علوم و مهندسی آبیاری
جلد ٤١، شماره‌ی۳، پاییز ۹۷، ص. ۱۰۲-۸۹

# ارزیابی فشار دینامیکی وارد بر صفحه موج نفوذپذیر ترکیبی تحت تابش امواج منظم

نوال آزم[1*]، فرزین سلماسی[2]، محمدعلی لطف الهی یقین[3]، جواد پارسا[4] و علیرضا مجتهدی[5]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه تبریز naval.azam@yahoo.com
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.
۳- استاد گروه عمران-آب، دانشگاه تبریز.
۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.
۵- دانشیار گروه عمران-آب، دانشگاه تبریز.

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۴

## چکیده

**سازه‌های عمودی به‌طور گسترده در سراسر دنیا به‌منظور حفاظت از سواحل، برای موج‌شکن‌های نوع کیسونی و به شکل دیوار ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از صفحه موج عمودی می‌تواند راه حل مؤثری برای حل مشکل اتلاف انرژی موج زمانی‌که امکان به‌کارگیری سازه توده سنگی شیب‌دار وجود ندارد، باشد. در این مطالعه، فشار وارد بر جانمایی‌های متفاوت صفحه موج ترکیبی تحت تابش امواج منظم به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. صفحه موج یک دیوار نفوذپذیر است که از بالای سطح آب تا سطح بستر گسترش یافته است. فاصله بین لوله‌های سازه شرایط تبادل آب دریا، انتقال رسوب و عبور ماهی‌ها را فراهم می‌کند. نتایج این مطالعه امکان طراحی بهتر سازه‌های عمودی را ایجاد می‌کند. آزمایش‌ها نشان داد که فشار بی‌بعد ناشی از برخورد موج منظم با صفحه موج با کاهش عمق آب نسبی و افزایش عمق جانمایی افزایش می‌یابد. این افزایش در اثر افزایش عمق جانمایی در بیش‌ترین حالت برای سازه ترکیبی ۳/۲-۵ حدود ۵۲ درصد و برای سازه ترکیبی ۳/۲-٤ حدود ٤۷ درصد می‌باشد. هم‌چنین تأثیر تغییر عمق جانمایی بر دامنه فشار بیش‌تر از تغییر قطر استوانه‌های سازه می‌باشد.**

**کلید واژه‌ها:** صفحه موج، فشار دینامیکی، امواج منظم، حفاظت از سواحل.

## مقدمه

امواج بر روی سطح آب توسط یک نیروی خارجی که نوعاً منبع آن باد، کشتی در حال حرکت، زمین لرزه بستر دریای کم عمق و یا جاذبه گرانشی خورشید و ماه است، به‌وجود می‌آیند. این نیروها باعث تبدیل انرژی در قالب موج شده و این انرژی در سطح آب منتقل می‌شود. انرژی مزبور در صورت برخورد با موانعی نظیر سازه‌های دریایی و یا خط ساحلی منعکس شده و یا مستهلک می‌شود. استاندارد جهانی یا دستورالعملی برای تعریف بیشینه ارتفاع قابل پذیرش برای مکان‌های در معرض خطر وجود ندارد. درجه‌ی حفاظت از موج و طراحی مهندسی به هزینه‌ی قابل پذیرش کارفرما، مشخصات منطقه، شرایط زیست محیطی، اقتصادی، مصالح موجود در منطقه، خطرپذیری و نوع کاربرد سازه بستگی دارد. کارکرد اولیه یک موج‌شکن فراهم نمودن حفاظت از ساحل با کنترل ارتفاع مجاز موج است که در امتداد ساحل می‌تواند منتقل شود. هنگامی‌که امواج آب به یک موج‌شکن ضربه می‌زنند، انرژی موج تابشی منعکس می‌شود، مقداری از انرژی بواسطه‌ی موج شکن تلف می‌شود و انرژی باقی‌مانده به پشت مانع منتقل می‌شود. موج‌شکن‌ها بر اساس درجه‌ی حفاظت‌شان به دو مدل موج‌شکن‌هایی برای حفاظت کامل ( Fully protection breakwaters) مانند موج شکن‌های توده سنگی، کیسونی، مرکب عمودی و غیره و موج‌شکن‌هایی برای حفاظت جزئی ( Partial protection breakwaters) مانند موج‌شکن‌های منفذدار، شکاف‌دار، شمعی و غیره) طبقه‌بندی می‌شوند. یکی از اهداف اصلی مهندسی سواحل ساخت بنادر برای کاهش انرژی موج ورودی به ناحیه‌ی حفاظت شده است، در حالی‌که گردش آب درون بندر حفظ شود. موج‌شکن‌های نفوذپذیر یک گزینه‌ی مناسب برای رسیدن به این هدف می‌باشند. این موج‌شکن‌ها جریان یا فعالیت موج را قطع نمی کنند و انتقال رسوب را کاملاً متوقف نمی‌سازند. این فاکتورها موجب شده موج‌شکن نفوذپذیر با محیط زیست هم‌خوانی بیش‌تری داشته و در طولانی مدت تعادل در منطقه را نسبت به موج‌شکن توده سنگی بهتر حفظ نماید. در حقیقت بسیار مناسب است که این سازه صفحه موج نامیده شود. زیرا مانند یک صفحه در برابر امواج عمل کرده و اثرات موج را بدون متوقف کردن کامل فعالیت موج و به‌صورت انتقال بخشی از انرژی موج کاهش می‌دهد (Yagci et al., 2006).

ساخت و طراحی یک موج‌شکن اصولی براساس توجه به فشار و نیروی وابسته به آن است. روش متداول پیش‌بینی فشار (دینامیکی و هیدرواستاتیکی) روی دیوار عمودی نمی‌تواند برای پیش‌بینی فشار روی صفحه‌ی موج استفاده گردد. از آن‌جایی‌که آب روی جان‌پناه صفحه موج وجود دارد، فشار هیدرواستاتیک وارد بر صفحه‌ی موج کم‌تر از دیوار حائل است. بیان فشار هیدرواستاتیک به این دلیل می‌باشد که تفاوت سطح آب روی هر

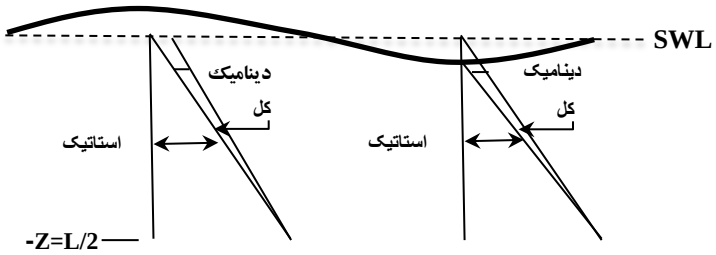
دو سمت صفحه به‌علت اختلاف در فاز و ارتفاع بین امواج تابشی و منتقل شونده است (رابطه ۱).

$$P_h = \rho g \Delta d \qquad (۱)$$

که $P_h$ فشار هیدرواستاتیک، $\Delta d$ تفاوت لحظه‌ای در عمق بین جلو و پشت صفحه، $\rho$ چگالی سیال $g$ شتاب گرانش می‌باشد (Hall, 2000). توزیع عمودی فشار ناشی از تابش امواج در شکل (۱) نشان داده شده است. $L$ طول موج می‌باشد.

