازوی قابل تنظیم و شافت متحرک است، کالیبراسیون پویا صورت گرفته است، شکل (۳).



شکل ۳: نمایش سیستم نوسان‌گر استفاده شده برای کالیبراسیون پویا.

^۱ Data Acquisition System(DAS)

^۲ Still water

^۳ Curve fitting

شعاع دیسک چرخان در این تحقیق ۶۲ میلی‌متر است، پس از کالیبراسیون ایستا، حسگر موج‌نگار به دیسک چرخان سیستم نوسان‌گر متصل گردیده و دامنه‌ی حرکت آن تنظیم می‌شود (۶۲ میلی‌متر). فیزیک حاکم بر حرکت دیسک چرخان و به‌تبع آن حرکت رفت و برگشتی حسگر یک حرکت سینوسی است. با نمونه‌برداری از حرکت رفت و برگشتی حسگر در آب ساکن، سیگنال برداشتی بایستی دارای دامنه‌ی ۶۲ میلی‌متر باشد، چراکه با چرخش دیسک، حسگر موج به اندازه‌ی دیسک در آب ساکن بالا و پایین می‌رود. با مقایسه دامنه موج ثبت شده توسط حسگر و دامنه حرکت چرخ گردان در دوره‌های مختلف دوران چرخ، کالیبراسیون پویا انجام گردید.

روش انجام آزمایش‌ها

در طی آزمایش‌های این تحقیق، جذب‌کننده‌ی موج در فاصله‌ی ۵۰ متری موج‌ساز قرار گرفته تا انعکاس خالص ناشی از خود جذب‌کننده و بدون اثر دیواره‌ی انتهایی حوضچه به‌دست آید. از یک حسگر در فاصله‌ی ۱۸ متری موج‌ساز برای تعیین خصوصیات موج تابشی و از دوحسگر در جلوی جذب‌کننده‌ی موج برای محاسبه‌ی ضریب انعکاس (روش گودا و سوزوکی) استفاده شده است. دو حسگر موجود در جلوی سازه پروفیل امواج ایستای نسبی^۱ را برداشت می‌کنند. متغیرهای روش گودا، x_1 و ΔL است که به‌ترتیب فاصله‌ی حسگر اول از جذب‌کننده و اختلاف فاصله‌ی بین دوحسگر را نشان می‌دهند. مقادیر این متغیرها با توجه به عدم وجود نقاط منفرد (برای انتخاب ΔL) و عدم وجود اغتشاشات در نزدیکی سازه (برای انتخاب مقدار x_1) انتخاب گردیده است. حداقل مقدار برای x_1 در برابر امواج منظم $0.2L$ (این مقدار تا $0.6L$ نیز می‌تواند اختیار گردد) و برای ΔL مقداری بین $0.05L$ و $0.45L$ است که L طول موج است [۱۱، ۱۲]. مقدار ΔL نبایستی برابر مضرب صحیحی ($n=0, 1, 2, \dots$) از نصف طول موج اختیار شود. در حقیقت به‌ازای مقدار صحیح یک ($n=1$)، به‌اندازه‌ی $0.05L$ حاشیه‌ی اطمینان در نظر گرفته شده است، جدول (۳).

جدول ۳: پارامترهای روش گودا و سوزوکی.

$x_1 = 0.3L(m)$	$\Delta L = 0.225L(m)$	$0.45L(m)$	$0.05L(m)$	طول موج (متر)
۰/۵۴۹	۰/۴۱	۰/۸۲۳	۰/۰۹۱۵	۱/۸۳
۰/۷۵۳	۰/۵۶۵	۱/۱۳	۰/۱۲۵	۲/۵۱
۱/۰۶۵	۰/۸	۱/۶	۰/۱۷۷	۳/۵۵

