

## بررسی فشارهای دینامیکی وارد بر صفحه موج نفوذپذیر تحت برخورد امواج منظم

نوال آزم<sup>۱\*</sup>، فرزین سلماسی<sup>۲</sup>، محمدعلی لطف الهی یقین<sup>۳</sup>، جواد پارسا<sup>۴</sup>، علیرضا مجتهدی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۷

تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۱۴

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه تبریز

۲ و ۴- به ترتیب دانشجویان و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۳ و ۵- به ترتیب استادیار و دانشجویان گروه عمران-آب، دانشگاه تبریز

مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [naval.azam@yahoo.com](mailto:naval.azam@yahoo.com)

### چکیده

برای طراحی مؤثر و کارای یک صفحه موج تخمین دقیق فشار دینامیکی و نیروی موج ضروری می‌باشد. این مطالعه به بررسی فشار دینامیکی وارده بر اجزای سازه‌ی یک صفحه موج متشکل از لوله‌های افقی که با فاصله ثابت کنار هم قرار می‌گیرند، می‌پردازد. این صفحه موج می‌تواند برای انتقال و تبادل آب دریا در ناحیه بندری مفید باشد و امکان جذب مؤثر انرژی موج را فراهم نماید. به این منظور آزمایش‌های فیزیکی بر روی صفحه موج تحت برخورد امواج منظم در ۳ ارتفاع و ۶ پریود از موج با عمق آب ثابت ۰/۶ متر انجام گرفت. همچنین ۳ قطر متفاوت برای لوله‌های صفحه موج در نظر گرفته شد. توزیع فشار دینامیکی وارد بر لوله‌های صفحه موج در امتداد عمقی و پیرامون آن توسط مبدل فشار اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد افزایش تخلخل موجب کاهش تغییرات فشار دینامیکی موج می‌گردد و با افزایش ارتفاع موج برخوردی نوسانات فشار برای تخلخل‌های مختلف افزایش می‌یابد. همچنین بیشینه تغییرات فشار دینامیکی موج در زاویه‌های بیش‌تر از ۴۵ درجه ایجاد گردید.

واژه‌های کلیدی: امواج منظم، تخلخل، صفحه موج، فشار دینامیکی، موج‌شکن

## Investigation of Dynamic Pressures on Wave Screen under Regular Waves

N Azam<sup>1\*</sup>, F Salmasi<sup>2</sup>, MA Lotfollahi Yaghin<sup>3</sup>, J Parsa<sup>4</sup>, A Mojtahedi<sup>5</sup>

Received: 28 November 2016 Accepted: 06 June 2016

1-Ph.D. Student, Dept. of Water Eng., University of Tabriz, Iran

2,4-Respectively, Assoc. Prof. and Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Tabriz University, Iran

3,5-Respectively, Prof. and Assoc. Prof, Dept. of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, Email: naval.azam@yahoo.com

### Abstract

For a cost-effective design of wave screen, an accurate estimation of dynamic pressure and wave force is needed. In This study investigates the dynamic pressure action on elements of wave screen. The wave screen consists of several horizontal pipes with constant distance between them. This wave screen provides convection and interchanges of seawater within the harbor district, and makes available wave energy absorption effectively. The experimens were done on a wave screen under collision of regular waves with 3 heights and 6 periods of waves at a constant water depth of 0.6 m. Also 3 different diameters were considered for wave screen pipes. Dynamic pressures distributions along and around the pipes were measured by the pressure transducers. The results indicated that with increasing the porosity, the pressure difference was decreased and with increasing of the incident wave height, pressure fluctuation for different porosity was increased. Furthermore, the maximum dynamic pressure fluctuation was occurred at the angle more than 45°.

**Keywords:** Breakwater, Dynamic Pressure, Porosity, Regular Wave, Wave Screen.

### مقدمه

می‌یابد و به حجم بالای مصالح جهت ساخت و ظرفیت تحمل بالای بستر دریا نیاز دارد. هم‌چنین این مدل از موج شکن‌ها جریان‌های ساحلی را مسدود نموده و فرسایش شدید یا افزایش سواحل مجاور را موجب می‌شوند. علاوه بر این مانع چرخش آب شده و در نتیجه کیفیت آب مناطق ساحلی را از بین می‌برند. در برخی موارد این موج‌شکن‌ها راه عبور ماهی‌ها و سایر موجودات زنده ساکن دریا را نیز مسدود می‌کنند. برای حل مسائل ذکر شده، موج‌شکن‌های نفوذپذیر پیشنهاد می‌گردند. فاصله بین پایه‌ها در این نوع از موج‌شکن‌ها امکان عبور رسوبات از بین سازه را فراهم می‌کند. بنابراین از این سیستم جدید انتظار می‌رود اثر کمی روی انتقال رسوب و ریخت شناسی منطقه‌ی ساحلی داشته باشد. قطعا این

توسعه مناطق ساحلی اغلب به حفاظت از ساحل در برابر امواج آب و جریانات بستگی دارد. موج‌شکن‌ها عمدتاً در امتداد خطوط ساحلی، ورودی کانال‌ها و سواحل، بنادر و یا لنگرگاه‌های کوچک جهت ایجاد آرامش در بندرگاه، تامین ورود مطمئن کشتی‌ها به آبراهه‌ها و بنادر، کاهش انرژی ناشی از امواج و حفاظت از سواحل در مقابل امواج احداث می‌شوند. موج‌شکن‌ها براساس درجه حفاظت به موج‌شکن‌های کاملاً حفاظت‌کننده (توده سنگی، کیسونی، مرکب عمودی و غیره) و موج‌شکن‌های جزئی حفاظت‌کننده<sup>۲</sup> (منفذدار، شکافدار، شمعی و غیره) تقسیم می‌شوند. به طور کلی وزن و عرض موج‌شکن‌های سنتی با افزایش عمق آب، افزایش

<sup>1</sup> Fully protection breakwaters

<sup>2</sup> Partial protection breakwaters

رو به پایین هستند لذا یک تغییر فشار دینامیکی رو به پایین لازم می‌باشد. بیان معکوس این موضوع در بخش حضيض موج مصداق دارد. در نیمه راه بین تاج و حضيض، شتاب افقی است بطوریکه توزیع فشار قائم هیدرواستاتیکی است (سورنسن ۲۰۰۶).

