

مطالعه تجربی اثرات موج‌گیر مربعی بر روی برش پایه حداکثر و لنگر واژگونی سازه جکت دریایی

آرش دلیلی اسگویی^۱، رامین وفایی پور سرخابی^{۲*}، احمد ملکی^۳، حمید احمدی^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه

^۴ دانشیار گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۸/۱/۱۱، پذیرش: ۹۸/۱۰/۳۲، نشر آنلاین: ۹۸/۱۰/۲۲)

چکیده

هدف از این تحقیق، به دست آوردن نیروی برش پایه و لنگر واژگونی جکت دریایی، در مواجهه با امواج تصادفی دریا و به کارگیری موج‌گیر شناور مربعی شکل در جلوی سازه جکت، با هدف کاهش نیرو و لنگر واژگونی می‌باشد. در این راستا، مدل سازه جکت به ارتفاع ۴/۵۵ متر، ساخته و در فلوم آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس، به طول ۴۰۲ متر و عمق ساکن آب ۴ متر، در معرض امواج تصادفی دریا، تحت طیف جانسواپ (Jonswap)، قرار گرفت. موج‌گیر شناور با مقطع مربعی در جلوی جکت، قرار گرفته و امواج تصادفی با ارتفاع موج ۲۳ سانتی‌متر به جکت تابانده شد. نتایج مأخوذه نشان می‌دهد، موج‌گیر در امواج حداکثر، مؤثر و میانگین به ترتیب، ۱۴/۲۴، ۲۴/۶۷ و ۸/۵۷ درصد، کاهش برش پایه و ۱۹/۷۸ و ۲۳/۷۱ درصد کاهش لنگر واژگونی را موجب شده است. در تمام آزمایش‌ها شرایط آب عمیق حاکم است.

کلیدواژه‌ها: جکت، امواج تصادفی، برش پایه، لنگر واژگونی، موج‌گیر شناور مربعی شکل.

۱- مقدمه

شود؛ در این راستا با برآورد اقتصادی پیش‌بینی گردد که به- کارگیری موج‌گیر، تا چه حدی می‌تواند در کاهش هزینه مؤثر باشد. در انجام مطالعات آزمایشگاهی، هرچقدر ابعاد سازه جکت و پارامترهای هیدرولیکی نظیر عمق آب، ارتفاع موج و طول فلوم^۲ بیشتر باشد، مقیاس بزرگ‌تر شده و مقادیر برداشت‌شده از انجام آزمایش به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. زیاد بودن عمق آب در فلوم آزمایشگاهی، این امکان را به محقق می‌دهد تا شرایط آب عمیق مهیا گردد. در شرایط محیطی دریا، امواج طوفانی یکی از بارهای تعیین‌کننده طراحی در سازه جکت در نظر گرفته می‌شود. به کارگیری مدل امواج منظم، دور از واقعیت است و بایستی، رفتار امواج به صورت تصادفی در نظر گرفته شوند تا بتواند حالت واقعی دریا را بیان کنند. به منظور اعمال امواج تصادفی، از طیف‌های موج، نظیر پیرسون- موسکوویچ^۳، برتشنايدر^۴، جانسواپ^۵ و طیف- های اقلیمی در صورت وجود استفاده می‌گردد. با توجه به انرژی

جکت‌های دریایی^۱، سازه‌هایی هستند که درون دریاها و اقیانوس‌ها، احداث می‌گردند و از آن‌ها برای مقاصد مختلف، بهره- برداری می‌گردد. این سازه‌ها، بایستی در برابر نیروهای محیطی دریا، پایداری خود را، هم در حالت آب‌اندازی و هم در حالت بهره‌برداری حفظ نمایند. یکی از مهم‌ترین نیروهای وارد بر جکت، نیروی ضربه‌ای موج می‌باشد که ممکن است موجب ناپایداری سازه جکت شود. برش پایه و لنگر واژگونی ایجادشده در نتیجه بارگذاری امواج روی سازه، یکی از مسائل مهم در پایداری جکت- ها می‌باشند. با توجه به رفتار پیچیده موج و اندرکنش آن با سازه، بررسی رفتار سازه‌ای، صرفاً نمی‌تواند بر مبنای مدل‌های عددی و روابط تجربی انجام گیرد و برای بررسی دقیق‌تر، استفاده از مدل آزمایشگاهی با اشل منطقی، می‌تواند کمک شایانی در برآورد نیرو و لنگر خمشی دقیق، داشته باشد و به سازه واقعی تعمیم داده

4. Bretschneider
5. Jonswap

1. Jacket platform
2. Flume
3. Pierson- Moskowitz

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۴۴۰۱۳۴۸۸

Hildebrandt (۲۰۱۳)، تحقیقات آزمایشگاهی بزرگ-مقیاس، بر روی سه پایه با پایه‌های سیلندری را انجام داد. بر مبنای نتایج آزمایشگاهی ایشان و مقایسه با مدل عددی حل جریان غیرخطی و مدل ANSYS-CFX، نیروی جریان بر روی سازه تخمین زده شد. در این مطالعه، مقایسه تراز سطح آب و فشار روی سازه بین مطالعه آزمایشگاهی و مدل عددی صورت پذیرفت. Sruthi و Sriram (۲۰۱۷)، مطالعات آزمایشگاهی روی جکت های دریایی در آب نیمه عمیق، انجام داده و مقادیر نیرو را با تراز سطح آب اندازه گیری نمودند. بر مبنای نتایج اندازه گیری شده توسط ایشان مقدار ضریب اسلمینگ^{۱۲} بین ۲/۲ تا ۴/۶ به دست آمد. استفاده از موج شکن های شناور، به منظور کاهش ارتفاع و در نتیجه انرژی موج بر روی شناورها، دیوارهای ساحلی، موج-شکن های توده سنگی از دیرباز مورد توجه محققین بوده است. استفاده از این نوع موج شکن ها، به طور فزاینده ای در آینده برای ساخت، سازه های دریایی مورد توجه واقع خواهد شد (Christensen و همکاران، ۲۰۱۵). اغلب مطالعات انجام یافته بر روی موج شکن های شناور، برای سازه های ساحلی، با طول زیاد انجام یافته است. در این حالت رفتار هیدرودینامیکی موج، قبل و بعد از موج شکن های شناور می تواند به صورت دوعبده در نظر گرفته شود. Dimer و همکاران (۱۹۹۲)، مدل تحلیل دوعبده برای یک موج شکن پانتونی^{۱۳} را ارائه دادند. Sannasiraj و همکاران (۱۹۸۸)، مدل موج شکن پانتونی را به صورت آزمایشگاهی و تئوری با شرایط یکسان مطالعه نموده و نتایج را با هم مقایسه نمودند. Abul-Azm و Gesraha (۲۰۰۰) و Gesraha (۲۰۰۶)، موج شکن های پانتونی را روی امواج مورب مطالعه نمودند. Rahman و همکاران (۲۰۰۶)، مطالعه هیدرودینامیکی موج را بر روی موج شکن های پانتونی با استفاده از معادلات ناویر-استوکس^{۱۴}، مورد تجزیه و تحلیل قرار دارند. Dong و همکاران (۲۰۰۸)، انواع مختلفی از موج شکن های باز، مانند موج شکن های مشبک را مطالعه نمودند. Christensen و همکاران، (۲۰۱۸)، مطالعات جامع آزمایشگاهی و عددی با اشکال هندسی مختلف را روی موج شکن های پانتونی برای امواج تولید شده از شناورها و تأثیر آن بر کاهش اثرات موج مورد مطالعه قرار دادند. Aggarwal و همکاران (۲۰۱۹)، نقش امواج در برخورد با جکت و تولید امواج عرضی و تأثیر آن در رفتار جکت را با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار دادند. شرایط بارگذاری، بارهای محیطی، طیف موج^{۱۵} ضوابط مربوط به سکوها دریایی منطبق با شرایط اقلیمی ایران، در آیین نامه طراحی بنادر و سازه های دریایی ایران، به طور مبسوط آمده است (آیین نامه طراحی بنادر و سازه های دریایی ایران، ۱۳۸۵).