انواع جدید سازه‌های تلف کننده انرژی به‌طور گسترده به‌منظور دستیابی به حفاظت از سواحل، پیشگیری از تخریب منظره طبیعی و بهبود استفاده از فضای ساحلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از مطالعات انجام شده با هدف بررسی فشار دینامیکی وارد بر موج‌شکن‌های نفوذپذیر می‌توان به تحقیقات Anandkumar et al. (1995) که به بررسی فشار حول یک پایه استوانه‌ای مایل به‌صورت آزمایشگاهی تحت تابش امواج منظم پرداختند، اشاره نمود. همچنین Sundar et al. (1999) توزیع فشار دینامیکی پیرامون یک استوانه مایل را تحت شرایط امواج غول پیکر (Freak waves) بررسی نمودند. Sahoo et al. (2000) به دام انداختن و تولید امواج سطحی توسط موانع عمودی مستغرق نفوذپذیر یا صفحات کارگذاشته شده در انتهای یک کانال نیمه محدود بلند با عمق محدود برای آرایش‌های مختلف مانع و صفحه را مورد بررسی قرار دادند. در این مجموعه از آزمایش‌ها توزیع فشار دینامیکی برای پارامترهای تخلخل و نوع موج‌ساز (حرکت پدال) تحلیل شد. Neelamani and Sandhya (2005) فشار موج، بالاروی و انعکاس از یک دیوار ساحلی دندانه‌دار را بررسی نمودند، نتایج نشان داد که این سازه انعکاس موج را تا حدود ۴۰-۲۰ درصد کاهش می‌دهد. Yagci et al. (2006) توزیع فشار دینامیکی در امتداد و حول پایه یک صفحه موج پایه‌دار را با تابش امواج منظم و نامنظم با استفاده از مبدل فشار مطالعه نمودند. یکی از مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری فشار، کاهش نمایی مقدار فشار دینامیکی موج بود. هم‌چنین اندازه‌گیری فشار در حول پایه نشان داد بیشینه فشار دینامیکی ناشی از تابش موج بر سازه در زاویه صفر نقطه برخورد موج با پایه ایجاد نمی‌گردد؛ Rageh and Koraim (2010) عمل‌کرد هیدرودینامیکی دیوارهای عمودی با شکاف‌های افقی را بررسی نمودند. مدل دیوار دو قسمت داشت که بخش بالایی نفوذناپذیر و بخش پایینی نفوذپذیر و شامل شکاف‌های افقی با فواصل نزدیک بود. عمل‌کرد موج‌شکن به‌صورت آزمایشگاهی و تئوری به‌شکل تابعی از ضرایب انتقال، انعکاس و اتلاف انرژی موج برای پارامترهای سازه‌ای و موج‌های مختلف ارائه گردید. Kisacik et al. (2012) به‌صورت آزمایشگاهی اثر امواج شکنا روی یک دیوار عمودی با یک پایه افقی را مطالعه نمودند. آن‌ها دریافتند که بیش‌ترین نیرو و فشار در امواج شکنا با یک تله هوایی کوچک ایجاد گردید و بخش افقی مدل مقیاس شده نسبت به بخش عمودی بیش‌تر در معرض ضربه موج قرار گرفت. هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که تغییرات دوره موج تأثیر نسبتاً محدودی روی نتایج دارد. Krishnakumar et al. (2010) تأثیر صفحه محافظ متخلخل را روی کاهش فشار و نیرو بر یک دیوار عمودی در جان‌پناه آن ناشی از حضور امواج برای‌دار از طریق آزمایش‌های فیزیکی مطالعه نمودند. نیروی اعمال شده روی دیوار ناشی از امواج تصادفی نرمال و امواج برای‌دار اندازه‌گیری شد و برای مقایسه با صفحات محافظ موج متخلخل استفاده گردید. نتایج نشان داد نیروها و فشارهای اعمال شده بر دیوار ناشی از امواج تاج کوتاه کم‌تر از امواج تاج بلند است. هم‌چنین کاهش قابل ملاحظه‌ای در نیرو و فشار وارد بر دیوار ناشی از افزایش زاویه موج تابشی مشاهده گردید. Ahmed (2011) رفتار جریان و عمل‌کرد هیدرولیکی موج شکن‌های نفوذپذیر به شکل یک و دو دیوار منفذدار را به کمک یک مدل عددی بر مبنای روش بسط ویژه تابع و آزمون‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. نتایج به‌دست آمده نشان داد بخش نفوذناپذیر پایینی کارایی بیش‌تری برای امواج بلند و متوسط دارد و بخش نفوذناپذیر بالایی اثر معنی‌داری روی همه‌ی انواع موج دارد. Alkhalidi et al. (2015) نیرو و فشار وارد بر مانع عمودی منفذدار منفرد و دوگانه را در موقعیت‌های مختلف در محدوده وسیعی از شرایط امواج نامنظم در دو سمت رو به ساحل و رو به دریا را با آزمایش‌های فیزیکی مطالعه نمود. نتایج نشان داد که تخلخل تأثیر قابل توجهی بر فشار، به‌خصوص در نزدیکی سطح آب دارد. نیروی افقی موج در حالت رو به دریا ۲۰ تا ۲۵ درصد از مقدار رو به ساحل آن کم‌تر گزارش شد، هم‌چنین نیروی وارد بر بخش جلویی موانع دوگانه ۲۰ تا ۲۵ درصد بیش‌تر از دیوار متخلخل منفرد بود.

Shih (2016) کارایی صفحه موج نفوذپذیر قرار گرفته در جلوی یک دیوار ساحلی را از لحاظ کاهش اثر نیرو و فشار موج در شرایط آزمایشگاهی مختلف تحت تابش امواج منظم و نامنظم بررسی نمود. نیروی وارد بر دیوار ساحلی توسط امواج با استفاده از نیروسنج و فشار وارد بر آن با استفاده از مبدل فشار اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد تغییر قطر لوله‌های تشکیل دهنده موج‌شکن که جریان از میان آن‌ها عبور می‌کند روی فشار دینامیکی تأثیر چندانی ندارد.




**شکل ۱- توزیع عمودی فشار موج در آب عمیق(Dean and Dalrimple, 1991)**

به‌علت حضور نیروی لزوجت در سیالات، جدایی جریان در مجاورت لوله‌های سازه ایجاد می‌گردد. انرژی موج توسط گرداب‌های شکل گرفته ناشی از یک شرایط مرزی غیر خطی شامل ترم توان دو سرعت مستهلک می‌گردد. بررسی این شرایط مرزی غیر خطی برای مجموعه‌ای از استوانه‌ها دشوار می‌باشد. بنابراین اطلاع از فشار موج برای طراحی سازه مورد نیاز است Zhu (2011). با مطالعه و بررسی کارهای انجام شده توسط محققین پیشین، مجموعه‌ای از آزمایش‌های فیزیکی برای مطالعه صفحه موج استوانه‌ای ترکیبی طراحی گردید. موج‌شکن‌های لوله‌ای عمدتاً انرژی موج را مستهلک می‌کنند، بخشی را منعکس نموده و بخشی از انرژی موج را منتقل می‌کنند. با عبور موج از میان موج‌شکن سرعت و شتاب ذرات آب به طور ناگهانی تغییر می‌کند و تلاطم ایجاد شده به‌علت این تغییر ناگهانی در حرکت ذرات موج موجب افزایش اتلاف انرژی موج می‌شود. هم‌چنین از آن‌جایی که بخش عمده‌ی انرژی موج به بخش بالایی موج‌شکن وارد می‌شود، حضور میله‌هایی با قطر بیش‌تر در بخش بالایی و حضور میله‌هایی با قطر کمتر در بخش پایینی در کاهش انرژی موج مؤثرتر بوده و از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر می‌باشد. بنابراین استفاده از صفحه موج ترکیبی با ویژگی‌های ذکر شده که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، می‌تواند بسیار مفید باشد. هدف از این مطالعه، اندازه‌گیری فشار دینامیک وارد بر سازه صفحه موج ترکیبی در اعماق مختلف برای طراحی بهتر این سازه می‌باشد، که تاکنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

## مواد و روش‌ها

در مدل‌سازی بنادر و سواحل، اثرات لزوجت را برای عدد رینولدز بالاتر از $10^4$ می‌توان نادیده گرفت. به دلیل تولید امواجی با دوره کوتاه در آزمایش‌ها که تنش‌برشی قابل ملاحظه‌ای را ایجاد نمی‌کنند، امواج لزوجت بسیار پایین و عدد رینولدز بالایی دارند (Hughes, 1993). در نتیجه مقیاس فرودی ۱:۱۰ برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد، که امکان تولید صحیح نیروی اینرسی سیال و گرانش را فراهم می‌کند، هم‌چنین خطاهای ناشی از کشش سطحی نیز قابل ملاحظه نمی‌باشد. موج‌شکن پیشنهادی می‌تواند برای عمق‌های ۱۰-۵ متر مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه آزمایش‌ها در عمق آب ثابت ($d$)، ۰/۶ متر، محدوده ارتفاع موج ($H_i$)، ۰/۰۸-۰/۰۶ متر و دوره موج ($T$)، ۱/۳-۰/۸ ثانیه انجام گرفت. این محدوده مربوط به عمق آب ۶ متر، دوره ۴/۱-۲/۵ ثانیه و ارتفاع موج ۰/۸-۰/۶ متر می‌باشد که با توجه به آمار ثبت شده، در سواحل شمالی ایران رخ می‌دهد. آزمایش‌های مختلف در فلوم موج آزمایشگاه سازه‌های دریایی دانشگاه تبریز به طول ۱۳ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شد. امواج منظم با ارتفاع و دوره مختلف از طریق ایجاد سری زمانی توسط یک موج‌ساز لولایی که در ابتدای فلوم قرار داشت، برای هر آزمایش به مدت ۶۰ ثانیه تولید گردیدند. حرکت امواج، شرایط ایجاد آن‌ها و قدرت مورد نیاز برای تولید امواج از روی تئوری خطی موج به خوبی تعیین می‌گردد. امواج منظم امواجی هستند که خود را در زمان تکرار می‌کنند در حالی‌که جابه‌جایی عمودی سطح آب در یک دوره و فاصله‌ی مشخص یکسان می‌باشد. سرعت انتشار موج به دوره موج بستگی دارد و امواجی با دوره بلندتر سریع‌تر منتشر می‌شوند. نمونه‌ی کلاسیک موج منظم در عمق ثابت موج سینوسی می‌باشد (رابطه ۲).