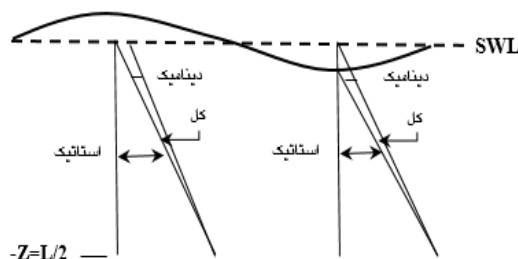
طراحی یک موج‌شکن اصولی با توجه به فشار و نیروی وابسته به آن استوار است. روش متداول پیش-بینی فشار (دینامیکی و هیدرواستاتیکی) روی دیوار عمودی نمی‌تواند برای پیش‌بینی فشار روی صفحه‌ی موج استفاده گردد. از آنجایی‌که آب روی جان‌پناه صفحه موج وجود دارد، فشار هیدرواستاتیک وارد بر صفحه‌ی موج کمتر از دیوار حائل است. بیان فشار هیدرواستاتیک به این دلیل می‌باشد که تفاوت سطح آب روی هر دو سمت صفحه بعلاوه اختلاف در فاز و ارتفاع بین امواج تابشی و منتقل شونده است (رابطه ۱).

$$P_h = \rho g \Delta d \quad [1]$$

که  $P_h$  فشار هیدرواستاتیک،  $\Delta d$  تفاوت لحظه‌ای در عمق بین جلو و پشت صفحه،  $\rho$  چگالی سیال  $g$  شتاب گرانش می‌باشد. صفحات موج در معرض فشار دینامیکی ناشی از سرعت ذرات امواج قرار می‌گیرند (هال ۲۰۰۰).

سیستم، چرخش مناسب آب درون منطقه محافظت شده بدون ایجاد هرگونه انسداد برای هر جسم متحرک را به-دنبال خواهد داشت (کورایم و همکاران ۲۰۱۴). در مقایسه با سازه‌های توده سنگی، دیوارهای شکاف‌دار به افزایش مؤثر منطقه داخلی بندر و لنگرگیری کشتی‌ها کمک می‌کنند. بنابراین مهم‌ترین مزیت دیوارهای شکاف-دار این است که از فضا استفاده بهینه شده و هزینه‌های ساخت را بخصوص برای عمق آب زیاد، کاهش می‌دهند. همچنین این سازه‌ها اختلال در محیط سواحل را به کمینه می‌رسانند (هانگ و لی ۲۰۱۱).

امواج آب از آشکارترین پدیده‌های تقریباً همیشگی بر روی سطح هر حوضچه آبی هستند. هنگامی‌که تغییر شکلی در سطح آب و در جهت قائم ایجاد می‌شود، نیروی گرانشی برای بازگرداندن سطح آن به حالت تعادل عمل می‌کند. سطح آب در حال بازگشت دارای اینرسی بوده که باعث گذشتن آن از نقطه تعادل شده و نوسان سطح را موجب می‌شود. این نوسان به سطح آب مجاور منتقل شده و باعث انتشار رو به جلوی موج می‌شود (سورنسن ۲۰۰۶). توزیع عمودی فشار ناشی از تابش امواج در شکل ۱ نشان داده شده است. این شکل نمایانگر تغییرات دینامیکی فشار ناشی از شتاب ذرات موج می‌باشد. این مولفه‌های فشار در یک مقطع قائم از تاج و حضيض موج ترسیم شده‌اند. چون ذرات آب در تاج موج دارای شتاب



شکل ۱- توزیع عمودی فشار موج در آب عمیق (دین و دالریمپر ۱۹۹۱).

ضروری برای طراحی اقتصادی این سازه‌ها می‌باشد (تقی و همکاران ۲۰۱۳).

از مطالعات انجام شده با موضوع بررسی فشار دینامیکی وارد بر موج‌شکن‌های نفوذپذیر می‌توان به

در حالی‌که درک روشنی از اتلاف انرژی موج از صفحات موج یکی از جنبه‌های مورد توجه در طراحی هیدرو دینامیکی آن‌ها است، اطلاع از فشار دینامیکی و نیروهای ناشی از امواج تابشی مختلف یکی از موارد

تحقیقات آناندکومار و همکاران (۱۹۹۵) که به بررسی فشار حول یک پایه استوانه‌ای مایل به صورت آزمایشگاهی تحت تابش امواج منظم پرداختند، اشاره نمود. برگمن و اومراسی (۱۹۹۸) توزیع فشار در دیوارهای عمودی نفوذپذیر را با تغییر پارامترهای موج و محل قرارگیری سازه در مقیاس بزرگ ارزیابی نمود. با استفاده از این پارامترها رابطه‌ای جدید برای پیش‌بینی توزیع فشار بر دیوار را ارائه نمود. ساندار و همکاران (۱۹۹۹) توزیع فشار دینامیکی پیرامون یک استوانه بصورت عمودی و مایل را تحت شرایط امواج غول پیکر<sup>۱</sup>  $(H_{\max}/H_{1/3}) > 2$  مطالعه نمودند. بررسی فشار روی محیط پیرامون استوانه نشان داد گشتاور طیفی صفرم فشار با افزایش گشتاور صفرم طیف انرژی موج پیرامون استوانه برای همه‌ی زاویه‌های آزمایش شده افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقادیر شاخص و متوسط چهار فاکتور عدم تقارن فشار دینامیکی برای همه زاویه‌های انحراف استوانه در نتیجه تابش امواج نامنظم و بلند تقریباً یکسان بود. ساهو و همکاران (۲۰۰۰) به دام انداختن امواج با چهار جانمایی مختلف از مانع عمودی نفوذپذیر و تولید موج توسط سه جانمایی مختلف موج‌شکن متخلخل عمودی در جلوی دیوار انتهایی یک کانال بلند نیمه محدود را آنالیز نمودند. در این مجموعه از آزمایش‌ها توزیع فشار دینامیکی برای پارامترهای مختلف اثر تخلخل در سه نوع موج‌ساز (حرکت پدال) تحلیل شد. توزیع میانگین فشار روی موج‌شکن متخلخل و دیوار انتهایی کانال با افزایش پارامتر اثر تخلخل افزایش یافت. دیناکاران و همکاران (۲۰۰۲) فشار دینامیکی ناشی از اعمال امواج منظم روی سمت دریای موج‌شکن نیم‌دایره‌ای منفذدار با سطح تماس در معرض منافذ ۷ و ۱۱ درصد را اندازه‌گیری نمودند. فشار اندازه‌گیری شده با فشار وارد شده