زیاد موج طیف جانسوآپ، در تحقیق حاضر، از این طیف برای تولید موج استفاده گردیده است (Sorensen, ۱۹۹۷). با کاهش ارتفاع موج می توان مقادیر نیروهای داخلی اعضای جکت، برش پایه و لنگر واژگونی را کاهش داد. در این راستا، استفاده از موج-گیر شناور به عنوان یکی از موارد کاهنده انرژی موج به کار می رود که موج بعد از برخورد به آن، ارتفاعش کاهش می یابد. در تحقیق حاضر، سازه جکت به ارتفاع ۴/۴ متر در فلود آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس، (NIMALA)^۶ در مواجهه با امواج تصادفی دریا، تحت طیف موج جانسوآپ با ارتفاع موج ۲۳ سانتی-متر قرار گرفته است. برش پایه و لنگر واژگونی با تغییرات سطح آب، اندازه گیری شده و رابطه بین ارتفاع موج، برش پایه و لنگر واژگونی به دست آمد. برای کاهش نیروی موج، از موج گیر شناور در حالت مربعی استفاده گردیده و مجدداً مقادیر برش پایه و لنگر واژگونی اندازه گیری و با حالت بدون موج گیر شناور، مقایسه گردید. مطالعات انجام یافته در ارتباط با نیروی موج بر روی سازه در سه بخش آب های عمیق، نیمه عمق و آب های کم عمیق، انجام یافته است (Sruthi و Sriram, ۲۰۱۷). معادله موریسون (Morison و همکاران، ۱۹۵۰)، معادله بار کل وارد شده از طرف امواج به سازه جکت را بیان می کند. این معادله تخمین مناسبی از مقدار نیروی کل را ارائه می دهد.

$$F = F_D + F_I + F_S \quad (1)$$

در این معادله، F_D ، نیروی درگ^۷، که بستگی به تابع غیر خطی سرعت، F_I ، نیروی اینرسی^۸، که تابع خطی شتاب، F_S ، نیروی کوبشی^۹ می باشد که بستگی به سرعت برخورد موج به سازه دارد. برای به دست آوردن نیروی وارد بر سازه، Goda و همکاران (۱۹۶۶)، از مدل ریاضی مسئله آب ورودی استفاده نمود. نیروی امواج شکسته روی مقاطع مدور با قطر کم توسط Vonkarman (۱۹۲۹)، انجام پذیرفت. برای درک بهتر ماهیت دینامیک موج شکسته روی سازه، در حالت های مختلف شکست موج، Sawaragi و Nochino، تحقیقات جامعی را روی اندرکنش سازه جکت و امواج، انجام داده و نتایج را با روابط اندازه گیری شده توسط Goda، مقایسه نمودند (Sawaragi و Nochino, ۱۹۸۴). Chan و همکاران (۱۹۹۵)، با تحقیقات آزمایشگاهی بر روی مقاطع مدور در برابر امواج، نیروی حاصل از امواج شکسته را در حالت مختلف موج مورد بررسی قرار دادند. ایشان همچنین تخمین نیروی موج بر اساس تئوری ونیک^{۱۰} با استفاده از انتگرال دوهمال^{۱۱} را انجام داد.

11. Duhamel integral

12. Slamming

13. Pontoon's Floating Breakwater

14. Navier stokes equations

15. Wave spectrum

6. National Iranian Marine Laboratory

7. Drag force

8. Inertia force

9. Slamming force

10. Venic theory

۲- انجام آزمایش‌ها

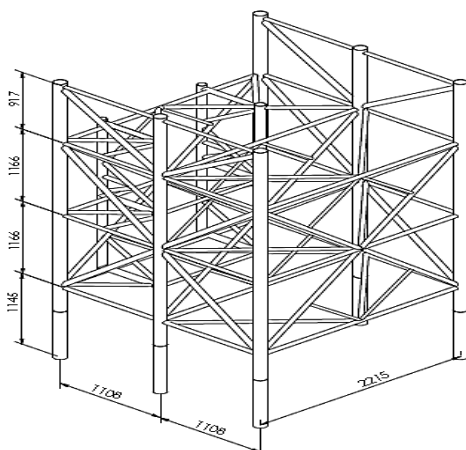
۲-۱- فلوم موج

آزمایشات مربوط به تحقیق حاضر، در آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس، انجام یافته است. فلوم موج موجود در این آزمایشگاه، بزرگترین فلوم موج در ایران بوده و استانداردهای ISO 9001:2015 و ISO/IEC 17095 2005 را اخذ کرده است و نصب، راهاندازی و کالیبراسیون آزمایشگاه با استفاده از مدارک HTTC انجام گردیده است. طول فلوم ۴۰۲ متر، عرض ۶ متر، ارتفاع کلی ۴/۵ متر و عمق آب در فلوم ۴ متر می‌باشد. نوع پدل موج‌ساز از نوع پیستونی بوده و مولد موج قادر به تولید امواج منظم و تصادفی تحت طیف‌های برتشنايدر، پیرسون- موسکوویچ و جانسوپ بوده و حداکثر ارتفاع موج تولیدی ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. موج‌نگار، از سنسورهای مقاومتی می‌باشد و قابلیت اندازه‌گیری نوسانات موقعیت سطح آب نسبت به سطح ساکن آب را با دقت بالا دارا می‌باشد. این سنسورها به وسیله یک آمپلی‌فایر به سیستم داده‌برداری متصل گردیده و سری زمانی دامنه موج تولیدی را ثبت می‌کند. همچنین آرایه‌ای به ابعاد ۷×۷/۶ متر، با دامنه سرعت بین ۰/۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه بر روی ریل‌های کناری فلوم نصب شده است که علاوه از تجهیزات اندازه‌گیری ظرفیت حمل ۳ نفر انسان را دارد. جاذب موج، در انتهای فلوم با استفاده از صفحات مشبک به منظور عدم تداخل امواج برگشتی قرار گرفته است. با توجه به طول زیاد فلوم و مدت زمان آزمایش، ممکن است تا رسیدن امواج به انتهای فلوم، برداشت داده‌ها به پایان رسیده و مسئله بازتاب امواج منتفی باشد؛ لذا طول زیاد فلوم یک مزیت می‌باشد. شکل (۱)، نمایی از فلوم و آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

۲-۲- مدل سازه جکت و موج‌گیر

سازه جکت مورد استفاده شده در آزمایش، از روی جکت ساخته شده در آب‌های خلیج فارس (۱۳۳ پارس جنوبی) که ارتفاع آن ۸۰ متر و عمق آب ۷۲ متر و با در نظر گرفتن مقیاس یک به هیجده، ساخته شده است. از این رو عمق آب در فلوم ۴ متر و ارتفاع مدل جکت ۴/۴۰ متر خواهد بود. سازه جکت در فاصله ۷۰ متر از موج‌ساز و ۳۳۲ متر از انتهای فلوم و موج‌نگار در فاصله ۲ متر بین سازه جکت و موج‌ساز قرار دارد. شکل (۲)، پلان موج، از موج‌گیر شناور با مقطع مربعی شکل استفاده گردیده است. جنس موج‌گیر از پلی‌استایرن^{۱۶} می‌باشد و با توجه به وزن مخصوص بسیار کم این مواد تقریباً ۹۸٪ آن بیرون از سطح آب قرار می‌گیرد برای استغراق ۵۰٪ درون آب و ۵۰٪ بیرون از آب، به آن وزنه‌هایی آویزان شده تا عمق آب خور نصف ارتفاع کل شود. سطح مقطع موج‌گیر ۳۰×۳۰ سانتی‌متر و طول آن ۵ متر است که از هر طرف از جدار فلوم به اندازه ۵۰ سانتی‌متر فاصله دارد. موج‌گیر شناور در فاصله ۳ متر از موج‌نگار و ۵ متر از سازه جکت نصب گردیده است.