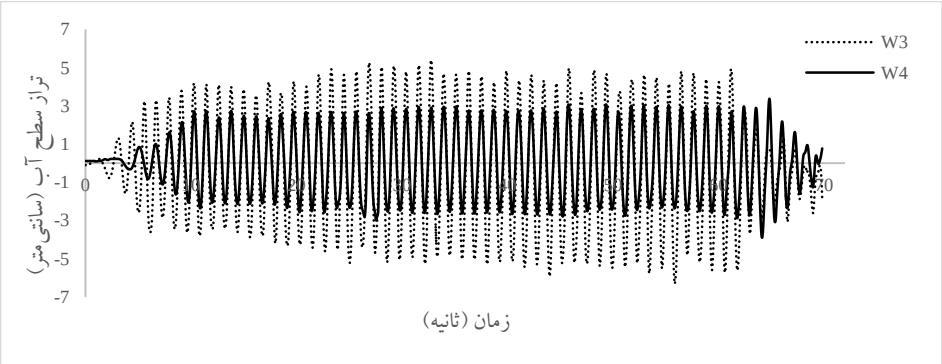
$$\eta(t) = A\cos(kx - \omega t + \varepsilon) \qquad (۲)$$

در معادله‌ی فوق، $\eta$: تراز سطح آب در هنگام موج از سطح ساکن آب، $A$: دامنه، $k$: عدد موج ($2\pi/L$)، $L$: طول موج، $\omega$: فرکانس زاویه‌ای ($2\pi/T$)، $\varepsilon$: فاز فرکانس و $(x,t)$: مکان و زمان را نشان می‌دهد. سری زمانی موج منظم ۶ سانتی‌متری که توسط دو ارتفاع سنج قبل (W3) و بعد (W4) از صفحه موج ثبت گردیده، در شکل (۲) نشان داده شده است.

هر موج به ارتفاع $Hi$ در طول یک دوره، مسافت $L$ را طی می‌کند. اصطلاحات تیزی موج که نسبت ارتفاع به طول موج ($Hi/L$) و سرعت موج که نسبت طول موج به دوره موج ($L/T$) را نشان می‌دهند، معرف شرایط موج می‌باشند. عمق آب نسبی ($d/gT^2$) یکی از پارامترهای بی‌بعد مؤثر برای نشان دادن تغییرات فشار در مدل‌های مختلف سازه صفحه موج می‌باشد که در مطالعات Hall (2010)، Krishnakumar et al. (2000)، Yagci et al. (2006) و سایر محقیقن استفاده شده است. مشخصات موج‌های تابیده شده در آزمایش‌ها در جدول (۱) آورده شده است. اغلب سواحل از سطوح شیب‌دار متخلخل که انرژی موج را از طریق ترکیبی از اتلاف لزوجت و شکست جذب می‌کنند، تشکیل شده‌اند.

برای انجام آزمایش‌ها مدل‌های فیزیکی در آزمایشگاه‌های سازه‌های دریایی، استفاده از سیستم جاذب موج امری ضروری می‌باشد. به‌منظور حذف یا کاهش انرژی موج و اطمینان از عدم تغییر شکل موج توسط امواج منعکس شده در انتهای فلوم و در پشت پدال موج‌ساز از جاذب‌های متنوعی مانند جاذب موج سنگریزه‌ای، جاذب موج ترکیبی و غیره استفاده می‌گردد. اگر میانگین انعکاس کمتر از ۵ درصد انرژی موج تابشی باشد، می‌توان از انعکاس ایجاد شده در حین تحلیل‌ها صرف نظر نمود. در این آزمایش‌ها از جاذبی ترکیبی با شیب ۳۳ درصد (فاصله افقی ۲/۱ متر در مقابل فاصله قائم ۰/۷ متر) به‌منظور استهلاک انرژی موج تابشی در انتهای فلوم موج استفاده گردید، که قابلیت مستهلک نمودن ۹۵–۹۸ درصد از انرژی موج منتقل شده به انتهای فلوم را دارا بود. جزییات مدل و تجهیزات آزمایشگاهی در شکل (۳) آورده شده است. مدل صفحه موج در فاصله ۷ متری از موج‌ساز نصب گردید. صفحه موج از یک چارچوب آهنی که به دیواره‌های فلوم محکم شده بود و تعدادی استوانه افقی با قطرهای مختلف از جنس پی‌وی‌سی تشکیل شده است. در دو سر استوانه پیچ‌هایی وجود دارد که موجب قرارگیری استوانه درون چارچوب می‌شود، برای محکم شدن استوانه درون چارچوب پیچ ابتدای استوانه باز می‌گردد. در این آزمایش‌ها از صفحه موج ترکیبی استفاده گردید. این صفحه شامل دو بخش بود که بخش پایینی آن از استوانه‌هایی با قطر ۳/۲ سانتی‌متر و بخش بالایی آن از استوانه‌هایی با قطر ۴ یا ۵ سانتی‌متر تشکیل شده بود. استوانه‌های ۴ یا ۵ سانتی‌متری تا عمق‌های متغیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر ($y$) زیر سطح میانگین آب ($d$) قرار گرفته و در حد فاصل بستر و قطرهای ۴ یا ۵ سانتی‌متری از استوانه‌هایی با قطر ۳/۲ سانتی‌متر استفاده گردید. فاصله بین استوانه‌ها در همه‌ی آزمایش‌ها برابر ۱ سانتی‌متر و ثابت در نظر گرفته شد. با تغییر قطر استوانه‌های تشکیل دهنده سازه، میزان تخلخل سازه نیز تغییر می‌کند. میزان تخلخل با استفاده از رابطه‌ی $\varepsilon = G/(G+D)$ محاسبه می‌شود. که $G$ فاصله بین استوانه‌ها و $D$ قطر استوانه می‌باشد. در این مجموعه از آزمایش‌ها، محدوده تغییرات تخلخلِ سازه بین ۱۸–۲۲ درصد بود.

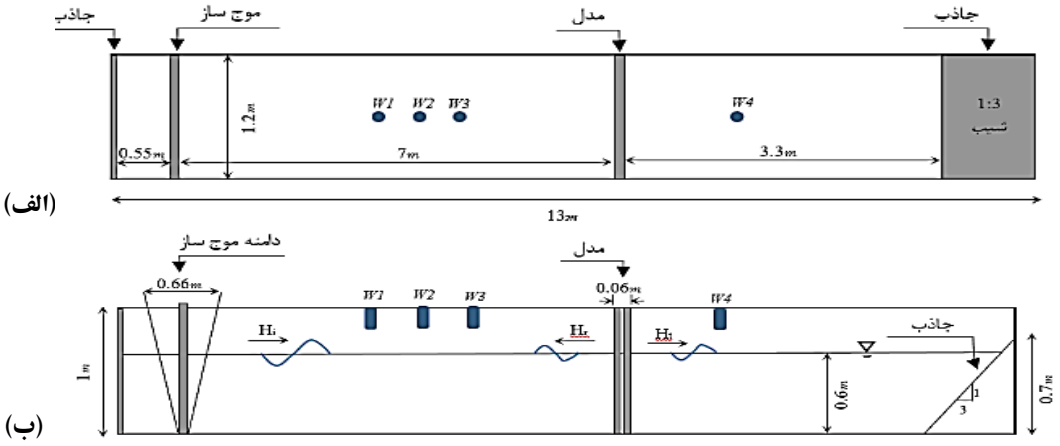
با هدف اندازه‌گیری فشار از چهار مبدل فشار ۶۰–۰ میلی‌بار با فرکانس داده‌برداری ۲۰ داده در ثانیه که در چهار نقطه ارتفاعی از سطح آب ($z$) نصب شده بودند، استفاده گردید. با اتصال این مبدل‌ها به داده نگار، داده‌ها از حالت آنالوگ به دیجیتال تبدیل شده و بر روی سیستم کامپیوتری ذخیره می‌گردند. برای اطمینان از دقت اندازه‌گیری، مبدل‌های فشار مرتباً کالیبره می‌شدند. شیلنگ‌های پیزومتری ۶ میلی‌متری در وسط بخش‌های استوانه‌ای سازه کار گذاشته شدند، این پیزومترها بعد از خروج از انتهای لوله به مبدل‌های فشار در خارج از فلوم متصل شده و فشار دینامیکی ناشی از برخورد موج به سازه را ثبت می‌کردند. تصویر مدل موج‌شکن و آرایش مبدل‌های فشار در شکل (۴) نمایش داده شده است.