بر موج‌شکن نیم‌دایره‌ای بدون منفذ مقایسه گردید. نتایج نشان داد فشار بی‌بعد با افزایش عمق آب نسبی کاهش می‌یابد. هم‌چنین بیشینه فشار دینامیکی وارد شده بر موج‌شکن دایره‌ای منفذدار ۰/۶ هد فشار استاتیک ناشی از ارتفاع موج می‌باشد، در حالی‌که این مقدار برای موج‌شکن بدون منفذ ۰/۷۵ می‌باشد. چن و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از روش حجم سیال<sup>۲</sup> و تئوری موج لزج غیرخطی برای توسعه یک مدل عددی برای تخمین نیروها و فشار موج وارد بر موج‌شکن کیسونی منفذدار و ضرایب انعکاس استفاده نمودند. آن‌ها گزارش دادند که کاهش فشار در بخش نفوذناپذیر پایینی کیسون منفذدار از شکاف‌های بخش بالایی بیش‌تر بود. نیلامانی و سندھیا (۲۰۰۵) فشار موج، بالاروی و انعکاس از دیوارهای ساحلی مسطح، دنداندار و مشبک را در شیب‌های مختلف، تحت تابش امواج نامنظم بررسی نمودند. نتایج نشان داد که بر دیوار مسطح در حالت عمودی فشار بیش‌تری نسبت به دو نوع دیگر سازه وارد می‌شود. در دو شیب دیگر آزمایش شده کاهش در فشار موج ناشی از مشبک و دنداندار بودن سازه قابل توجه نبود. یاخجه و همکاران (۲۰۰۶) توزیع دینامیکی فشار 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 موج در زاویه صفر برخورد موج با پایه ایجاد نمی‌گردد؛ کیساسیک و همکاران (۲۰۱۲) به صورت 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

<sup>1</sup> Freak waves

<sup>2</sup> Volume of fluid

میان آن‌ها عبور می‌کند روی فشار دینامیکی تأثیر چندانی ندارد.

با مطالعه و بررسی کارهای انجام شده توسط محققین پیشین، مجموعه‌ای از آزمایش‌های فیزیکی جهت مطالعه صفحه موج استوانه‌ای طراحی گردید. هدف اساسی از این مطالعه، اندازه‌گیری فشار دینامیک وارد بر سازه موج‌شکن در اعماق مختلف و در زاویه‌های مختلف قرارگیری استوانه‌های در معرض امواج می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

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 حالی که جابجایی عمودی سطح آب در یک پریود و فاصله مشخص یکسان می‌باشد. سرعت انتشار موج به پریود موج بستگی دارد و امواجی با پریود بلندتر سریع‌تر منتشر می‌شوند. نمونه‌ی کلاسیک موج منظم در عمق ثابت موج سینوسی می‌باشد (رابطه ۲).

$$\eta(t) = A \cos(kx - \sigma t + \varepsilon) \quad [2]$$

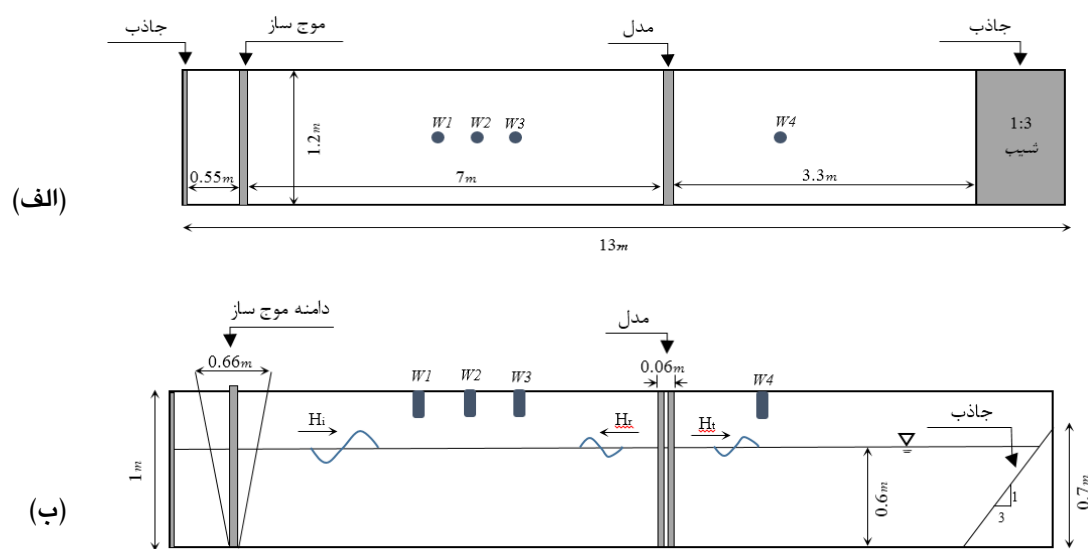
در رابطه‌ی ۲،  $\eta$  پروفیل سطح آب از سطح ساکن آب،  $A$  دامنه موج،  $k$  عدد موج  $(2\pi/L)$ ،  $L$  طول موج،  $\sigma$  فرکانس زاویه‌ای  $(2\pi/T)$ ،  $T$  پریود،  $\varepsilon$  فاز فرکانس  $(x, t)$  مکان و زمان را نشان می‌دهد.

در آزمایش‌های هیدرولیکی امواج دریا، لزوجت و کشش سطحی آب معمولاً نقش معنی‌داری را ایفا نمی‌کنند و نیروهای گرانش و اینرسی نیروهای غالب می‌باشند. امواج با پریود کوتاه که در آزمایشگاه می‌توان تشکیل داد، تنش‌های برشی قابل ملاحظه‌ای را تولید نمی‌کنند، لذا امواج دارای لزوجت بسیار پایین و عدد رینولدز بالا هستند (هیوز ۱۹۹۳). با توجه به دلایل ذکر شده می‌توان از معیار رینولدز در مدل‌سازی صرف‌نظر نمود. در این مطالعه مقیاس فرودی جهت انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد، که امکان تولید صحیح نیروی اینرسی سیال و گرانش را فراهم می‌کند. با توجه به

بخش افقی مدل مقیاس شده نسبت به بخش عمودی بیش‌تر در معرض ضربه موج قرار گرفت. همچنین به این نتیجه رسیدند که تغییرات پریود موج تأثیر نسبتاً محدودی روی نتایج دارد. کریشناکومار و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر صفحه محافظ متخلخل را روی کاهش فشار و نیرو بر یک دیوار عمودی در جان‌پناه آن ناشی از حضور امواج جهت‌دار از طریق آزمایش‌های فیزیکی مطالعه نمودند. نیروی اعمال شده روی دیوار ناشی از امواج تصادفی نرمال و امواج جهت‌دار 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. ال خلیدی و همکاران (۲۰۱۵) 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 نمودند. نتایج نشان داد که تخلخل تأثیر قابل توجهی بر فشار، بخصوص 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. شی (۲۰۱۶) 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