برای اطمینان از عدم وجود نقطه‌ی منفرد مقدار $0.225L$ برای فاصله‌ی بین حسگرها و مقدار $0.3L$ برای جلوگیری از اغتشاشات مقابل سازه برای فاصله‌ی اولین حسگر از جذب‌کننده‌ی موج انتخاب گردیده است. لازم به‌ذکر است که انتخاب این مقادیر کاملاً اختیاری بوده و می‌توان مقادیر دیگری نیز اختیار گردد و فقط بایستی در محدوده‌ی پیشنهادی باشد. همان‌طور که از جدول (۳) مشخص است، در محدوده‌ی طول‌موج‌های آزمایش شده، برای ΔL کمترین و برای x_1 بیشترین مقدار اختیار گردیده است. کمترین مقدار برای ΔL ، به‌خاطر عدم تغییر این مقدار برای هر آزمایش با عوض شدن پریود موج و به‌تبع آن طول موج، و پوشش دادن آزمایش‌ها در طول موج‌های بزرگ‌تر است. انتخاب بیشترین مقدار برای x_1 نیز به‌علت عدم تغییر این مقدار در آزمایش با فرکانس‌های پایین‌تر است. پس از نمونه‌برداری، با تجزیه و تحلیل تاریخی‌چهی زمانی^۲ برداشت شده توسط دو حسگر موج، با استفاده از یک برنامه رایانه‌ای که بر اساس روش گودا توسط نگارنده نوشته شده دامنه‌های تفکیک شده‌ی^۳ موج تابشی و انعکاسی محاسبه و از آنجا ضریب انعکاس به‌دست آمده است. با آنالیز تاریخی‌چهی زمانی برداشت شده توسط حسگر موجود در ۱۸ متری موج‌ساز، پارامترهای موج تابشی نظیر پریود و فرکانس و طول موج برای استفاده در برنامه‌ی محاسبه‌ی ضریب انعکاس به‌دست می‌آید. لازم به‌ذکر است که با توجه به این‌که امواج تولیدی در شرایط آب عمیق قرار دارند طول موج تابشی با استفاده از پریود موج و از رابطه‌ی (۱) که در سیستم SI صادق است به‌دست می‌آید:

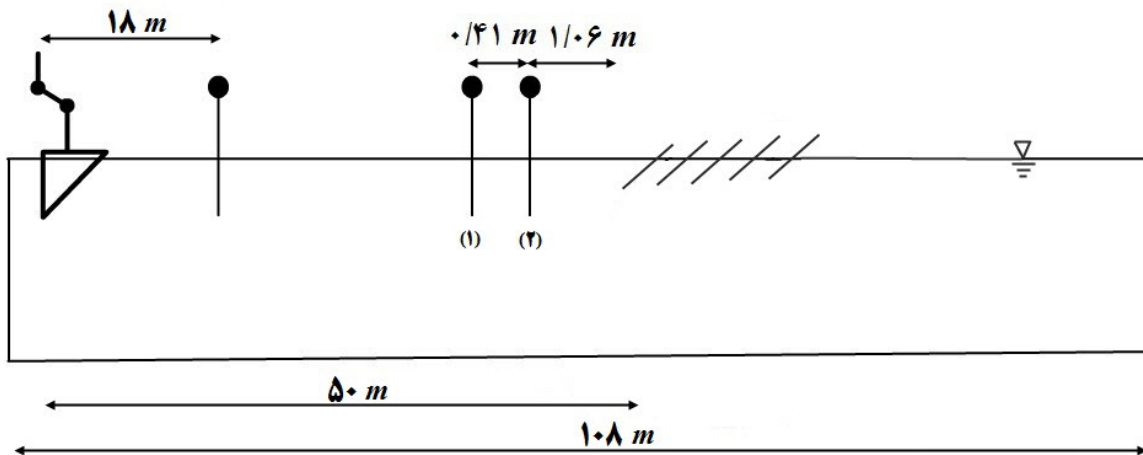
$$L = 1.56T^2 \quad (۱)$$

که در آن L طول موج به متر و T پریود موج بر حسب ثانیه است. در شکل (۴) که چیدمان حسگرهای موج‌نگار بر روی حوضچه نشان داده شده است، مقطع موج‌ساز گوه‌ای و صفحات مشبک جذب‌کننده‌ی موج نیز نمایش داده شده است.