آزمایش‌ها، در دو مرحله بدون موج‌گیر و با موج‌گیر مربعی- شکل که در هر دو حالت ارتفاع موج ورودی به دستگاه موج‌ساز یکسان بوده، انجام یافته است. برداشت‌های انجام یافته شامل تراز سطح آب، برش پایه و لنگر واژگونی است. شکل (۳)، پلان طولی فلوم آزمایشگاه و جکت، دستگاه‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. شکل (۴)، سازه جکت را در خشکی (الف)، در مواجهه با امواج تصادفی و بدون موج‌گیر، (ب)، با موج‌گیر مربعی، (ج) نشان می‌دهد.



شکل ۲- شکل ایزومتریک سازه جکت به کاررفته در تحقیق حاضر



شکل ۱- نمایی کلی از فلوم و آرایه روی آن در آزمایشگاه NIMALA

۳-۲- برداشت و تفسیر داده‌ها

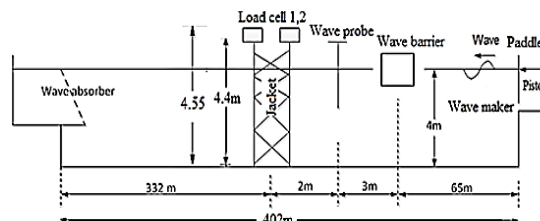
داده‌های اخذ شده شامل تراز سطح آب، برش پایه و لنگر واژگونی می‌باشد. تراز سطح آب با استفاده از ترازسنج مقاومتی اخذ گردیده و تراز سطح ساکن آب، تراز صفر در نظر گرفته شده است. گام زمانی برداشت داده‌ها از هر ۰/۰۵ ثانیه (در هر ثانیه ۲۰ برداشت) و در تست‌های مختلف زمان کل برداشت متفاوت بوده است. به عنوان مثال اگر کل برداشت تراز سطح آب ۴۰۰ ثانیه باشد تعداد داده‌هایی که بیانگر تراز سطح آب می‌باشد ۸۰۰۰ عدد خواهد بود. با توجه به کالیبراسیون مناسب دستگاه نیروسنج و ترازسنج، برداشت نیرو نیز با همین گام زمانی صورت گرفته است. نیروسنج‌ها ساخت شرکت WONBANG با ظرفیت ± 400 نیوتن در جهت طولی و ± 50 نیوتن در جهت عرضی را داراست، انجام گرفته است. شکل (۵) تصویر این نیروسنج‌ها را نشان می‌دهد.



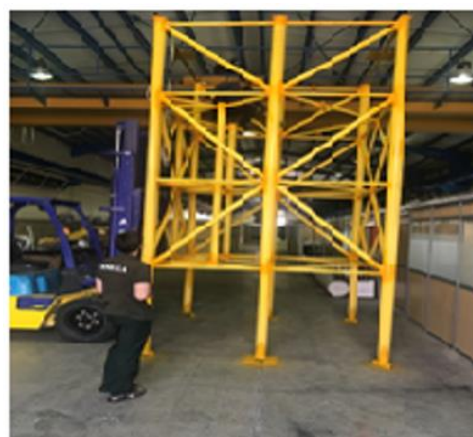
شکل ۵- نیروسنج‌های به کاررفته در تحقیق حاضر

با توجه به نیروی موج، ظرفیت یک عدد نیروسنج، برای ثبت نیروی موج کافی نبود و امکان افزایش نیروی موج، مخصوصاً در حالت‌های حداکثری بیش از ۴۰۰ نیوتن وجود داشت، لذا دو عدد نیروسنج استفاده گردیده است. مسئله مهم در استفاده از این نیروسنج‌ها، تطابق مناسب دو نیروسنج به هنگام استفاده از آن‌ها بود. با توجه به کالیبراسیون، تأخیر فازی بین دو سری زمانی توسط دو نیروسنج وجود نداشت ولی برای کنترل بهتر، نتایج هم، این امر را نشان می‌دهند. به دلیل کنترل بهتر و دسترسی در حین انجام آزمایش‌های متوالی، نیروسنج‌ها به جای آن‌که در کف سازه نصب شوند، در رأس سازه نصب شده‌اند.

شکل (۶)، مکانیسم تعبیه این دو نیروسنج را نشان می‌دهند. همان طوری که در شکل ملاحظه می‌گردد، نصب نیروسنج در رأس سازه جکت از لحاظ مقدار برش پایه با نصب آن در پایین سازه تفاوتی نخواهد کرد. برای برداشت لنگر واژگونی، در پایین جکت از لولای ثابت (شکل (۷)) استفاده می‌گردد. با توجه به شکل لنگر واژگونی، برابر با نیروی اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج در فاصله نیروسنج تا لولا مطابق با معادله (۲) خواهد



شکل ۳- مقطع طولی فلوم در آزمایشگاه NIMALA



(الف)

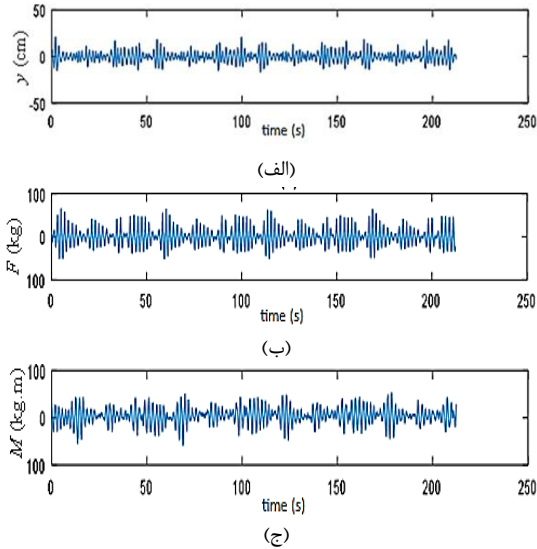


(ب)



(ج)

شکل ۴- مدل پیکربندی جکت: (الف) خشکی، (ب) در مواجهه با امواج تصادفی، (ج) موج‌گیر مربعی شکل



شکل ۸- سری زمانی برداشت شده: (الف) تراز سطح آب، (ب) برش پایه، (ج) لنگر واژگونی

جدول ۱- کل آزمایشات انجام یافته

آزمایش	مشخصات	برش پایه	لنگر واژگونی
بدون موج گیر	ارتفاع موج ورودی (سانتی متر)	۲۳	۲۳
موج گیر	حالت موج	ناشکنا	ناشکنا
	نام آزمایش	FN23	MN23
با موج گیر	ارتفاع موج ورودی (سانتی متر)	۲۳	۲۳
موج گیر	حالت موج	ناشکنا	ناشکنا
	نام آزمایش	FS23	MS23