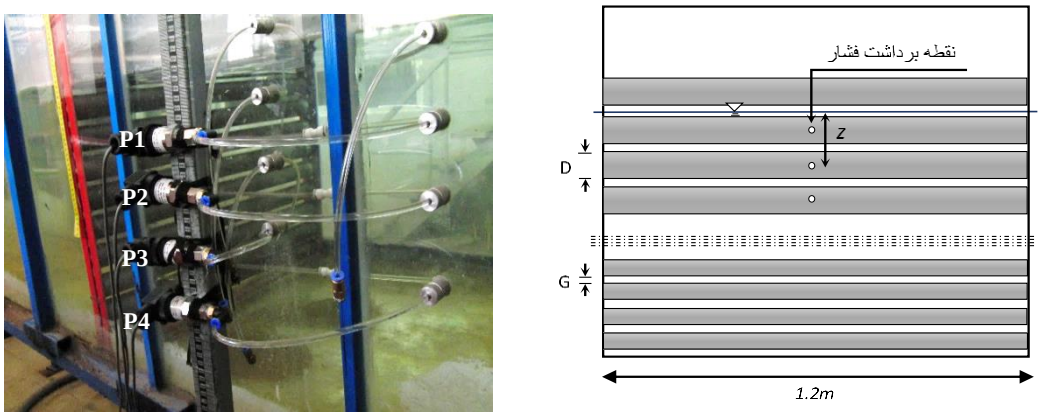

**شکل ۲- سری زمانی نوسانات سطح آب برای موج منظم ٦ سانتی‌متری**

**جدول۱- مشخصات موج‌های تابیده شده در آزمایش‌ها**

| عمق آب نسبی $d/gT^2$ | تیزی موج $H_i/L$ | سرعت موج $c=L/T$ (m/s) | عدد موج $k=2\pi/L$ (1/m) | طول موج $L(m)$ | دوره موج $T(s)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۰/۰۹۶ | ۰/۰۶–۰/۰۸ | ۱/۲۵ | ۶/۲۸ | ۱ | ۰/۸ |
| ۰/۰۷۶ | ۰/۰۴۸–۰/۰۶۳ | ۱/۴۰ | ۴/۹۸ | ۱/۲۶ | ۰/۹ |
| ۰/۰۶۱ | ۰/۰۳۹–۰/۰۵۲ | ۱/۵۴ | ۴/۰۸ | ۱/۵۴ | ۱ |
| ۰/۰۵۱ | ۰/۰۳۳–۰/۰۴۴ | ۱/۶۶ | ۳/۴۳ | ۱/۸۳ | ۱/۱ |
| ۰/۰۴۲ | ۰/۰۲۸–۰/۰۳۴ | ۱/۷۷ | ۲/۹۶ | ۱/۱۲ | ۱/۲ |
| ۰/۰۳۶ | ۰/۰۲۵–۰/۰۳۳ | ۱/۸۶ | ۲/۶۰ | ۱/۴۲ | ۱/۳ |




**شکل۳- الف: دید از بالا – ب: دید از مقابل کانال آزمایشگاهی**




**شکل ٤- (الف): مدل موج شکن نفوذپذیر. (ب): نحوه اتصال شیلنگ‌های پیزومتری و موقعیت قرارگیری مبدل‌های فشار**

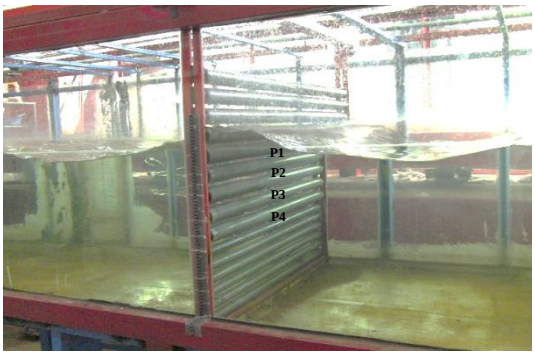
## نتایج و بحث

هدف از این آزمایش‌ها مطالعه نوسانات فشار دینامیکی و نحوه رفتار لحظه‌ای موج تابشی بر روی سازه صفحه موج می‌باشد. در مورد فشار ثابت، مشکل خاصی برای طراحی وجود ندارد، زیرا سازه به‌نحوی طراحی می‌گردد که توانایی مقاومت در برابر یک تنش ثابت را داشته باشد. اما در مورد فشارهای دینامیکی وارد بر قسمت‌های مختلف سازه، وضع بگونه‌ای دیگر است، زیرا در این‌جا، نیرویی که بر سازه وارد می‌شود، یک نیروی ثابت نیست و در هر لحظه عمل‌کرد متغیر دارد. از این‌رو نیاز است در نقاطی از سازه که جریان با تلاطم و آشفتگی شدید همراه بوده و نوسانات فشار زیاد می‌باشد، فشار به‌صورت لحظه‌ای ثبت گردد. به این منظور در ابتدای هر آزمایش سری زمانی موج هدف به موج‌ساز داده شده و بعد از خوانده شدن سری زمانی، پدال شروع به حرکت می‌کند و امواج با دامنه و دوره تعیین شده تولید می‌شوند. امواج به سمت مدل موج‌شکن حرکت می‌کنند، به موج‌شکن برخورد کرده و مقداری از انرژی آن‌ها منعکس می‌شود. امواج منعکس شده در برای عکس منتشر می‌شوند، در حالی‌که امواج منتقل شده، حرکت کرده و انرژی آن‌ها توسط جاذب موج انتهای فلوم از بین می‌رود. در کل، هنگامی‌که سازه در یک محیط دریایی نصب می‌شود، الگوی جریان در مجاورت سازه در نتیجه انقباض جریان، شکل‌گیری گرداب نعل اسبی در مقابل سازه، شکل‌گیری گردابه‌های برگشتی در پشت سازه (با و بدون انتشار گردابه)، تولید و توسعه تلاطم در طول فرآیند انعکاس در نزدیکی سطح آزاد آب، وقوع امواج تفرق یافته و منعکس شده و وقوع شکست موج، تغییر می‌کند. این پدیده‌ها اتلاف انرژی موج را علاوه بر اتلاف ایجاد شده توسط خود سازه، تحت تأثیر قرار می‌دهند (Reddy and Neelamanit, 1992). شکل (۵) نحوه برخورد

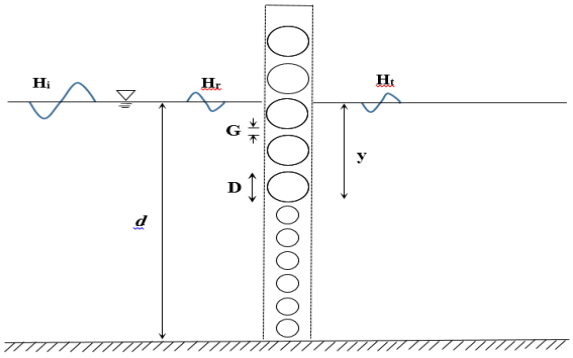
موج با سازه صفحه موج و شیوه جانمایی استوانه‌ها در صفحه موج را نشان می‌دهد.

مطابق با شکل (۴) از چهار مبدل فشار برای اندازه‌گیری فشار وارد بر سازه موج‌شکن ناشی از برخورد موج استفاده گردید. سری زمانی تغییرات فشار دینامیک وارد بر سازه توسط مبدل فشار در تمامی آزمایش‌ها ثبت گردید. تحلیل‌های فشار دینامیکی بر مبنای فشار بی‌بعد $P/H_i$ انجام گرفت. که $P$ دامنه تغییرات فشار دینامیک در هر سری زمانی موج و $H_i$ ارتفاع موج تابشی را بیان می‌کند.

سری زمانی فشار دینامیکی وارد بر صفحه موج مربوط به یکی از آرایش‌های سازه در شکل (۶) آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دید بعد از تشکیل موج و رسیدن موج به صفحه موج، موج منعکس شده و تشکیل امواج نیمه ایستا آغاز می‌گردد. در آغاز شکل‌گیری امواج نیمه ایستا مقداری آشفتگی در سری زمانی فشار اتفاق می‌افتد (۱۰S-۰). پس از آن امواج پایدار شده و بازه زمانی مناسب برای تحلیل داده‌های فشار می‌باشد (۲۰S-۱۰). بعد از این زمان شکل امواج نیمه ایستا به‌علت انعکاس‌های جدید موج از موج‌ساز دچار تغییر می‌گردد. هم‌چنین در این شکل دیده می‌شود دامنه تغییرات فشار دینامیک موج با افزایش فاصله نسبت به میانگین سطح آب کاهش می‌یابد. تغییرات فشار بی‌بعد ($P/H_i$) در برابر عمق آب نسبی ($d/gT^2$) برای مدل‌های مختلف در ارتفاع بی‌بعد $H_i/d=0.1$ برای چهار نقطه ارتفاعی نسبت به میانگین سطح آب ($z/d$) در شکل (۷) و (۸) آورده شده است. این اشکال نشان می‌دهند که فشار بی‌بعد ناشی از برخورد موج با صفحه موج با کاهش عمق آب نسبی افزایش می‌یابد. بیشینه میزان این افزایش برای صفحه موج ترکیبی با قطر ۳/۲-۵، حدود ۶۶ درصد (شکل ۷) و برای صفحه موج ترکیبی با قطر ۳/۲-۴، حدود ۷۴ درصد (شکل ۸) می‌باشد. بیشینه میزان تغییرات فشار که در مبدل فشار اول ثبت شده است، برای دو صفحه موج ترکیبی ۳/۲-۵ و ۳/۲-۴ در دو عمق جانمایی بی‌بعد ($y/d$) معادل ۰/۱۷ و ۰/۳۳، در عمق آب نسبی ۰/۰۴۲ و در عمق جانمایی بی‌بعد ($y/d$) معادل ۰/۵ در بیشتر مواقع در عمق آب نسبی ۰/۰۳۶ ایجاد گردید. یعنی با افزایش عمق جانمایی بیشینه تغییرات فشار دینامیکی در موج‌هایی با دوره بزرگ‌تر ایجاد گردید. هم‌چنین دیده شد با افزایش عمق آب نسبی، تأثیر افزایش عمق جانمایی در بخش‌های پایینی صفحه موج ترکیبی کاهش می‌یابد.