^۱ Partial standing wave

^۲ Time series

^۳ Resolution



شکل ۴: چیدمان حسگرهای موج‌نگار بر روی حوضچه.

لازم به توضیح است که محاسبه‌ی ضریب انعکاس با استفاده از روش گودا و سوزوکی، مطابق با روابط زیر برای دامنه‌های تفکیک شده‌ی امواج تابشی و انعکاسی به‌دست می‌آید که تفکیک این دامنه‌ها از پروفیل موج مرکب (موج ایستای نسبی) تشکیل شده در جلوی سازه صورت می‌گیرد [۱۱، ۱۲]:

$$a_l = \frac{1}{2|\sin k\Delta L|} \left[(A_2 - A_l \cos k\Delta L - B_l \sin k\Delta L)^2 + (B_2 + A_l \sin k\Delta L - B_l \cos k\Delta L)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$a_r = \frac{1}{2|\sin k\Delta L|} \left[(A_2 - A_l \cos k\Delta L + B_l \sin k\Delta L)^2 + (B_2 - A_l \sin k\Delta L - B_l \cos k\Delta L)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

که در روابط فوق، a_l و a_r دامنه‌های تفکیک شده‌ی امواج تابشی و انعکاسی، k عدد موج، ΔL فاصله‌ی بین دو حسگر موج در مقابل سازه و ضرایب A_1, B_1, A_2, B_2 چهار ضریب ثابت که ترکیبی از مجهولات مسأله (دامنه و فازهای امواج تابشی و انعکاسی) است، می‌باشند. محاسبه‌ی مقدار روابط (۲) و (۳) منوط به محاسبه‌ی چهار ضریب ثابت A_1, B_1, A_2 و B_2 است. ضرایب فوق‌الذکر را می‌توان به کمک سیگنال‌های سینوسی و کسینوسی به‌دست آورد. در این مقاله به روش محاسبه‌ی یکی از این ضرایب اشاره می‌شود. در صورتی که یک سیگنال کسینوسی با دامنه ۱ و فاز صفر به‌صورت $F(t) = 1 \cos(\omega t)$ در طرفین پروفیل موج مرکب:

$$\eta_l = (\eta_l + \eta_r)_{x=x_l} = A_l \cos \omega t + B_l \sin \omega t \quad (4)$$

که توسط حسگر ۱ [شکل (۴)] برداشت می‌شود ضرب گردد رابطه‌ی زیر حاصل می‌گردد:

$$\eta_l \cdot F(t) = A_l \cos \omega t \cos \omega t + B_l \sin \omega t \cos \omega t \quad (5)$$

در رابطه‌های (۴) و (۵)، ω فرکانس زاویه‌ای، t زمان بر حسب ثانیه، η_l پروفیل برداشت شده توسط حسگر ۱، η_r و η_l به‌ترتیب پروفیل امواج تابشی و انعکاسی هستند که در محل حسگر ۱ با یکدیگر ترکیب شده‌اند. با استفاده از روابط مثلثاتی و متوسط‌گیری از طرفین رابطه‌ی (۵) و ساده‌سازی، رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$C = \eta_l F(t) \cdot \frac{1}{N} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_l}{2} + \frac{A_l}{2} \cos 2\omega n T_s + \frac{B_l}{2} \sin 2\omega n T_s \quad (6)$$

در این رابطه T_s زمان نمونه‌برداری، n عدد صحیح که مقادیر ۰ و ۱ و ۲ و... را به خود اختصاص می‌دهد و N تعداد کل نمونه‌های گسسته‌ی برداشت شده می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که طرف چپ رابطه‌ی (۶) حاصل ضرب یک بردار ستونی (η_l) و یک بردار سطری ($F(t)$) است که حاصل آن برابر مقدار ثابت C است. به دلیل خاصیت نوسانی عبارات سینوسی و کسینوسی در سمت راست رابطه‌ی (۶) متوسط این عبارتها صفر خواهد شد و رابطه‌ی (۶) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$C = \frac{A_l N}{2N} = \frac{A_l}{2} \Rightarrow A_l = 2C \quad (7)$$