شد. امواج منظم با ارتفاع و پریود مختلف از طریق ایجاد سری زمانی، توسط یک موج‌ساز لولایی که در ابتدای فلوم قرار داشت، تولید گردید. جاذب موج به منظور استهلاک انرژی موج تابشی در انتهای دیگر فلوم موج نصب شد. طبق آزمایش‌های انجام گرفته برای جاذب موج، میزان انعکاس از این جاذب ۲-۵ درصد می‌باشد که با معیارهای مطرح شده کاملاً مطابقت دارد. برای کالیبره امواج تولیدی و اندازه‌گیری ضریب انعکاس جاذب موج از چهار ارتفاع سنج آلتراسونیک شرکت پیل آلمان (W1-W4) مدل P47-F4V-2D-1DO-180E، با فرکانس داده برداری ۲۰ داده در ثانیه استفاده گردید. تصویر کانال آزمایشگاهی در شکل ۲ و فهرست آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

ارتفاع آب ثابت قابل پذیرش در فلوم آزمایشگاهی و محدوده پریود و ارتفاع امواج تولیدی توسط دستگاه موج‌ساز و با توجه به محدوده مناسب برای صفحات موج مقیاس ۱:۱۰ برای ساخت مدل و شرایط جریان انتخاب گردید. موج‌شکن پیشنهاد شده می‌تواند برای عمق‌های ۵-۱۰ متر مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه، آزمایش‌ها در عمق آب ثابت (d) ۰/۶ متر، محدوده ارتفاع موج (H) ۰/۰۶-۰/۰۸ متر و پریود موج (T) ۱/۳-۰/۸ ثانیه انجام گرفت. این محدوده مربوط به عمق آب ۶ متر، پریود 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 یک فلوم موج به طول ۱۳ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱ متر در آزمایشگاه سازه‌های دریایی دانشگاه تبریز انجام



شکل ۲- کانال آزمایشگاهی. (الف): دید از بالا - (ب): دید از مقابل.

جدول ۱- شرایط جریان حاکم بر آزمایش‌ها.

فرکانس بی بعد	تیزی موج	سرعت موج	عدد موج	طول موج	پریود موج
$\sigma^2 d/g$	H/L	$c=L/T$ (m s <sup>-1</sup> )	$k=2\pi/L$ (m <sup>-1</sup> )	L(m)	T(s)
۳/۷۷	۰/۰۶-۰/۰۸	۱/۲۵	۶/۲۸	۱	۰/۸
۲/۹۸	۰/۰۴۸-۰/۰۶۳	۱/۴۰	۴/۹۸	۱/۲۶	۰/۹
۲/۴۱	۰/۰۳۹-۰/۰۵۲	۱/۵۴	۴/۰۸	۱/۵۴	۱
۱/۹۹	۰/۰۳۳-۰/۰۴۴	۱/۶۶	۳/۴۳	۱/۸۳	۱/۱
۱/۶۷	۰/۰۲۸-۰/۰۳۴	۱/۷۷	۲/۹۶	۱/۱۲	۱/۲
۱/۴۳	۰/۰۲۵-۰/۰۳۳	۱/۸۶	۲/۶۰	۱/۴۲	۱/۳

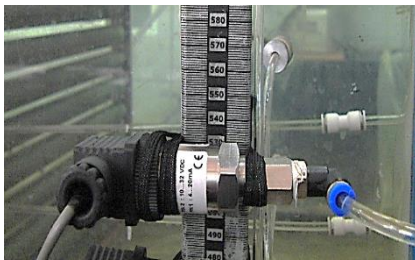
مدل موج‌شکن در فاصله ۷ متری از موج‌ساز نصب گردید. موج‌شکن از یک چارچوب آهنی که به دیواره‌های فلوم محکم شده بود و تعدادی استوانه‌ی افقی با قطرهای مختلف از جنس پی‌وی‌سی تشکیل شده است. در دو سر استوانه پیچ‌هایی وجود دارد که موجب قرارگیری استوانه درون چارچوب می‌شود، برای محکم شدن استوانه درون چارچوب پیچ ابتدای استوانه باز می‌گردد. در این آزمایش‌ها از سه قطر ۰/۰۳۲، ۰/۰۴۰ و ۰/۰۵۰ متر استوانه 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  $\epsilon = G/(G+D)$  محاسبه می‌شود. که  $G$  فاصله بین استوانه‌ها و  $D$  قطر استوانه می‌باشد. در این مجموعه از آزمایش‌ها، تخلخل سازه ۱۶ درصد برای قطر ۰/۰۵۰

متر، ۱۹ درصد برای قطر ۰/۰۴۰ متر و ۲۳ درصد برای قطر ۰/۰۳۲ متر بود. شیلنگ‌های پیزومتری ۶ میلی‌متری در وسط بخش‌های استوانه‌ای سازه کار گذاشته شدند، این پیزومترها بعد از خروج از انتهای لوله به مبدل‌های فشار متصل شده و فشار دینامیکی ناشی از برخورد موج به سازه ثبت می‌گردد. محل قرارگیری مبدل‌های فشار تا سطح آب  $z$  می‌باشد. تصویر مدل موج‌شکن در شکل ۳ نمایش داده شده است.

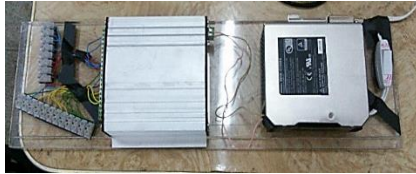
با هدف اندازه‌گیری فشار از چهار مبدل فشار ۶۰- میلی‌بار شرکت آتک ترکیه مدل BT10-210، با فرکانس داده برداری ۲۰ داده در ثانیه که در چهار نقطه ارتفاعی نصب شده بودند، استفاده گردید (جدول ۲). با اتصال این مبدل‌ها به دیتالاگر، داده‌ها از حالت آنالوگ به دیجیتال تبدیل شده و بر روی سیستم کامپیوتری ذخیره می‌گردند. تصویر ابزار دقیق و مبدل مورد استفاده در آزمایشگاه در شکل ۴ آورده شده است.

جدول ۲- موقعیت قرارگیری مبدل‌های فشار در تخلخل‌های مختلف.