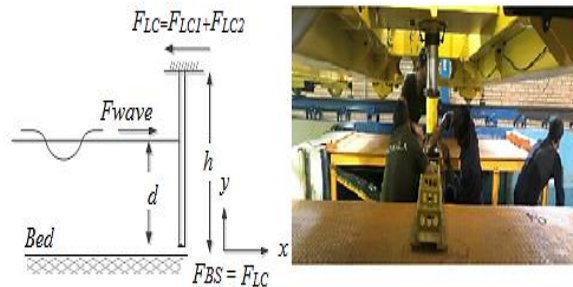
۳- نتایج و بحث

۳-۱- سری های زمانی

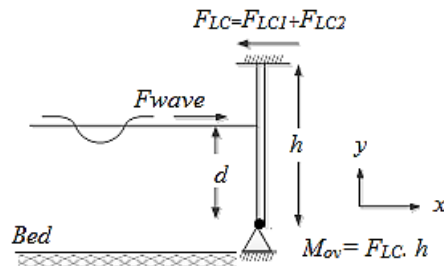
با استفاده از سری زمانی برداشت شده، طی آزمایش های انجام یافته، ارتفاع موج برای هر تک موج از سری امواج با استفاده از روش تقاطع صفر رو به بالا حاصل گردید. در این روش، تقاطع سطح آب در حالت موج با سطح ساکن آب دارای دو نقطه تقاطع می باشد. یکی از این تقاطع ها در حالت خیز آب و دیگری، فرو آب می باشند. فاصله بین دو نقطه تقاطع خیز آب و سطح ساکن آب یک موج را تشکیل می دهد. بدین منظور برنامه ای در نرم افزار MATLAB تهیه شده که از سری زمانی سطح آب امواج را یک به یک تفکیک کرده و ارتفاع و پرپود تک تک امواج، را ارائه می دهد. از روی ارتفاع و پرپوده های به دست آمده، ارتفاع ماکزیمم، ارتفاع موج مؤثر، ارتفاع موج میانگین، پرپود ماکزیمم، پرپود موج مؤثر، پرپود میانگین، طول موج و فرکانس حاصل می گردد. (شکل ۹)، طیف جانسواپ و طیف برداشت شده از سطح آب را برای آزمایش برش پایه بدون موج گیر شناور (که در آن ارتفاع ۲۳ سانتی متر،

بود. در شکل های (۶) و (۷)، d عمق آب، h ارتفاع جکت، F_{wave} نیروی موج، F_{LC} مجموع نیروی ثبت شده توسط دو نیروسنج، F_{BS} برش پایه و M_{ov} لنگر واژگونی جکت می باشد.

$$\sum M_0 = F_{wave} \cdot d - F_{LC} \times h = 0 \rightarrow M_{ov} = F_{wave} \cdot d = F_{LC} \cdot h \quad (2)$$



شکل ۶- مکانیسم برداشت برش پایه توسط نیروسنج ها



شکل ۷- مکانیسم اندازه گیری لنگر واژگونی

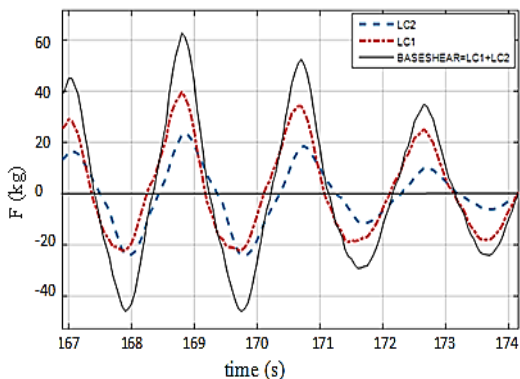
مقدار حاصل ضرب d در F_{wave} ، همان لنگر واژگونی جکت (M_{ov}) است. بنابراین در این حالت مقادیر اندازه گیری شده از نیروسنج ها (که با حالت اندازه گیری برش پایه متفاوت است)، بایستی در مجموع ارتفاع کل جکت (۴/۴۰ متر) و فاصله نیروسنج تا رأس جکت (۵ سانتی متر)، یعنی ۴/۵۵ ضرب شوند تا لنگر واژگونی حاصل گردد.

شکل (۸)، سری زمانی برداشت شده تراز سطح آب (الف)، برش پایه (ب) و لنگر واژگونی (ج)، را نشان می دهد. این شکل برای یک سری برداشت انجام یافته است و جدول (۱)، آزمایشات انجام یافته را لیست بندی می کند. در آزمایشات صورت گرفته، طیف موج، جانسواپ، پارامتر γ در طیف، ۳/۳، عمق آب، ۴۰۰ سانتی متر، گام زمانی برداشت شده ۰/۰۵ ثانیه و تعداد برداشت های انجام یافته در هر ثانیه ۲۰ داده بوده است. مکان قرارگیری سازه، ترازسنج، پدل موج، موج شکن شناور مطابق شکل (۳) و سازه جکت مطابق شکل (۲) می باشد. در جدول (۱)، منظور از نام FN23، یعنی آزمایش برای برش پایه (F)، بدون موج گیر (N) و ارتفاع موج ۲۳ سانتی متر می باشد. حرف (M) برای لنگر واژگونی و حرف (S) برای موج گیر مربعی شکل استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات موج حاصل از تحلیل سری زمانی سطح آب به روش تقاطع صفر رو به بالا

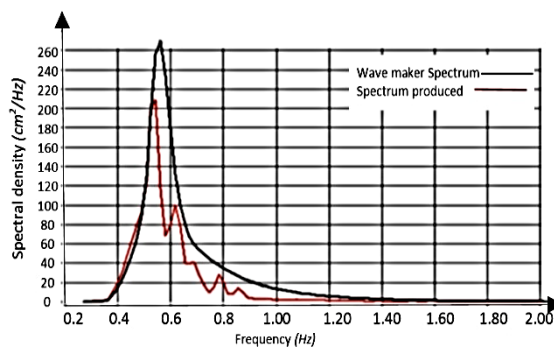
مقدار	علامت اختصاری	پارامترهای موج
۲۸	H_{WM} (cm)	ارتفاع موج ورودی به مولد موج
۱/۸	T_{WM} (s)	پریود موج ورودی به مولد موج
۱۲۴	N	تعداد امواج
۳۶/۳۱	H_{max} (cm)	ارتفاع موج حداکثر
۲۶/۲۱	H_s (cm)	ارتفاع موج مؤثر
۱۴/۰۳	H_{av} (cm)	ارتفاع موج میانگین
۲/۳۷	T_{max} (s)	پریود موج حداکثر
۱/۶۸	T_{av} (s)	پریود موج مؤثر
۲/۰۷	T_s (s)	پریود موج میانگین

طول موج در کلیه حالات (آب عمیق، نیمه عمیق و کم عمق) از رابطه $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$ و برای آب عمیق، از رابطه $L = \frac{gT^2}{2\pi}$ به دست می آید، اگر با توجه به داده های به دست آمده طول موج از این دو رابطه باهم برابر باشند، مقدار $\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$ خیلی به یک نزدیک بوده و شرایط آب عمیق برقرار خواهد بود. جدول (۳)، مقادیر پریود و طول موج را در وضعیت امواج متوسط، مؤثر و ماکزیمم نشان می دهد؛ که شرایط آب عمیق در حالت های موج متوسط ($\frac{d}{L_{av}} > \frac{1}{2}$)، موج مؤثر ($\frac{d}{L_s} > \frac{1}{2}$)، به طور کامل برقرار است و فقط در موج ماکزیمم ($\frac{1}{20} < \frac{d}{L_{max}} < \frac{1}{2}$)، آب نیمه عمیق حاکم است که خیلی نزدیک به آب عمیق می باشد و می توان شرایط آب عمیق را متصور شد. این حالت برای تمامی آزمایشات بررسی گردیده و شرایط آب عمیق در تمامی آن ها برقرار می باشد. داده های برداشت شده توسط دو نیروسنج تأخیر فاز نداشته و انطباق خوبی با هم دارند، لذا جمع آوری داده های برداشت شده از دو دستگاه، برش پایه را نتیجه می دهد. شکل (۱۲)، داده سری زمانی دو دستگاه نیروسنج را در یک بازه کوتاه زمانی برای رؤیت بهتر نشان می دهد.