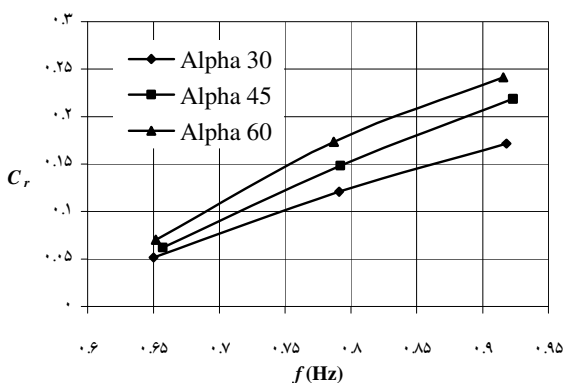
جزئیات بیشتر مربوط به نحوه‌ی محاسبه‌ی سایر ضرایب را می‌توان در مرجع [۱۳] یافت.

نتایج

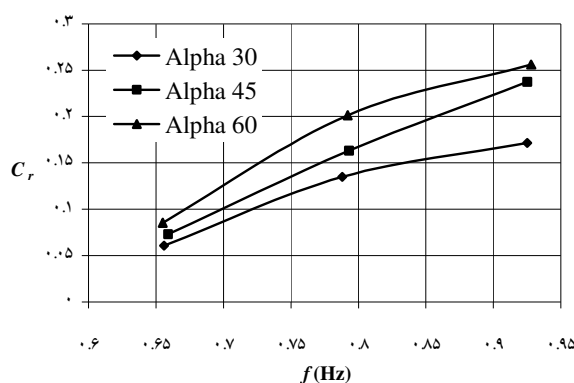
آزمایش‌هایی در زوایای مختلف صفحات مشبک و نیز زوایای مختلف قاب حامل صفحات مشبک جذب‌کننده انجام گرفت. این آزمایش‌ها در سه فرکانس از امواج منظم تولیدی موج‌ساز و در استغراق ثابت ۳۰۰ میلی‌متر برای صفحات متخلخل و در شیب صفر و ۵۵٪ (زاویه $3/18^\circ$ درجه) برای قاب پایینی حامل صفحات و در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق برای صفحات متخلخل انجام گرفت. لازم به ذکر است که شیب ۵۵٪ با ایجاد اختلاف ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر بین بالادست و پایین‌دست جذب‌کننده و با توجه به فاصله‌ی افقی ۱/۸۰ متری بین ابتدا و انتهای قاب افقی به‌دست می‌آید. در شکل (۵) زاویه‌ی قاب (β) و زاویه‌ی صفحات مشبک (α) نشان داده شده است. β در اینجا بر حسب درصد بیان شده است. نتایج مربوط به آزمایش‌ها برای قاب افقی حامل صفحات در شکل (۶) نشان داده شده است که C_r ضریب انعکاس و f فرکانس موج است.



شکل ۵: نمایش زاویه‌ی قاب و زاویه‌ی صفحات.



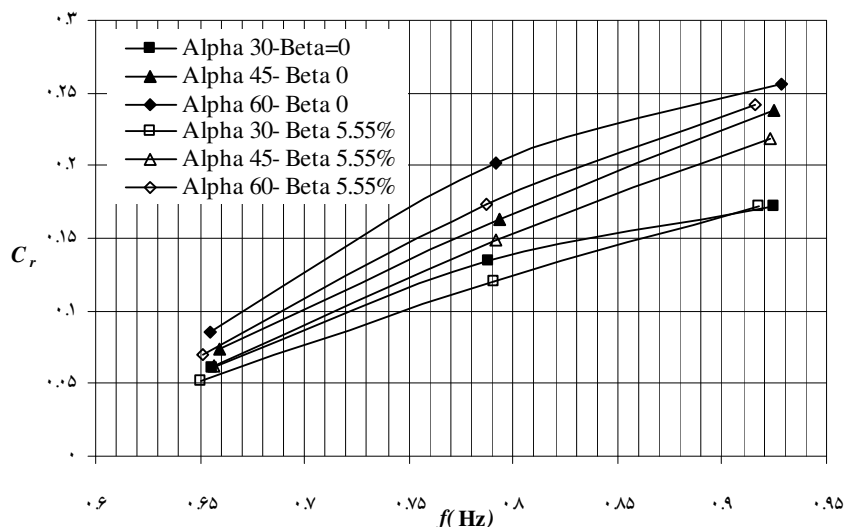
(ب)