مبدل‌های فشار	$\epsilon = 16\%$		$\epsilon = 19\%$		$\epsilon = 23\%$	
	z(cm)	z/d	z(cm)	z/d	z(cm)	z/d
P1	-۱۰/۵	-۰/۱۷۵	-۱۲/۵	-۰/۲۰۸	-۴۱/۷	-۰/۲۴۵
P2	-۱۶/۵	-۰/۲۷۵	-۱۷/۵	-۰/۲۹۲	-۱۸/۹	-۰/۳۱۵
P3	-۲۲/۵	-۰/۳۷۵	-۲۲/۵	-۰/۳۷۵	-۲۳/۱	-۰/۳۸۵
P4	-۲۸/۵	-۰/۴۷۵	-۲۷/۵	-۰/۴۵۸	-۲۷/۳	-۰/۴۵۵

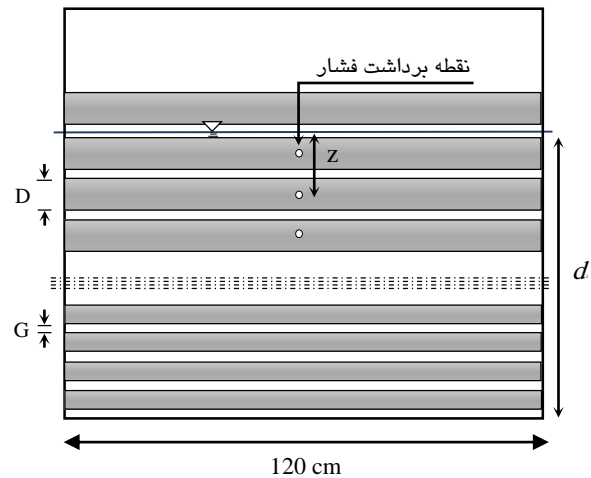


(الف)



(ب)

شکل ۴- ابزار دقیق آزمایشگاهی. (الف): مبدل فشار. (ب) دیتالاگر ۸ کاناله و آداپتور.



شکل ۳- جانمایی استوانه‌ها در چارچوب.

## نتایج و بحث

انرژی آن‌ها توسط جاذب موج انتهای فلوم از بین می‌رود. موج‌شکن‌های لوله‌ای عمدتاً انرژی موج را مستهلک می‌کنند، بخشی را منعکس نموده و بخشی از انرژی موج را منتقل می‌کنند. در کل، هنگامی که 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 پروسه انعکاس در نزدیکی سطح آزاد آب، وقوع امواج تفرق یافته و منعکس شده، وقوع شکست موج، تغییر می‌کند. این پدیده‌ها اتلاف انرژی موج را علاوه بر اتلاف ایجاد شده توسط خود سازه، تحت تأثیر قرار می‌دهند (ردی و نیلامانیت ۱۹۹۲).

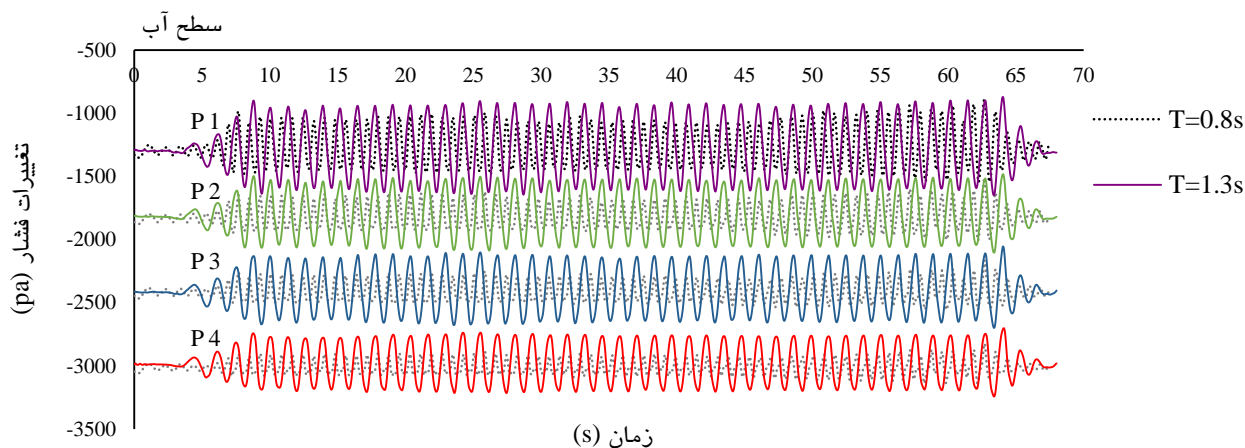
مطابق جدول ۲ از چهار مبدل فشار برای اندازه‌گیری فشار وارد بر سازه موج‌شکن ناشی از برخورد موج استفاده گردید. سری زمانی تغییرات فشار دینامیک وارد بر سازه توسط مبدل فشار در تمامی

هدف از این آزمایش‌ها مطالعه نوسانات فشار دینامیکی و نحوه رفتار لحظه‌ای موج بر روی سازه می‌باشد. در مورد فشار ثابت، مشکل خاصی جهت طراحی وجود ندارد، زیرا سازه به نحوی طراحی می‌گردد که تاب مقاومت در برابر یک تنش ثابت را داشته باشد. اما در مورد فشارهای دینامیکی وارد بر قسمت‌های مختلف سازه، وضع به گونه‌ای 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 به صورت لحظه‌ای ثبت گردد. بدین 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 فرکانس 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 جهت عکس منتشر می‌شوند، در حالی که امواج منتقل شده، حرکت کرده و



درصد سازه در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دید، دامنه فشار وارد بر سازه با افزایش پریود موج افزایش می‌یابد.

آزمایش‌ها ثابت گردید. اختلاف فشار ( $\Delta P$ )، که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد، دامنه فشار دینامیک موج را بیان می‌کند. سری زمانی تغییرات فشار مربوط به کم‌ترین و بیش‌ترین پریود آزمایش‌ها برای تخلخل ۱۶