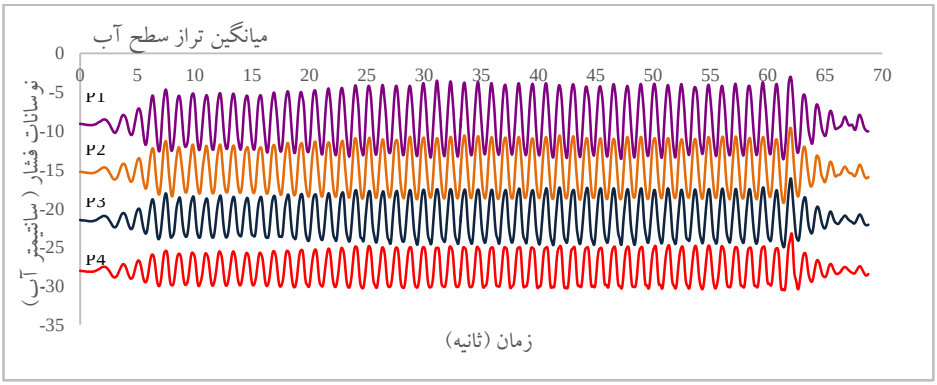



(الف)

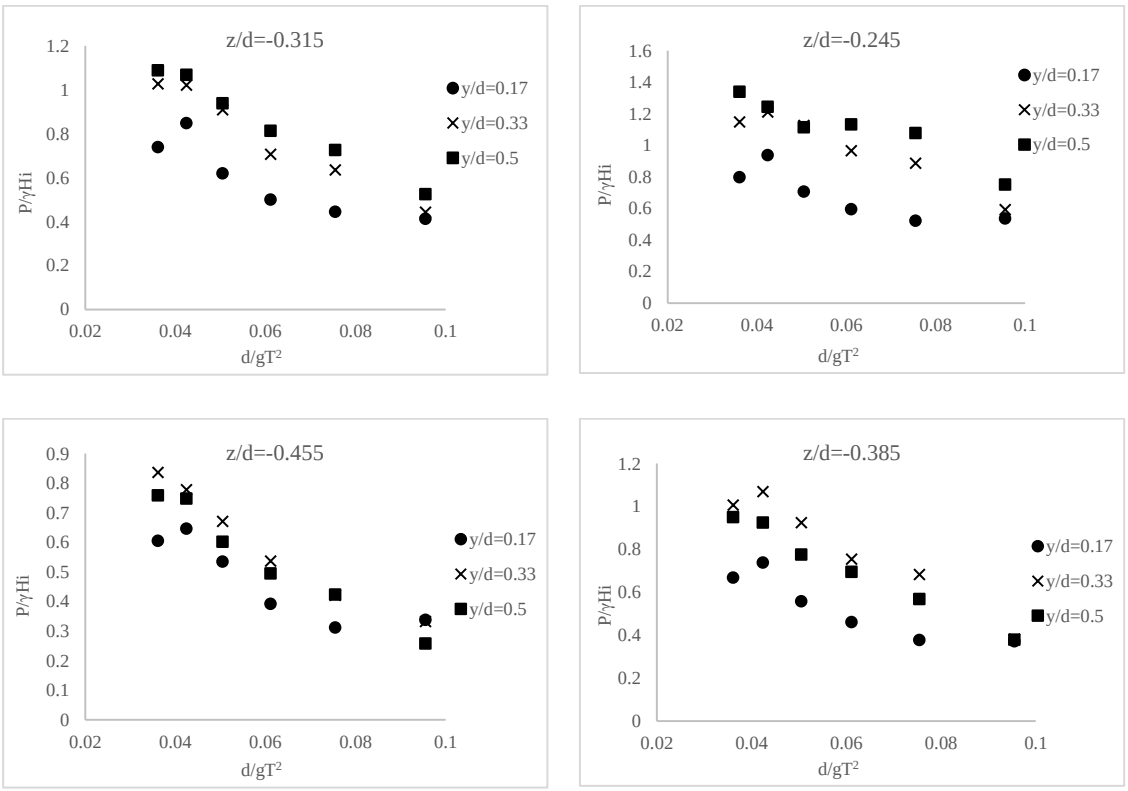



(ب)

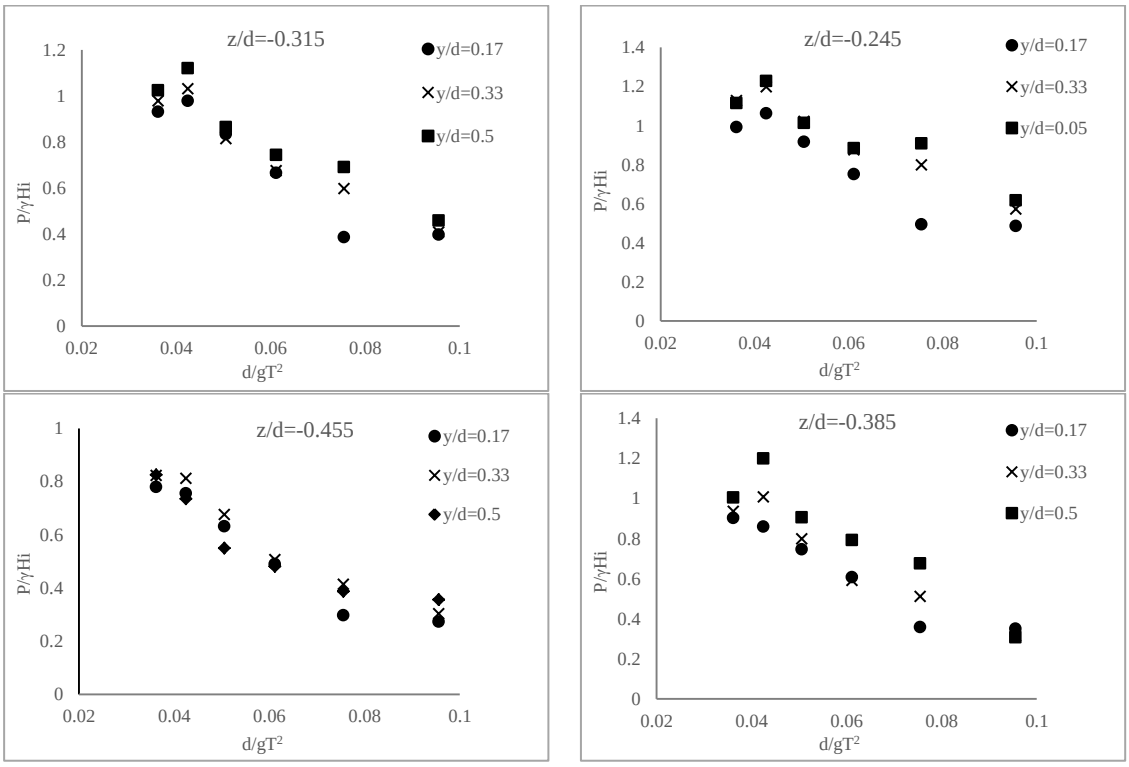
**شکل ۵- (الف): نحوه برخورد موج با سازه صفحه موج. (ب): نمایش شیوه جانمایی استوانه‌ها در صفحه موج ترکیبی.**