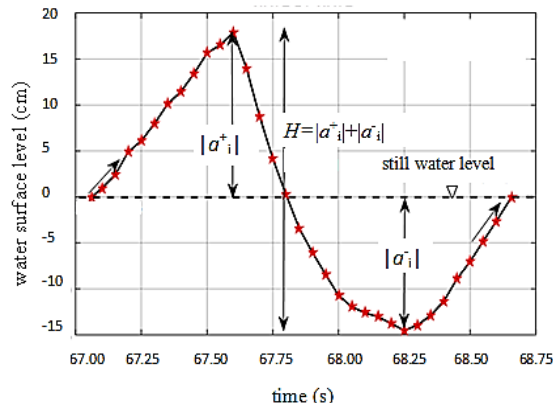


شکل ۱۲- سری زمانی نیروسنج های (۱) و (۲)

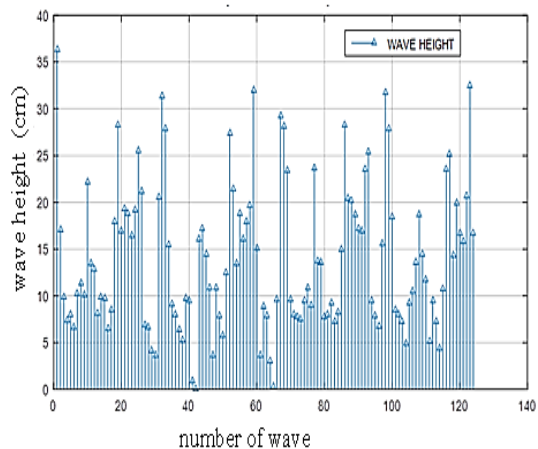
پریود ۱/۸ ثانیه، فرکانس ۰/۵۶ هرتز، بدون موج شکن)، نشان می دهد. طیف موج پیشنهادی و تولید شده تطابق مناسبی را نشان می دهد. برای همین آزمایش، شکل (۱۰)، تک موج استخراج شده از برنامه و شکل (۱۱)، نمودار ارتفاع های موج را نشان می دهد. برای این آزمایش جدول (۲)، نشان دهنده مشخصات امواج به دست آمده را ارائه می دهد.



شکل ۹- طیف جانسواپ و طیف برداشت شده از سطح آب

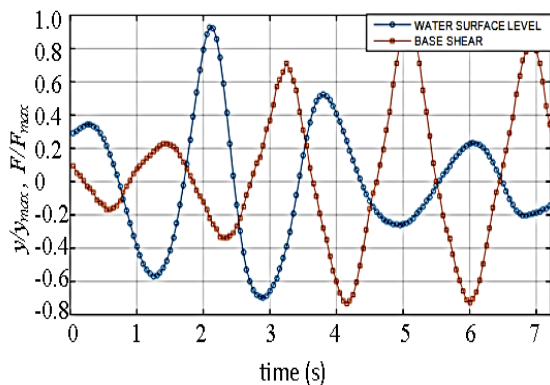


شکل ۱۰- مرتفع ترین موج حاصل شده از سری زمانی سطح آب



شکل ۱۱- ارتفاع های به دست آمده از سطح آب

پایه را به دست آورد. به عبارت بهتر، برای ارتفاع موج F_i ، H_i به دست آمده است. حال اگر ارتفاع امواج و برش‌های پایه، به ترتیب از بزرگ به کوچک مرتب شوند، اولاً می‌توان انتظار داشت که بزرگ‌ترین ارتفاع موج، بزرگ‌ترین برش پایه را نتیجه می‌دهد، ثانیاً از لحاظ فیزیکی می‌توان یک رفتار خطی بین ارتفاع موج و برش پایه را متصور شد، زیرا ارتفاع موج بزرگ‌تر، طبیعتاً برش پایه بیشتری را نتیجه می‌دهد. همین روال در مورد لنگر واژگونی و در کلیه آزمایش‌ها نیز صدق می‌کند.



شکل ۱۴- داده‌های حاصل از سطح آب و برش پایه به صورت بی بعد

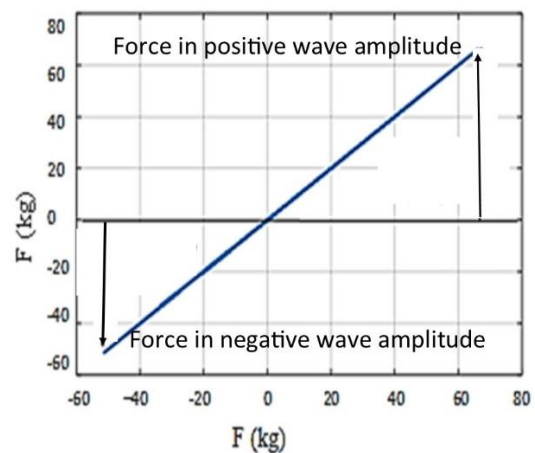
۳-۲- جکت بدون وجود موج گیر شناور

با توجه به تطابق مناسب سری‌های زمانی بعد از شیفت داده-ها، شکل (۱۵-الف)، نمودار برش پایه در حالت بی بعد $(\frac{F}{F_{max}})$ ، در مقابل ارتفاع موج بی بعد $(\frac{H}{H_{max}})$ ، را برای موج ۲۳ سانتی متر نشان می‌دهد و شکل (۱۶-الف) نمودار لنگر واژگونی در حالت بی بعد $(\frac{M}{M_{max}})$ ، در مقابل ارتفاع بی بعد $(\frac{H}{H_{max}})$ ، را نشان می‌دهد. ضریب رگرسیون نزدیک به یک نشان‌گر رفتار خطی مناسب بین ارتفاع موج، برش پایه و لنگر واژگونی می‌باشد. معادله (۳) رابطه خطی بین برش پایه و ارتفاع موج و معادلات (۴) و (۵) حالت بی بعد روابط، معادله (۶) رابطه خطی بین لنگر واژگونی و ارتفاع موج و معادلات (۷) و (۸) حالت بی بعد روابط را در حالت کلی بیان می‌کنند. در این معادلات، a و b ضرایب خط، ρ چگالی آب در شرایط آزمایش، g شتاب ثقل و بقیه پارامترها در جدول (۲) آمده‌اند. در جدول (۴) مقادیر ارتفاع موج، برش پایه، لنگر واژگونی در مقادیر حداکثر، موج مؤثر، میانگین و در جدول (۵) ضرایب خط برازش یافته به همراه ضریب رگرسیون، برای معادلات (۳) تا (۸)، برای حالت بدون موج گیر شناور آمده است (Hughes, ۱۹۹۳).

$$F = a_1 H + b_1 \quad (3)$$

$$\frac{F}{F_{max}} = a_2 \frac{H}{H_{max}} + b_2 \quad (4)$$

هنگامی که سطح آب از سطح آب ساکن بالا می‌رود، نیروی مثبت شده به سمت راست بوده و مقدار نیروی ضربه موج بر سازه جکت را نشان می‌دهد. زمانی که سطح آب از سطح آب ساکن، پایین‌تر حرکت می‌کند سازه جکت به سمت چپ متمایل شده و نیروی مثبت شده مقدار منفی دارد، این نیرو در حقیقت مکش موج روی سازه را نشان می‌دهد. با توجه به تیزی طیف جانسواپ می‌توان انتظار داشت که نیروی حاصل برخواست موج (تاج)، از نیروی فروآب موج (حوضی)، بیشتر گردد. شکل (۱۳)، نشان می‌دهد ماکزیمم نیروی موج در حالت برخواست بیشتر از حالت فروآب موج می‌باشد.