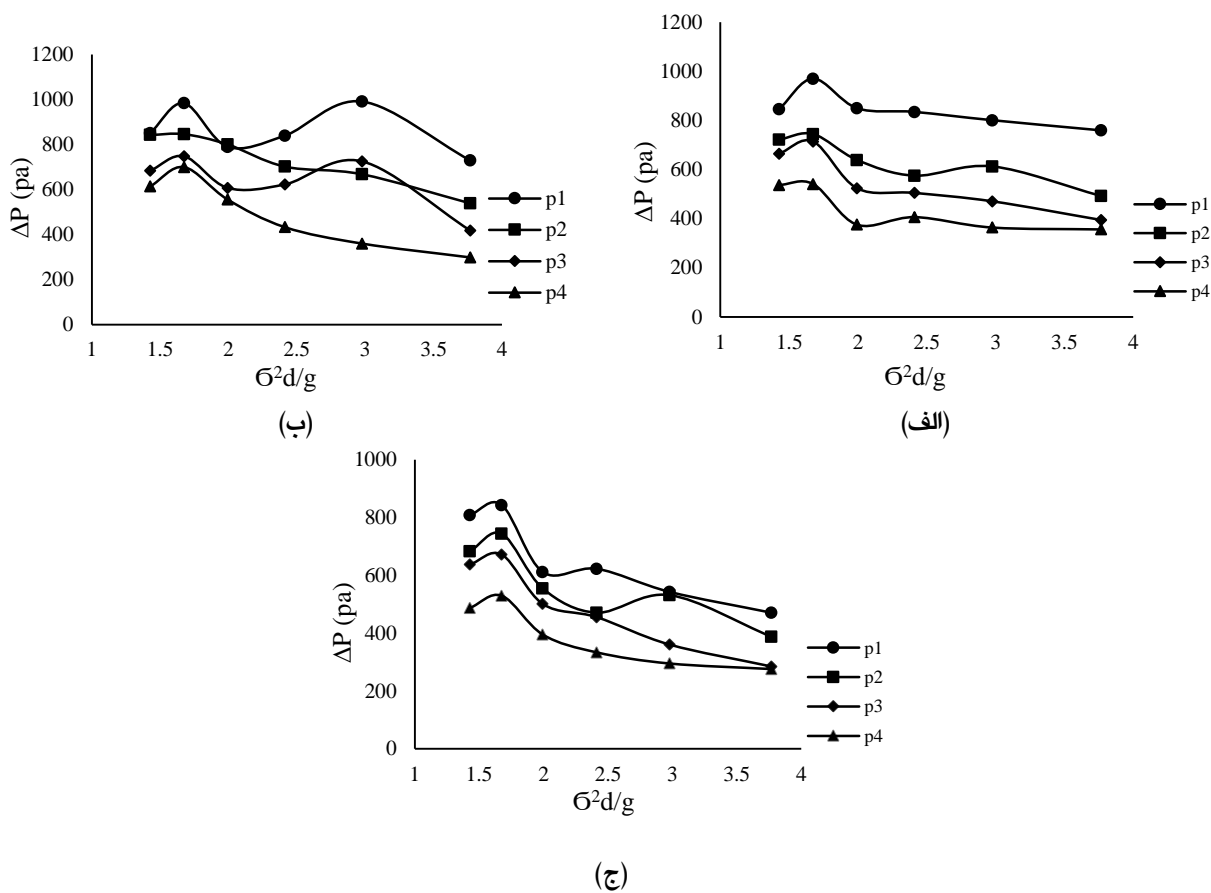


شکل ۵- سری زمانی نوسانات فشار دینامیک موج ثبت شده توسط مبدل‌های فشار در تخلخل ۱۶ درصد.

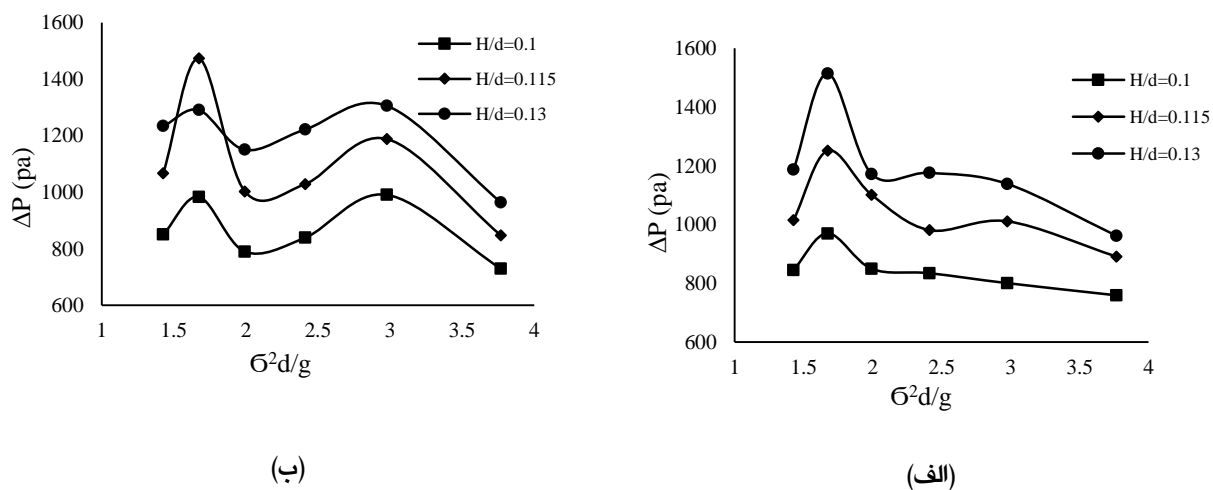
آزمایش‌ها در تحقیقات شی (۲۰۱۶) نیز دیده می‌شود. بیش‌ترین دامنه تغییرات فشار مربوط به تخلخل ۱۹ درصد و کم‌ترین دامنه تغییرات فشار مربوط به تخلخل ۲۳ درصد بود. هنگامی‌که موج به سطح موج‌شکن ضربه می‌زند و از میان لوله‌های سازه عبور می‌کند، اثر مقاومت سازه به صورت مانع در برابر امواج عمل می‌کند، بنابراین تخلخل سازه نقش تأثیرگذاری بر دامنه نوسانات فشار دارد. نتایج نشان داد توزیع فشار برای اعماق مختلف تقریباً یکسان است و با کاهش پریود موج بدلیل کاهش سرعت موج روند کاهشی دارد.

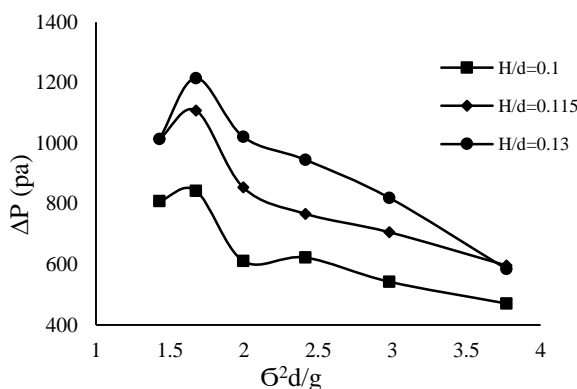
با افزایش ارتفاع موج تابشی میانگین تغییرات دامنه فشار برای تخلخل‌های مختلف افزایش یافت (شکل ۷).

شکل ۶ (الف) تغییرات فشار در تخلخل ۱۶ درصد سازه را نشان می‌دهد. با افزایش پریود موج، میانگین دامنه فشار موج تا حدود ۹۷۰ پاسکال ( $T=1/2s$ ) افزایش می‌یابد که تقریباً  $1/3$  برابر میانگین دامنه فشار موج در کم‌ترین پریود می‌باشد ( $T=0/8s$ ). مبدل فشار  $P_1$  که در نزدیک‌ترین تراز ارتفاعی به سطح آب قرار گرفته، بیش‌ترین میزان تغییرات فشار را ثبت نمود و با افزایش عمق آب تغییرات فشار ثبت شده توسط مبدل‌ها کاهش یافت. در تخلخل ۱۹ و ۲۳ درصد (شکل ۵ (ب و ج)) بیشینه دامنه فشار به ترتیب حدود ۱۰۰۰ و ۸۴۰ پاسکال در فرکانس بی بعد  $1/67$  بود که توسط مبدل فشار  $P_1$  ثبت گردید. بنابراین بیشینه دامنه تغییرات فشار در تمامی تخلخل‌های سازه در فرکانس بی بعد  $1/67$  ( $T=1/2s$ ) ثبت گردید. ایجاد بیشینه دامنه فشار در پریودی غیر از بیشینه پریود



شکل ۶- تغییرات و توزیع فشار موج منظم وارد بر سازه موج شکن نفوذپذیر در  $H/d = 0.1$ . (الف) تخلخل ۱۶ درصد. (ب) تخلخل ۱۹ درصد. (ج) تخلخل ۲۳ درصد.