**شکل ٦- سری زمانی نوسانات فشار دینامیکی موج ثبت شده توسط مبدل‌های فشار در $d/gT^2=0.88$**




**شکل ۷- تغییرات فشار بی‌بعد نسبت به عمق آب نسبی برای جانمایی‌های متفاوت سازه ۳/۲-۵ در $H_i/d=0.1$**

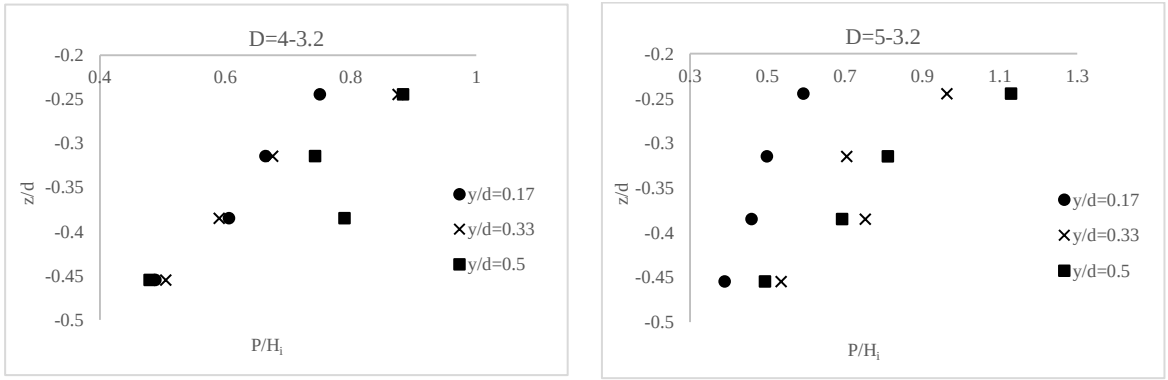



**شکل ۸- تغییرات فشار بی‌بعد نسبت به عمق آب نسبی برای جانمایی‌های متفاوت سازه ۳/۲-٤ در $H_i/d=0.1$**

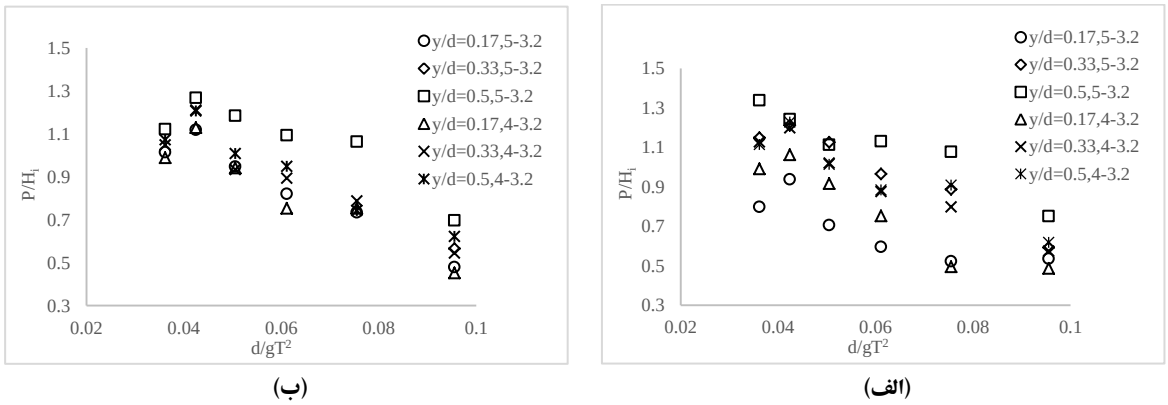
شکل (۹) تغییرات فشار بی‌بعد نسبت به عمق قرارگیری پیزومترها برای جانمایی‌های متفاوت سازه را نشان می‌دهد. با افزایش عمق جانمایی ($y/d$) میزان دامنه تغییرات فشار دینامیکی افزایش می‌یابد. این افزایش در عمق آب نسبی ۰/۰۶۱ برای سازه ترکیبی ۳/۲–۵ حدود ۴۷ درصد و برای سازه ترکیبی ۳/۲–۴ حدود ۱۵ درصد می‌باشد. دلیل این کاهش را می‌توان در کم شدن تفاوت بین قطر استوانه‌های صفحه موج ۳/۲–۴ نسبت به ۳/۲–۵ دانست. هم‌چنین تأثیر افزایش عمق جانمایی بی‌بعد بر روی دامنه تغییرات فشار دینامیکی با افزایش عمق بی‌بعد ($y/d$) کاهش می‌یابد و در نزدیکی بستر تفاوت چندانی بین نتایج دیده نمی‌شود.

شکل (۱۰) تغییرات فشار بی‌بعد به عمق آب نسبی در جانمایی‌های مختلف سازه که توسط اولین مبدل فشار ($z/d$=۰/۲۴۵) ثبت شده است را نشان می‌دهد. بیش‌ترین فشار بی‌بعد در صفحه موج ۳/۲–۵ دیده شد و با کاهش عمق جانمایی میزان فشار بی‌بعد کاهش یافت. تأثیر تغییر عمق جانمایی بر دامنه فشار بیش‌تر از تغییر قطر استوانه های سازه بود. با افزایش عمق جانمایی سازه ارتفاع بیش‌تری از موج تحت تأثیر صفحه موج قرار گرفته و تغییر شکل بیش‌تری به موج تحمیل می‌گردد که منجر به وارد آمدن فشار بیش‌تر به سازه می‌گردد. بیش‌ترین میزان تغییر در دامنه فشار با تغییر عمق جانمایی برای $H_i/d$=۰/۱ در سازه ترکیبی ۳/۲–۵ برابر با ۵۲ درصد و برای سازه ترکیبی ۳/۲–۴ برابر با ۴۷ درصد به‌دست آمد. بیش‌ترین میزان افزایش دامنه فشار با تغییر قطر استوانه‌های سازه از ۳/۲–۴ به ۳/۲–۵ برای عمق‌های جانمایی بی‌بعد ۰/۱۷، ۰/۳۳ و ۰/۵ بترتیب برابر با ۱۹، ۲۵ و ۲۲ درصد به‌دست آمد.

در شکل (۱۱) تغییرات فشار بی‌بعد در عمق آب برای جانمایی‌های متفاوت سازه در $d/gT^2$=۰/۰۹۵ برای دو ارتفاع موج تابشی نشان داده شده است. نتایج نشان داد با افزایش فاصله از میانگین سطح آب دامنه تغییرات فشار کاهش یافت. بیش‌ترین میزان کاهش دامنه فشار در عمق جانمایی ۰/۵ برای $H_i/d$=۰/۱ برابر با ۵۲ درصد و برای $H_i/d$=۰/۱۳ برابر با ۳۸ درصد بود که در سازه ترکیبی ۳/۲–۵ مشاهده شد. در این صفحه موج چون انرژی موج از طریق تخریب خط سیر متداول ذرات مستهلک می‌شود، با افزایش بکارگیری استوانه‌هایی با قطر بزرگ‌تر، حرکت موج سخت‌تر شده و فشار بیش‌تری به سازه تحمیل می‌گردد.

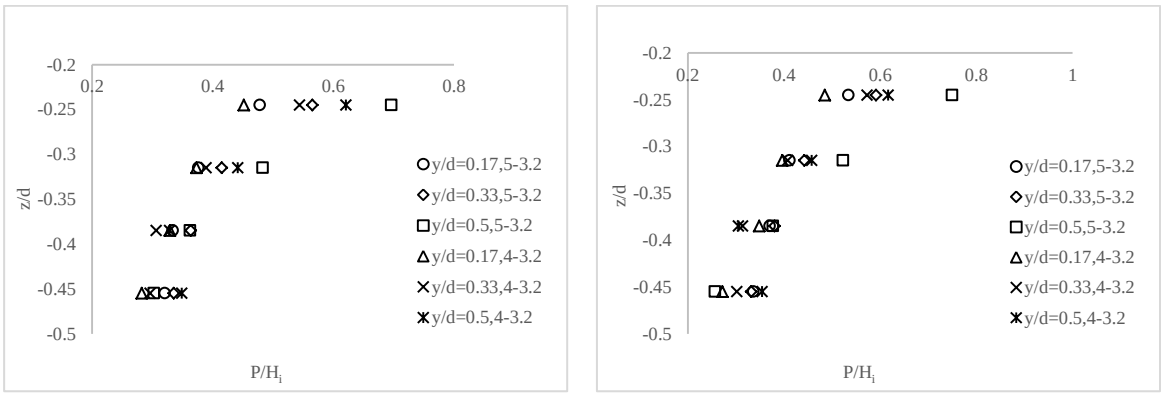



**شکل ۹- تغییرات فشار بی‌بعد در عمق آب برای جانمایی‌های متفاوت سازه در $d/gT^2$=0.061**




**(ب)** **(الف)**

**شکل ۱۰- تغییرات فشار بی‌بعد نسبت به عمق آب نسبی برای جانمایی‌های متفاوت سازه در $z/d$=0.245 (الف) $H_i/d$=0.1 (ب) $H_i/d$=0.13**




**(ب)** **(الف)**

**شکل ۱۱- تغییرات فشار بی‌بعد در عمق آب برای جانمایی‌های متفاوت سازه در $d/gT^2=0.095$. (الف) $H_i/d=0.1$ (ب) $H_i/d=0.13$**

## نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی فشارهای دینامیکی وارد بر مدل صفحه موج، نتایج جانمایی‌های مختلف سازه برای ۶ دوره و ۳ ارتفاع موج ارزیابی و تحلیل گردید. با بررسی نتایج آزمایش‌ها تحقیق حاضر دیده شد:

فشار بی‌بعد ناشی از برخورد موج با صفحه موج با افزایش عمق آب نسبی کاهش می‌یابد. بیشینه میزان این افزایش برای صفحه موج ترکیبی با قطر ۳/۲-۵، حدود ۶۶ درصد و برای صفحه موج ترکیبی با قطر ۳/۲-۴، حدود ۷۴ درصد بود.

با افزایش عمق جانمایی میزان دامنه تغییرات فشار دینامیکی افزایش می‌یابد. این افزایش در عمق آب نسبی ۰/۰۶۱ برای سازه ترکیبی ۳/۲-۵ حدود ۴۷ درصد و برای سازه ترکیبی ۳/۲-۴ حدود ۱۵ درصد می‌باشد. هم‌چنین افزایش عمق آب نسبی، تأثیر افزایش عمق جانمایی در صفحه موج ترکیبی را کاهش می‌دهد.

تأثیر افزایش عمق جانمایی بی‌بعد بر روی دامنه تغییرات فشار دینامیکی با افزایش عمق بی‌بعد کاهش می‌یابد و در نزدیکی بستر تفاوت چندانی بین نتایج دیده نمی‌شود.