شکل ۱۳- برش پایه در حالت برخواست و فروآب موج

داده‌های حاصل از سطح آب و برش پایه در شکل (۱۴)، برای رویت بهتر، به صورت بی بعد، ترسیم شده‌اند. در این حالت تمامی داده‌ها بین -۱ تا +۱، خواهد شد. ملاحظه می‌گردد که داده‌های برش پایه و تراز سطح آب نسبت به هم تأخیر فاز دارند. این موضوع، به دلیل فاصله ترازسنج سطح آب و نیروسنج (دو متر) می‌باشد. به عبارت بهتر، اول داده‌های تراز سطح آب برداشت گردیده و بعد از طی مسیر ۲ متر داده‌های نیروسنج حاصل شده است. این تأخیر فاز تقریباً در تمام طول سری زمانی تکرار شده است. با توجه به داده‌های سری زمانی اگر به تعداد ۲۰ داده، تراز سطح آب به طرف جلو شیفت داده شود، مطابقت مناسبی بین دو سری زمانی برقرار می‌شود. تعداد ۲۰ داده در محور افقی معادل یک ثانیه خواهد گردید. به عبارت بهتر مدت زمان رسیدن موج از ترازسنج به نیروسنج که دو متر می‌باشد معادل یک ثانیه خواهد گردد. با شیفت داده‌ها می‌توان ارتباط بین تراز سطح آب و در نتیجه ارتفاع موج با برش پایه را به طور دقیق‌تر بررسی نمود، زیرا در این حالت می‌توان داده‌های نظیر به نظیر سطح آب برش

استفاده از موج گیر بدین خاطر است تا با برخورد موج به آن انرژی موج گرفته شده و ارتفاع موج بعد از برخورد به آن کاهش یابد. برداشت داده‌ها با وجود موج گیر فقط برای ارتفاع موج ۳۰ سانتی متر انجام یافت و مقایسه با داده‌های حالت بدون موج گیر برای همین ارتفاع موج صورت گرفته است. در هنگام آزمایش ملاحظه گردید که موج گیر علاوه از استهلاک انرژی به واسطه ضربه موج، اموج منعکس شده از موج گیر نیز در برخورد به اموج تابشی باعث استهلاک انرژی بیشتری شده و این دو عامل باعث تشدید کاهش ارتفاع موج می گردند.

در شکل (۱۵-ب)، نمودار برش پایه و شکل (۱۶-ب)، لنگر واژگونی در مقابل ارتفاع موج در حالت بی بعد، جدول (۴)، ارتفاع موج، برش پایه، لنگرواژگونی در مقادیر حداکثر، موج مؤثر و میانگین، جدول (۵)، ضرایب خط برازش، برای معادلات (۳) تا (۸)، با وجود موج گیر مربعی شکل آمده است. شکل (۱۷)، نمودار میله‌ای برش پایه و لنگرواژگونی، در مقادیر حداکثر، موج مؤثر، میانگین برای حالت بدون و با موج گیر شناور مربعی شکل را نشان می دهد. در این شکل ملاحظه می گردد که وجود موج گیر مربعی - شکل، در هر سه حالت موج حداکثر، موج مؤثر، میانگین، باعث کاهش برش پایه و لنگر واژگونی گردیده است. در جدول (۶)، مقادیر کاهش برش پایه و لنگر واژگونی برحسب درصد با وجود موج گیر شناور مربعی شکل آمده است.

$$\frac{F}{\rho g H_{av}^3} = a_3 \frac{H}{g T_{av}^2} + b_3 \quad (5)$$

$$M = a_1 H + b_1 \quad (6)$$

$$\frac{M}{M_{max}} = a_2 \frac{H}{H_{max}} + b_2 \quad (7)$$

$$\frac{M}{\rho g H_{av}^4} = a_3 \frac{H}{g T_{av}^2} + b_3 \quad (8)$$

۳-۳- جکت با وجود موج گیر شناور مربعی شکل

موج گیر شناور با مقطع مربعی شکل، به سطح مقطع ۳۰×۳۰ سانتی متر و طول ۵ متر از جنس پلی استایرن ساخته شد و در فاصله ۵ متر از جکت و ۳ متر از موج نگار در سطح آب به صورت عمود بر دیواره‌ها، شناور گردید. باتوجه به عرض ۶ متر فلوم، فاصله موج گیر از هر طرف از دیواره فلوم ۵۰ سانتی متر قرار گرفت. برای جلوگیری از حرکت موج گیر در امتداد طولی فلوم، موج گیر با استفاده از ریسمان‌های قطور به صورت محکم به ریل-های روی دیواره‌های کناری بسته شد. در هنگام آزمایش نیز ملاحظه گردید که موج گیر حرکت طولی نداشته و صرفاً همراه با امواج، بالا و پایین می آید. با توجه به وزن مخصوص بسیار کم پلی استایرن، به منظور شناوری نصف موج گیر درون آب و نصف دیگر آن در بیرون از آب وزنه‌هایی به صورت متقارن و وسط از موج گیر آویزان گردید تا این حالت شناوری میسور گردد.

جدول ۳- طول موج حاصل شده از داده‌های آزمایش FN23

L_{max} (m)	L_s (m)	L_{av} (m)	T_{max} (s)	T_s (s)	T_{av} (s)	T_{wm} (s)	معادله طول موج
۸/۷۸	۶/۷۴	۴/۷۲	۲/۳۸	۲/۰۸	۱/۷۴	۱/۸	طول موج
۸/۸۳	۶/۷۵	۴/۷۱	۲/۳۸	۲/۰۸	۱/۷۴	۱/۸	طول موج در آب عمیق

جدول ۴- ارتفاع موج، برش پایه، لنگر واژگونی در مقادیر حداکثر، موج مؤثر، میانگین با و بدون در نظر گرفتن موج گیر شناور

مربعی شکل در جلوی جکت

M (kg.m)			F (kg)			T (s)		H (cm)				آزمایش
M_{max}	M_s	M_{av}	F_{max}	F_s	F_{av}	T_{av}	T_{wm}	H_{max}	H_s	H_{av}	H_{wm}	
			۵۷/۶۸	۳۸/۹۶	۱۹/۳۵	۱/۴۹	۱/۸	۲۹/۲۶	۱۹/۶۳	۱۱/۱۸	۲۳	FN23
			۵۰/۴۹	۳۱/۲۵	۱۷/۷۳	۱/۴۳	۱/۸	۲۵/۰۶	۱۶/۱۴	۱۰/۰۲	۲۳	FS23
۲۱۱/۰۲	۱۳۸/۲۷	۸۸/۳۶				۱/۵۱	۱/۸	۳۱/۷۱	۱۹/۶۹	۱۱/۱۷	۲۳	MN23
۱۷۰/۵۸	۱۱۵/۴۳	۶۸/۳۴				۱/۴۵	۱/۸	۲۵/۹۴	۱۶/۶۷	۱۰/۵۳	۲۳	MS23