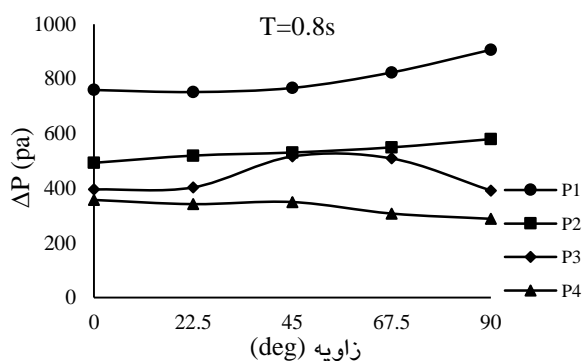
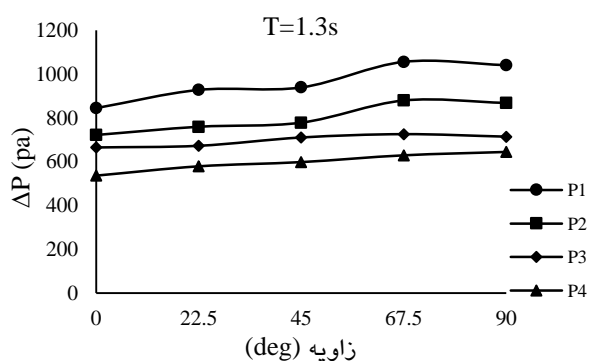


(ج)

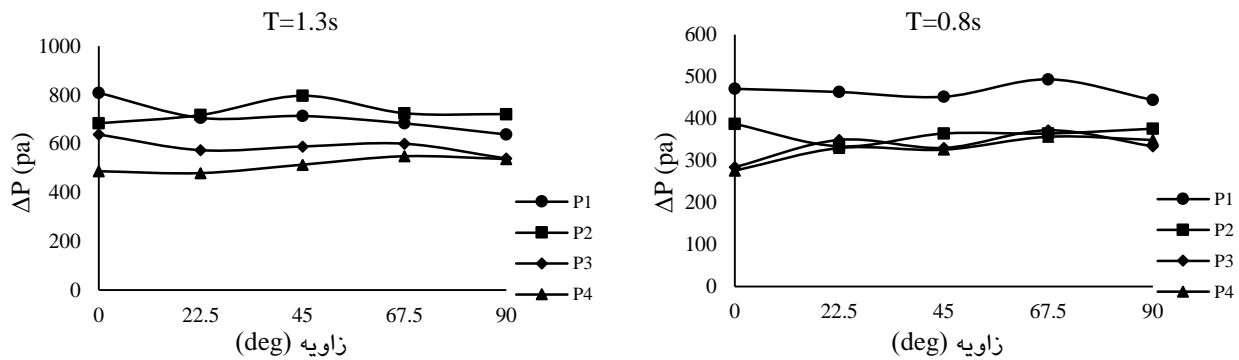
شکل ۷- تغییرات و توزیع فشار وارد بر سازه موج‌شکن نفوذپذیر در مبدل فشار  $P_1$ . (الف) تخلخل ۱۶ درصد. (ب) تخلخل ۱۹ درصد. (ج) تخلخل ۲۳ درصد.

موج غالباً در زاویه صفر برخورد موج با استوانه‌های سازه ایجاد نمی‌گردد و در زاویه‌های بیش‌تر از ۴۵ درجه، شاهد افزایش دامنه نوسانات فشار دینامیکی هستیم. که این مسئله می‌تواند ناشی از اثر حضور چند پایه در مجاورت یکدیگر، شرایط طراحی سازه و یا شرایط موج باشد. با افزایش میزان تخلخل سازه روند افزایشی تغییرات فشار دینامیکی موج با افزایش زاویه نسبت به موج تابشی تغییر کرده و تقریباً روند کاهشی ایجاد می‌گردد (شکل ۸).

برای اندازه‌گیری توزیع فشار پیرامون استوانه، صفحه موج به‌گونه‌ای طراحی گردید که استوانه‌های سازه قابلیت تنظیم زاویه حول محور مرکزی خود را داشته باشند. فشار دینامیکی موج پیرامون استوانه با اختلاف زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به جهت موج تابشی در ۵ زاویه (۰، ۲۲/۵، ۴۵، ۶۷/۵ و ۹۰ درجه) اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد بیشینه میانگین فشار دینامیکی موج در زاویه صفر ایجاد می‌شود و با افزایش زاویه قرارگیری استوانه نسبت به جریان برخوردی، کاهش می‌یابد ولی بیشینه دامنه تغییرات فشار دینامیکی ( $\Delta P$ )



(الف)

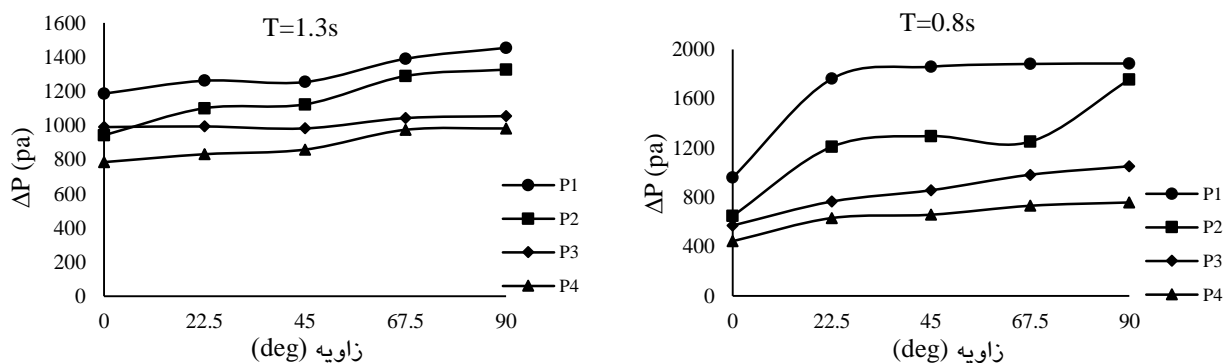


(ب)

شکل ۸- توزیع تغییرات فشار دینامیک موج در پیرامون پایه بر حسب درجه نسبت به جهت موج تابشی در  $H/d = 0.1$ . (الف) تخلخل ۱۶ درصد. (ب) تخلخل ۲۳ درصد.