تأثیر تغییر عمق جانمایی بر دامنه فشار بیش‌تر از تغییر قطر استوانه‌های سازه بود. بیش‌ترین میزان تغییر در دامنه فشار با تغییر عمق جانمایی برای $H_i/d$=۰/۱ در سازه ترکیبی ۳/۲-۵ برابر با ۵۲ درصد و برای سازه ترکیبی ۳/۲-۴ برابر با ۴۷ درصد به‌دست آمد. بیش‌ترین میزان افزایش دامنه فشار با تغییر قطر استوانه‌های سازه از ۳/۲-۴ به ۳/۲-۵ برای عمق‌های جانمایی بی‌بعد ۰/۱۷، ۰/۳۳ و ۰/۵ به‌ترتیب برابر با ۱۹، ۲۵ و ۲۲ درصد به‌دست آمد.

با افزایش فاصله از میانگین سطح آب دامنه تغییرات فشار کاهش یافت. بیش‌ترین میزان کاهش دامنه فشار در عمق جانمایی ۰/۵ برای $H_i/d$=۰/۱ برابر با ۵۲ درصد و برای $H_i/d$=۰/۱۳ برابر با ۳۸ درصد بود که در سازه ترکیبی ۳/۲-۵ مشاهده شد.

## سپاسگزاری

بدینوسیله، از دانشگاه تبریز، به پاس تهیه امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی این مطالعه و از آقایان روزبه افشاری و حسین عیوض اوغلی برای همکاری ایشان در تجهیز آزمایشگاه و روند انجام آزمایش‌ها تشکر و قدردانی می‌گردد.

## منابع

1- Ahmed, H. 2011. Wave Interaction with Vertical Slotted Walls as a Permeable Breakwater. Ph.D. thesis in Institute for Geo-technic, Waste Management and Hydro Sciences (IGAW), University of Wuppertal, Germany.

2- Alkhalidi, M., Neelamani, S. and Assad, A.I.A.H., 2015. Wave forces and dynamic pressures on slotted vertical wave barriers with an impermeable wall in random wave fields. *Ocean Engineering*, *109*, pp.1-6.

3- Anandkumar, G., Sundar, V., Graw, K.U. and Kaldenhoff, H., 1995. Pressures and forces on inclined cylinders due to regular waves. *Ocean Engineering*, *22*(7), pp.747-759.

4- Dean, R .G. Dalrymple, R. A. 1991. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World scientific. Delaware University, USA. 371p.

5- Hall, K. 2000. Wave transmission through multi-layer wave screens. M.Sc. thesis at Queen's university, Kingston, Ontario, Canada.

6- Hughes, S.A., 1993. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering* (Vol. 7). World Scientific.

7- Kisacik, D. Troch, P. Van Bogaert, P. 2012. Description of loading conditions due to violent wave impacts on a vertical structure with an overhanging horizontal cantilever slab. Coastal Engineering. 60(1): 201–226.

8- Krishnakumar, C. Sunder, V. and Sannasiraj, S. A. 2010. Pressures and forces due to directional waves on a vertical wall fronted by wave screens. Applied Ocean Research. 32 (1): 1-10.

9- Neelamani, S. and Sandhya, N., 2005. Surface roughness effect of vertical and sloped seawalls in incident random wave fields. *Ocean engineering*, *32*(3-4), pp.395-416.

10- Rageh, O.S. and Koraim, A.S., 2010. Hydraulic performance of vertical walls with horizontal slots used as breakwater. *Coastal Engineering*, *57*(8), pp.745-756.

11- Reddy, M.S. and Neelamani, S., 1992. Wave transmission and reflection characteristics of a partially immersed rigid vertical barrier. *Ocean Engineering*, *19*(3), pp.313-325.

12- Shih, R.S., 2016. Investigation of random wave impact on highly pervious pipe breakwaters. *Applied Ocean Research*, *58*, pp.146-163.

13- Sahoo, T., Lee, M.M. and Chwang, A.T., 2000. Trapping and generation of waves by vertical porous structures. *Journal of engineering mechanics*, *126*(10), pp.1074-1082.

14- Sundar, V., Koola, P.M. and Schlenkhoff, A.U., 1999. Dynamic pressures on inclined cylinders due to freak waves. *Ocean engineering*, *26*(9), pp.841-863.

15- Yagci, O., Kirca, V.S.O., Kabdasli, M.S., Celik, A.O., Unal, N.E. and Aydingakko, A., 2006. An experimental model application of wavescreen: Dynamic pressure, water particle velocity, and wave measurements. *Ocean Engineering*, *33*(10), pp.1299-1321.

16- Zhu, D., 2011. Hydrodynamic characteristics of a single-row pile breakwater. *Coastal Engineering*, *58*(5), pp.446-451.

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering** **Vol. 41, No. 3, Fall 2018, p. 89-102**

**EXTENDED ABSTRACT**

# Evaluation of Dynamic Pressure on Compound Perforated Wave Screen under Regular Waves

N. Azam[1*], F. Salmasi[2], M.A. Lotfollahi Yaghin[3], J. Parsa[4] and A. Mojtahedi[5]

1*- Corresponding Author, Ph.D. Student, Department. of Water Eng., University of Tabriz, Iran.*( naval.azam@yahoo.com).*

2- Associate Professor, Department. of Water Engineering, Tabriz University, Iran.

3- Professor, Department. of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran.

4- Assistant Professor, Department. of Water Engineering, Tabriz University, Iran.

5- Associate Professor, Department. of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran.

Received: 30 October 2016 Accepted: 12 February 2017

**Keywords:** Wave Screen, Dynamic Pressure, Regular Wave, Shore Protection.

## Introduction

Coasts play an important role in economy of each country for their strategic location for residential, recreational, and industrial activities. Hence, a need has arisen to protect and maintain these coasts against waves and currents. (Rageh et al., 2009).

The main cause of damage to coastal structures is the wave impact force. Protective structures such as submerged breakwaters, screen breakwaters, and various piles are often designed to provide additional attenuation of the impact force impact. The use of vertical slotted barriers can be a cost effective solution for wave energy dissipation when sloped rubble structures are not desirable. For a cost-effective design of such barriers, an accurate estimation of dynamic pressures characteristics is needed.

Many experimental and theoretical studies were carried out for determining the dynamic pressures acting on different shapes or structures supported on piles. Neelamani & Sandhya (2005) investigated wave reflections, run-up and run-down, and wave pressures on plane, dentate and serrated seawalls. Krishnakumar et al. (2010) studied the effect of wave screens on the reduction of pressures and forces on a vertical wall on its lee side due to directional waves. Shih (2016) investigated the performance of a pervious pipe screen breakwater installed in front of a seawall in terms of reducing the wave impact force and wave pressure. The preceding brief review suggests that there is not much experimental data published on the wave induced dynamic pressures acting on compound wave screen. In this study, experimental investigations on wave pressures on different compound wave screen configurations were carried out in regular wave. The wave screen consists of a perforated wall that extends from above the seawater to above the seabed. The gap between pipes allows the seawater exchange, the sediment transport and the fish passage and the results of this study can be used for a better hydrodynamic design of vertical structures.

## Methodology

Froude scaling technique was adopted for physical modeling, which allows for the correct reproduction of gravitational and fluid inertial forces. A scale of 1:10 was selected for the selection

of model dimensions and wave properties in the present study. The proposed breakwater can be used to model water depths ranging from 5 to 10 m. However, the present study is carried out in the laboratory for a constant water depth of 0.60 m, wave periods ranging from 0.8 to 1.3 s. These ranges correspond to 6.0 m water depth, 2.5-4.1s wave period in the prototype, respectively.

Several experiments were carried out in a wave flume with 13.0 m length, 1 m deep, and 1.2 m wide in the Marine Structures Laboratory of the Faculty of Civil Engineering, Tabriz University. A flap type wave generator was installed at one end of the flume. A wave absorber with slope of 3:1 was installed at the other end of the flume to absorb the transmitted waves. The tested breakwater model was placed at the middle of the wave flume. The wave screen consists of several horizontal pipes with constant distance between them. Details of the incident wave characteristics are shown in Table (1).

**Table 1- Incident Waves Characteristics**

| T(s) | L(m) | k=2π/L (1/m) | c=L/T (m/s) | $H_i/L$ | $d/gT^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.8 | 1 | 6.28 | 1.25 | 0.06-0.08 | 0.096 |
| 0.9 | 1.26 | 4.98 | 1.40 | 0.048-0.063 | 0.076 |
| 1 | 1.54 | 4.08 | 1.54 | 0.039-0.052 | 0.061 |
| 1.1 | 1.83 | 3.43 | 1.66 | 0.033-0.044 | 0.051 |
| 1.2 | 1.12 | 2.96 | 1.77 | 0.028-0.034 | 0.042 |
| 1.3 | 1.42 | 2.60 | 1.86 | 0.025-0.033 | 0.036 |

This study investigated the acting dynamic pressure on elements of wave screen. Four pressure transducers were placed at different positions *(z/d)* where, *z* is the position of pressure transducer from the still water line, *d* is the water depth. Fig. (1) shows the wave screen model and layout of the pressure transducer on wave screen model used for the present study.