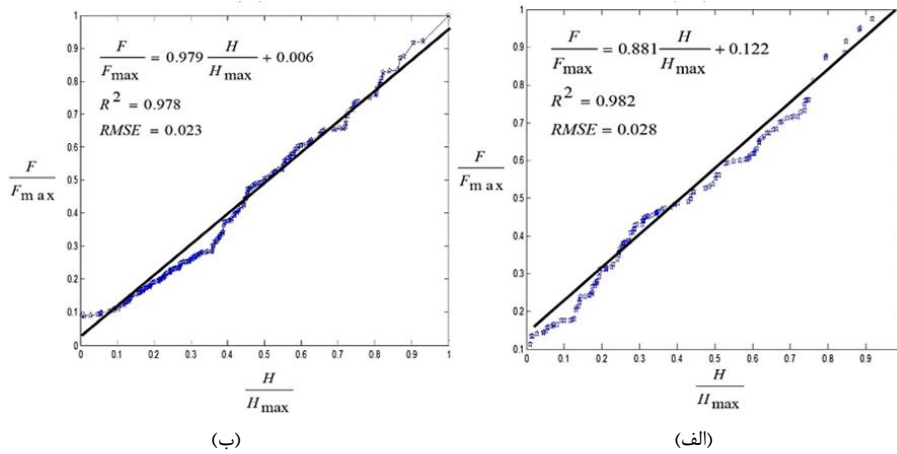
جدول ۵- ضرایب خط برازش، برای معادلات (۲) تا (۷) با و بدون در نظر گرفتن موج گیر شناور مربعی شکل در جلوی جکت

معادله (۳)			معادله (۲)				معادله (۱)				آزمایش	
$RMSE$	R^2	b_3	a_3	$RMSE$	R^2	b_2	a_2	$RMSE$	R^2	b_1		a_1
۱/۱۹	۰/۹۸	۵/۱۴	۲۸/۲۲	۰/۰۲	۰/۹۸	۰/۱۲	۰/۸۸	۱/۶۳	۰/۹۸	۷/۰۳	۱/۷۳	FN23
۱/۰۱	۰/۹۸	-۰/۳۲	۳۷/۶۲	۰/۰۲	۰/۹۷	-۰/۰۱	۰/۹۷	۱/۱۷	۰/۹۸	-۰/۳۴	۱/۹۲	FS23
۴۲/۵۲	۰/۹۸	-۲۴/۱۹	۱۰۶۶/۰۰	۰/۰۳	۰/۹۸	-۰/۰۱	۱/۰۹	۶/۶۱	۰/۹۸	-۳/۷۶	۷/۲۷	MN23
۵۲/۹۳	۰/۹۸	-۱۰/۱۴۰	۱۳۰/۱۰۱	۰/۰۳	۰/۹۷	-۰/۰۷	۱/۱۸	۶/۵۰	۰/۹۷	-۱۲/۴۷	۷/۷۶	MS23

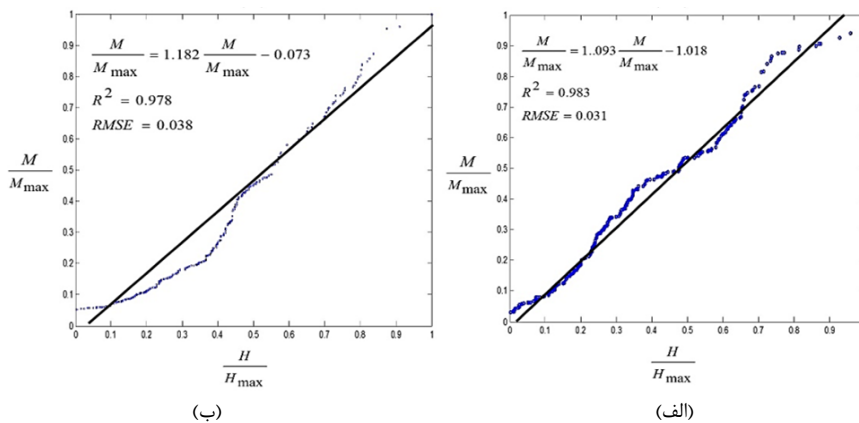
جدول ۶- تأثیر وجود موج گیر شناور مربعی شکل بر کاهش برش پایه و لنگر واژگونی بر حسب درصد

درصد کاهش برش پایه			درصد کاهش لنگر واژگونی		
میانگین	مؤثر	حداکثر	میانگین	مؤثر	حداکثر
۸/۵۷	۲۴/۶۷	۱۴/۲۴	۲۹/۲۹	۱۹/۷۸	۲۳/۷۱

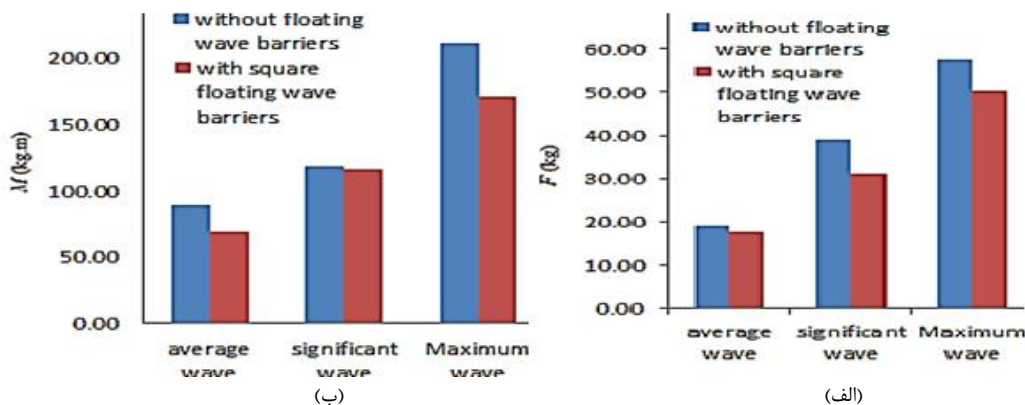
وجود موج گیر شناور مربعی شکل نسبت به نبود آن



شکل ۱۵- نمودار برش پایه در مقابل ارتفاع موج در حالت بی بعد: الف) بدون موج گیر، ب) با وجود موج گیر مربعی شکل



شکل ۱۶- نمودار لنگر واژگونی در مقابل ارتفاع موج در حالت بی بعد: الف) بدون موج گیر، ب) با وجود موج گیر مربعی شکل



شکل ۱۷- الف) برش پایه، ب) لنگر واژگونی، در مقادیر حداکثر، موج مؤثر، میانگین برای حالت بدون موج گیر شناور و با موج گیر شناور مربعی شکل

۴- نتیجه گیری

بررسی برش پایه و لنگر خمشی واژگونی در مواجهه با امواج تصادفی دریا تحت طیف جانسواپ در این تحقیق مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت و برای بررسی کاهش نیروی به وجود آمده از طرف امواج از موج گیر مربعی شکل استفاده گردید. بر اساس آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها در این تحقیق، رابطه بین ارتفاع موج و برش پایه و همچنین لنگر واژگونی خطی و با ضریب رگرسیون نزدیک به یک بود. مقایسه موج گیر مربعی شکل نسبت به نبود آن فقط برای ارتفاع موج ۲۳ سانتی متر صورت گرفت. نتایج مأخوذه نشان می‌دهد، موج گیر در امواج حداکثر، مؤثر و میانگین به ترتیب، ۱۴/۲۴، ۲۴/۶۷ و ۸/۵۷ درصد، کاهش برش پایه و ۲۹/۲۹، ۱۹/۷۸ و ۲۳/۷۱ درصد کاهش لنگر واژگونی را موجب شده است. در تمام آزمایش‌ها نسبت عمق به طول موج بیشتر از نیم بوده و شرایط آب عمیق حاکم است.