نزدیکی سطح آب دامنه نوسانات بزرگتری را ثبت می‌کنند. با افزایش ارتفاع موج تابشی در یک پریود ثابت امواج تیزتری تشکیل می‌گردد. امواج تیزتر برخورد بیشتری با سطح صفحه در یک فاصله زمانی کوچکتر دارند و عبور امواج تیزتر از میان صفحه، به علت اختلاف ارتفاع بیشتر نسبت به امواج مسطح دامنه فشار بزرگتری را ایجاد می‌کند (شکل ۹).

با افزایش ارتفاع موج تابشی در زاویه‌های مختلف دامنه نوسانات فشار دینامیکی افزایش یافت. این مسئله به خصوص در مبدل‌های فشار  $P_1$  و  $P_2$  که به سطح آب نزدیکتر هستند، مشاهده می‌شود. سازه صفحه موج از طریق تخریب خط سیر موج، انرژی موج تابشی را مستهلک می‌کند. بنابراین مبدل‌های فشار  $P_1$  و  $P_2$  به دلیل بزرگتر بودن دامنه اوربیتال‌های حرکت امواج در



شکل ۹- توزیع تغییرات فشار دینامیک موج در پیرامون پایه بر حسب درجه نسبت به جهت موج تابشی در  $H/d = 0.13$ . تخلخل ۱۶ درصد.

۲۳ درصد برای ۶ پریود و ۳ ارتفاع موج ارزیابی و تحلیل گردید.

افزایش تخلخل سازه موجب کاهش دامنه تغییرات فشار دینامیکی موج گردید. هنگامی که تخلخل افزایش

### نتیجه‌گیری کلی

به منظور بررسی فشارهای دینامیکی وارد بر مدل موج‌شکن نفوذپذیر نتایج در سه تخلخل سازه ۱۶، ۱۹ و

با افزایش ارتفاع موج تابشی در زاویه‌های مختلف قرارگیری استوانه‌ها نسبت به موج، دامنه نوسانات فشار دینامیکی افزایش یافت. این مسئله به‌خصوص در مبدل-های فشار  $P_1$  و  $P_2$  که به سطح آب نزدیکتر هستند، مشاهده می‌شود.

#### 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.

می‌یابد، انرژی موج آزادانه‌تر درون دیوار متخلخل منتشر می‌شود و بالاروی کمتری را بر روی دیواره ایجاد می‌کند، بنابراین فشار دینامیکی کاهش می‌یابد.

با افزایش پیروی موج، دامنه نوسانات فشار موج به دلیل افزایش سرعت موج افزایش می‌یابد.

بیشینه تغییرات دامنه فشار دینامیکی ( $\Delta P$ ) موج غالباً در زاویه صفر برخورد موج با استوانه‌های سازه ایجاد نمی‌گردد و در زاویه‌های بیش‌تر از ۴۵ درجه، شاهد افزایش دامنه نوسانات فشار دینامیکی بودیم. با افزایش میزان تخلخل سازه روند افزایشی تغییرات فشار دینامیکی موج با افزایش زاویه نسبت به موج تابشی تغییر کرده و تقریباً روند کاهشی ایجاد می‌گردد.

#### منابع مورد استفاده

- Alkhalidi M, Neelamani S and Assad AAH, 2015. Wave force and dynamic pressure on slotted vertical wave barriers with an impermeable wall in random wave fields. *Ocean Engineering* 109 (1): 1–6.
- Anandkumar G, Sundar V, Graw KU and Kaldenhoff H, 1995. Pressure and forces on inclined cylinders due to regular waves. *Ocean Engineering* 22 (7): 747–759.
- Bergmann H and Oumeraci H, 1998. Wave pressure distribution on permeable vertical walls. 26th International Conference on Coastal Engineering. Copenhagen, Denmark, 2042–2055.
- Chen XF, Li YC, Wang YX, Dong GH and Bai X, 2003. Numerical simulation of wave interaction with perforated caissons breakwaters. *China Ocean Engineering* 17(1): 33–43.
- Dean RG and Dalrymple RA, 1991. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World scientific. Delaware University, USA. 371p.
- Dhinakaran G, Sundar V, Sundaravadevelu R and Graw KU, 2002. Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves. *Ocean Engineering* 29(15): 1981–2004.
- Hall K, 2000. Wave transmission through multi-layer wave screens. M.Sc. thesis at Queen's university, Kingston, Ontario, Canada.
- Hughes SA, 1993. *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. World scientific. Delaware University, USA, 568p.
- Huang ZH and Li L, 2011. Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: a review. *Ocean Engineering* 38(1): 1031–1053.
- Kisacik D, Troch P and Bogaert PV, 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.
- Koraim AS, Iskander MM and Elsayed WR, 2014. Hydrodynamic performance of double rows of piles suspending horizontal c shaped bars. *Journal of Coastal Engineering* 84: 81–96.
- Krishnakumar C, Sunder V and Sannasiraj SA, 2010. Pressures and forces due to directional waves on a vertical wall fronted by wave screens. *Applied Ocean Research* 32 (1): 1–10.
- Neelamani S and Sandhya N, 2005. Surface roughness effect of vertical and sloped seawall in incident random wave fields. *Ocean Engineering*. 32: 395–416.
- Reddy MS and Neelamanit S, 1992. Wave transmission and reflection characteristics of a partially immersed rigid vertical barrier. *Ocean Engineering* 19(1): 313–325.
- Sahoo T, Lee MM, and Chwang AT, 2000. Trapping and generation of waves by vertical porous structures. *Journal of Engineering Mechanics*. 126 (10): 1074–1082.
- Shih RS, 2016. Investigation of random wave impact on highly pervious pipe breakwaters. *Ocean Research* 58 (1): 146–163.

- Sorensen RM, 2006. Basic coastal Engineering. Springer Science. Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania. 331p.
- Sundar V, Koola PM and Schlenkhoff AU, 1999. Dynamic pressure on inclined cylinders due to freak waves. Ocean Engineering 26 (9): 841–863.
- Taqi A, Neelamani S, Al-Khalidi M and Al-Salem K, 2013. Experimental investigation to assess the wave energy dissipation for arrays of vertical slotted barriers. In: Proceedings of the 35th IAHR World Congress. Chengdu, China, A11863, (2), 1–15.
- Yagci O, Kirca VSO, Kabdasli MS, Celik AO, Unal NE and Aydingakko A, 2006. An experimental model application of wavescreen: dynamic pressure, Water particle velocity, and wave measurements. Ocean Engineering 33(1): 1299-1321.