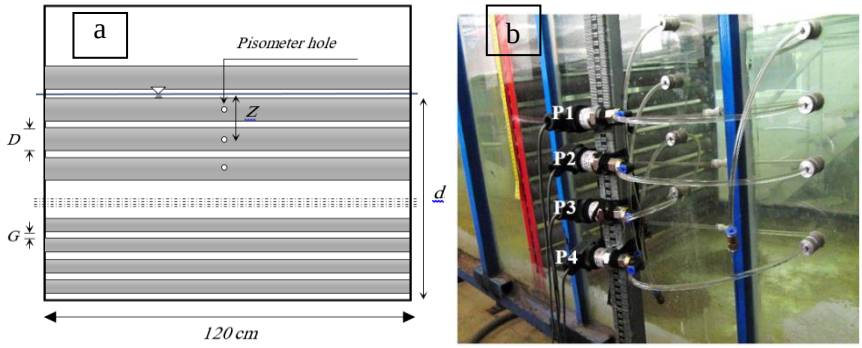



**Fig.1- (a) Wave screen model, (b) Layout of the pressure transducer on wave screen model.**

Waves for each run were generated for a total duration of 60 s. Data for each run was acquired with sampling speed of 20 samples/s. Several runs with regular waves were conducted with different wave heights, wave periods and structural parameters.

**Results and Discussion**

In general, when a structure is installed in a marine environment, the presence of that structure will alter the flow pattern in its immediate neighborhoods, resulting in one or more of the following phenomena; (1) contraction of flow, (2) formation of a horseshoe vortex in front of the structure, (3) formation of lee-wake vortices (with or without vortex shedding) behind the structure, (4) generation of turbulence, (5) occurrence of reflected and diffracted waves, and (6) occurrence of wave breaking. These phenomena affect the dissipation of wave energy in addition to the dissipation caused by the structure itself, (Rageh and Koraim, 2010; Reddy and Neelamanit, 1992).

In this study, time domain analyses were carried out on the pressure time series for obtaining information on the wave pressures. Schematic view of the compound wave screen model with

circular horizontal elements and impact of the waves against the wave screen is also presented in Fig. (2).

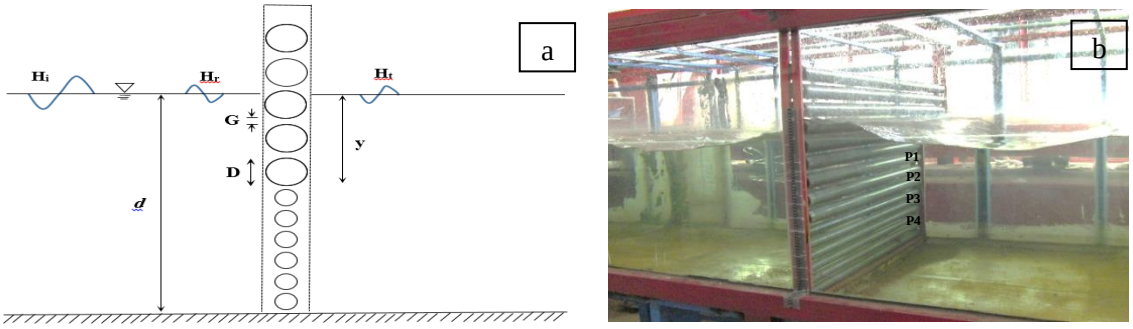



**Fig. 2- (a) Schematic view of the compound wave screen model with circular horizontal elements, (b) Impact of the waves against the wave screen**

In order to understand the dependence of the frequency, the variation of normalized pressure ($p/H_i$) with $d/gT^2$ for different layout of models for a constant $z=0.245$ for $H_i/d= 0.1$ and $H_i/d= 0.13$ is plotted in Fig (3). The plot shows that the dimensionless pressure on the wave screen decreases with an increase in $d/gT^2$. Furthermore, the normalized pressure increases with an increase in relative configuration depth $(y/d)$.

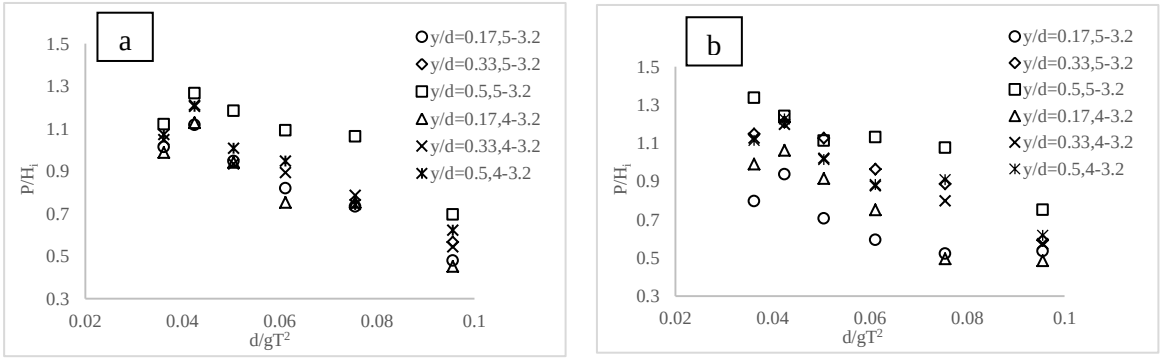



**Fig. 3- Variation of dimensionless pressure with relative water depth on the different layout models for z/d=0.245 (a) for $H_i/d$=0.13, (b) for $H_i/d$=0.1.**

Variation of dimensionless pressure with water depth on the different layout models for $d/gT^2$=0.095 for $H_i/d= 0.1$ and $H_i/d= 0.13$ is plotted in Fig (4). Experimental results indicated that the dimensionless pressure on the wave screen increases with a decrease in relative water depth.

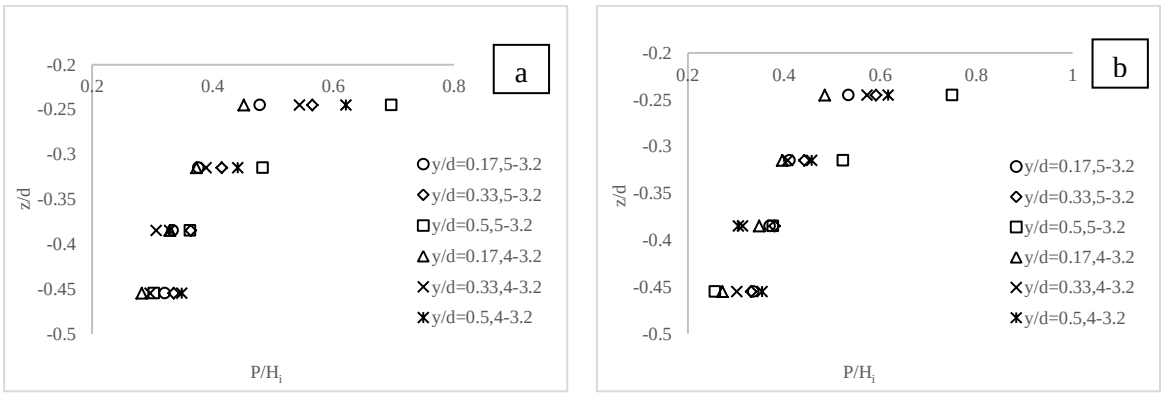



**Fig. 4- Variation of dimensionless pressure with water depth on the different layout models for $d/gT^2=0.095$ (a) for $H_i/d=0.13$, (b) for $H_i/d=0.1$.**

## Conclusions

A wave screen is tested in a small scale test set-up (at scale 1:10) using regular waves for six different values of wave height and wave period. Pressures on the models have been measured by 4 pressure sensors using 20 kHz sampling frequency. A parametric analysis of measured pressures on the scaled model is conducted. Resulting from the experiments, the following conclusions are drawn:

Experimental results revealed that the dimensionless pressure on the wave screen under regular waves increases with a decrease in relative water depth and an increase in relative configuration depth. This increasing due to the increasing in configuration depth for 5-3.2 compound structure is around 52% and for 4-3.2 compound structure is around 47%. Furthermore, the effect of configuration depth change on wave pressure extent is greater than diameter of pipes structure change.

## References

1- Krishnakumar, C. Sunder, V. and Sannasiraj, S. A. 2010. Pressures and forces due to directional waves on a vertical wall fronted by wave screens. Applied Ocean Research. 32 (1): 1-10.

2- Neelamani, S. Sandhya, N. 2005. Surface roughness effect of vertical and sloped seawall in incident random wave fields. Ocean Engineering. 32: 395–416.

3- Rageh, O. S. Koraim, A. S. 2010. Hydraulic performance of vertical walls with horizontal slots used as breakwater. Coastal Engineering. 57: 745–756.

4- Rageh, O. S. Koraim, A. S. Salem, T. N. 2009. Hydrodynamic efficiency of partially immersed caissons supported on piles. Ocean Engineering. 57: 1112–1118.

5- Reddy, M. S. Neelamanit, S. 1992. Wave transmission and reflection characteristics of a partially immersed rigid vertical barrier. Ocean Engineering 19(1): 313–325.

6- Shih, R. S. 2016. Investigation of random wave impact on highly pervious pipe breakwaters. Ocean Research. 58 (1): 146–163.