(الف)

شکل ۶: تغییرات ضریب انعکاس در برابر فرکانس موج در زوایای مختلف صفحات؛ (الف) شیب قاب ۰، (ب) شیب قاب ۵۵٪ (۳/۱۸ درجه).

همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است، با افزایش فرکانس موج ضریب انعکاس موج افزایش یافته است. علت این افزایش زیاد شدن ارتفاع موج با افزایش فرکانس آن است. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود در هر زاویه از قاب هراندازه زاویه‌ی صفحات متخلخل (α) افزایش یافته است، ضریب انعکاس نیز بیشتر شده است. کمترین ضرایب انعکاس در زاویه‌ی ۳۰ درجه برای صفحات در شیب صفر و ۵۵٪ حاصل شده است. برای مقایسه بین زوایای حامل صفحات در دو حالت زاویه‌ی قاب پایینی حامل صفحات مشبک نسبت به یکدیگر می‌توان به شکل (۷) رجوع کرد.



شکل ۷: تغییرات ضریب انعکاس در برابر فرکانس موج در شیب قاب صفر و ۵۵٪.

همان‌طور که از شکل (۷) مشخص است، این جذب‌کننده در هر زاویه‌ای از صفحات که قاب به‌صورت شیب‌دار قرار گرفته، نسبت به حالت نظیر خود که قاب حامل صفحات دارای شیب صفر است، ضریب انعکاس کمتری دارد. هنگامی که قاب حامل صفحات شیب‌دار درون آب قرار می‌گیرد، صفحاتی که در پایین‌دست قرار دارند، از لحاظ ارتفاع بالاتر قرار گرفته‌اند [همانند شکل (۵)]. هنگام برخورد موج با این سیستم امکان عبور موج از روی صفحات بالادست وجود داشته و موج بین صفحات پایین‌دست به‌دام افتاده و انرژی موج در بین صفحات مستهلک می‌شود. از این‌رو اتلاف انرژی در این حالت نسبت به حالتی که قاب دارای شیب صفر باشد، زیادتر بوده و ضریب انعکاس کمتری به‌دست می‌آید.

خصوصیات امواج تابشی تولیدی و امواج انعکاسی از جذب‌کننده‌ی موج در حالتی که قاب پایینی حامل صفحات متخلخل افقی است در جدول (۴) نشان داده شده است که a_I و a_R به‌ترتیب دامنه‌های تفکیک شده‌ی امواج تابشی و انعکاسی بر حسب میلی‌متر است. لازم به توضیح است که طول موج (L)، فرکانس موج (f) و ارتفاع (H) همگی پارامترهای موج تابشی هستند که از آنالیز سیگنال برداشت شده توسط حسگر قرار داده شده در فاصله‌ی ۱۸ متری موج‌ساز به‌دست آمده‌اند.

جدول ۴: مشخصات امواج تابشی و انعکاسی در حالت شیب قاب صفر.

$\beta = 0^\circ$	$f(\text{Hz})$	$L(\text{m})$	$H(\text{mm})$	$a_R(\text{mm})$	$a_I(\text{mm})$	C_r
$\alpha = 30^\circ$	۰/۶۵۶	۳/۶۱	۵۷/۲	۰/۷۶	۱۲/۵۶	۰/۰۶۰۵
	۰/۷۸۸	۲/۵۶	۱۰۷/۵	۴/۹۳	۳۶/۵۶	۰/۱۳۵
	۰/۹۲۵	۱/۷۸	۱۱۹/۶	۷/۷۱	۴۴/۹	۰/۱۷
$\alpha = 45^\circ$	۰/۶۵۹	۳/۵۹	۶۷	۱	۱۳/۷	۰/۰۷۳
	۰/۷۹۳	۲/۵۳	۹۸/۵	۵/۴۴	۳۳/۴	۰/۱۶۳
	۰/۹۲۵	۱/۸۲	۱۲۱	۱۱/۴۷	۴۸/۳۳	۰/۲۳۷
$\alpha = 60^\circ$	۰/۶۵۵	۳/۶	۵۹	۱/۰۷	۱۲/۴۹	۰/۰۸۵
	۰/۷۹۲	۲/۴۸	۹۶/۹	۶/۱۱	۳۰/۳۱	۰/۲۰۱
	۰/۹۲۸	۱/۷۸	۱۲۴	۱۲	۴۶/۹	۰/۲۵۶

نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم جذب‌کننده‌ی با ساختار و مکانیزم جدیدی معرفی و ضریب انعکاس این جذب‌کننده در حالت افقی و شیب‌دار بودن قاب پایینی حامل صفحات بررسی شده است. در هر حالت، اثر تغییر زوایای صفحات متخلخل نیز لحاظ شده است. از نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌توان گفت برای جذب انرژی بیشتر در سیستم این جذب‌کننده بهتر است این جذب‌کننده به‌صورت شیب‌دار و صفحات متخلخل در کمترین زاویه (30°) نسبت به افق قرار گیرند.

تشکر و قدردانی

مؤلفین این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از جناب آقای مهندس مهدی مسیبی به جهت زحمات ایشان در طراحی و ساخت سیستم جذب‌کننده‌ی موج پژوهشکده‌ی علوم و تکنولوژی زیردریای دانشگاه صنعتی اصفهان اعلام می‌دارند.

مراجع

- [1] Greslou, L., and Y. Mahe, "Etude du coefficient de reflection d'une houle sur un obstacle constitue' par un plan incline." Proceedings of the Fifth Conference on Coastal Engineering, pp. 68-83, 1954.
- [2] Straub, L.G., Bowers, C.E., and Herbich, J.B., "Laboratory tests of permeable wave absorbers." Proceedings of the 6th Coastal Engineering Conference, Council on Wave Research, The Engineering Foundation, pp 729-742, 1957.
- [3] Goda, Y., and Ippen, A.T., "Theoretical and experimental investigation of wave energy dissipaters composed of wire mesh screens." Hydrodynamics Laboratory Report No. 60, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1963.
- [4] Le Mehaute, B., "Progressive wave absorber." Journal of Hydraulic Research, Vol. 10, No. 2, pp. 153-189, 1972.
- [5] Ouellet, Y., and Datta, I., "A survey of wave absorbers." Journal of Hydraulic Research, Vol. 14, No. 4, pp. 265-280, 1986.
- [6] Hughes, S.A., *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*, Advanced Series on Ocean

- Engineering, Volume 7, Singapore, World Scientific, 568p, 1993.
- [7] Chegini, V. "Experimental study of a permeable sloping wave absorber." Research Report, No. 184, 1993.
- [8] Twu, S.W, and Chieu, C.C. "A highly wave dissipation offshore breakwater." Journal of Ocean Engineering, Vol. 27, pp. 315-330, 2000.
- [9] Kwon, S.H., Moon, W.M., and Lee, H.S. "Experimental and numerical studies on the development of new wave absorber." Journal of Ocean Engineering, No. 30, pp. 185-203, 2003.
- [10] Liu, Y., Li, Y.C., and Teng, B. "Wave interaction with a perforated wall breakwater with a submerged horizontal porous plate." Journal of Ocean Engineering, No. 34, pp. 2364-2373, 2007.
- [11] Goda, Y., *Random seas and design of maritime structures*, University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 443p, 1985.
- [12] Goda, Y., and Suzuki, Y., "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments." Proceeding of 15th Coastal Engineering Conference, ASCE, Vol. 1, pp. 828-845, 1976.
- [۱۳] هدائی، س.م.ر.، "مطالعه‌ی آزمایشگاهی جذب‌کننده‌ی موج آب منحنی‌شکل در حوضچه‌های کشش." پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.