۵- قدردانی

از کارکنان و همکاران آزمایشگاه ملّی دریایی شهرداری خلیج فارس به خصوص مدیر گروه تحقیقاتی، مهندس تقی علی اکبری، مسئول آزمایشگاه و مهندس سیدابوالفضل هاشمی و همچنین از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه که در انجام این تحقیق مساعدت فرمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

- آیین‌نامه طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران، ۱۳۸۵، ۹-۳۰۰ (سکوها دریایی).
- Abul-Azm AG, Gesraha MR, "Approximation to the hydrodynamics of floating pontoons under oblique waves", *Ocean Eng.*, 2000, 27, 365-384.
- Aggarwal A, Bihs H, Shirinov S, Myrhaug D, "Estimation of breaking wave properties and their interaction with a jacket structure", *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 91, 1-22.
- Chan ES, Cheong HF, Tan BC, "Laboratory study of plunging wave impacts on vertical cylinders", *Offshore Engineering*, 1995, 1 (2), 94-100.
- Christensen ED, Bingham HB, SkouFriis AP, Larsen AK, Jensen KL, "An experimental and numerical study of floating breakwaters", *Coastal Engineering*, 2018, 137, 43-58.
- Dong GH, Zheng YN, Li YC, Teng B, Guan CT, Lin DF, "Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters", *Ocean Engineering*, 2008, 35, 931-938.
- Gesraha MR, "Analysis of shaped floating breakwater in oblique waves: I. Impervious rigid wave boards", *Applied Ocean Research*, 2006, 28, 327-338.

- Goda Y, Haranka S, Kitahata M, "Study on impulsive breaking wave forces on piles", *Port and Harbor Technology Research Institute*, 1966, 6 (5), 1-30.
- Hildebrandt A, "Hydrodynamic of breaking waves on offshore wind turbine structures (PhD Thesis, Franziskus- Institute for Hydraulics)", *Water ways, and coastal Engineering*, Hanover, 2013.
- Hughes S, "Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering", *World Scientific*, 1993.
- Morison JR, O'Brien MP, Johnson JW, Schaaf SA, "The forces exerted by surface waves on piles", *Journal of Petroleum Technology, Petroleum Transactions, AIME*, 1950, 189, 149-154.
- Rahman MA, Mizutani N, Kawasaki K, "Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater", *Coast Engineering*, 2006, 53, 799-815.
- Sannasiraj SA, Sundar V, Sundaravadivelu R, "Mooring forces and motion responses of pontoon- type floating breakwaters", *Ocean Engineering*, 1998, 25, 27-48.
- Sawarangi T, Nochino M, "Impact Forces on nearly breaking waves on Vertical circular cylinder", *Coastal Engineering*, 1984, 27, 249-263.
- Sorensen RM, "Basic Wave Mechanic for Coastal and Ocean Engineers", *John Wiley*, New York, 1997.
- Sruthi C, Sriram V, "Wave impact load on jacket structure in intermediate water depth", *Ocean Engineering*, 2017, 140, 183-194.
- Von Karman T, "The impact on seaplane floats during landing. *Natl*", *Comm. Aeronaut*, 1929, <http://www.nimala.ir>

EXTENDED ABSTRACT

Effects of Floating Wave Barriers with Square Cross Sections on the Wave-induced Forces Exerted to an Offshore Jacket Structure

Arash Dalili Osgouei ^a, Ramin Vafaei Poursorkhabi ^{b*}, Ahmad Maleki ^a, Hamid Ahmadi ^c

^a Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

^b Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^c Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 01 April 2019; Accepted: 14 January 2020

Keywords:

Jacket structure, Random waves, Floating wave barrier, NIMALA flume, Base shear, Overturning moment.

1. Introduction

The jacket-type platform is the most common offshore structure employed for oil and gas production from the reservoirs below the seabed. It consists of three main parts: superstructure or topside, substructure or jacket, and the foundation or piles. The construction of floating breakwaters and wave barriers is one of the commonly used methods for the protection of harbors and coastal structures. However, their application for the protection of offshore structures has not been extensively studied. The present paper investigates the effects of a floating wave barrier installed in front of an offshore jacket structure on the wave height, wave-induced forces, and consequently the jacket's base shear and overturning moment.

Abul-Azm and Gesraha (2000) studied the hydrodynamics of floating pontoons under oblique waves. Gesraha (2006) analyzed the shaped floating breakwater in oblique waves. Rahman et al. (2006) presented numerical modeling for the estimation of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwaters. Christensen et al. (2018) conducted a set of experimental and numerical studies on floating breakwaters. Dong et al. (2008) carried out a number of experiments on the wave transmission coefficients of floating breakwaters.

In the present research, a jacket model with a height of 4.55m was fabricated and tested in the wave flume of the NIMALA marine laboratory. The wave flume was 402m long. The jacket was tested at the water depth of 4m subjected to JONSWAP waves with the height of 20cm, 23cm, and 28cm. The mechanism of wave energy dissipation due to hitting a wave barrier is mainly a combination of wave diffraction and wave reflection. A square cross-section was selected for the wave barrier. Results showed that a floating wave barrier can effectively reduce the base shear and overturning moment in an offshore jacket structure.

2. Details of experimental study

2.1. Wave-maker flume

Experiments of the present research were conducted in the NIMALA marine laboratory. Its wave flume, which is the biggest one in Iran, is 402m long, 6m wide, and 4.5m high (Fig.1).

2.2. Models of jacket structure and floating wave barrier

The jacket structure studied in the present research was a scaled model of C13 jacket installed in the South Pars gas field of the Persian Gulf. The height of the actual jacket is 80m operating at the water depth of 72m.

* Corresponding Author

E-mail addresses: arash_dalili@yahoo.com (Arash Dalili Osgouei), vafaei@iaut.ac.ir (Ramin Vafaei Poursorkhabi), maleki_civil@yahoo.com (Ahmad Maleki), h-ahmadi@tabrizu.ac.ir (Hamid Ahmadi).

With a scale factor of 1 to 18, the model of the jacket was 4.4m high installed in the flume at the water depth of 4m. The distance between the jacket and the wave maker was 70m; while its distance from the flume end was 332m. Fig. 2 shows the isometric view of the jacket structure. As an idea to reduce the wave energy, a floating wave barrier with a square cross-section was installed in front of the jacket structure. The material used for the fabrication of wave barriers was polystyrene. Since its specific weight is quite low, almost 98% of the wave barrier's cross-section was above the water surface level when it was allowed to be floated freely. A set of weights was attached to each wave barrier in order to ballast it to a position in which 50% of its cross-section lies beneath the water surface level, i.e., to set its draft equal to half of its total height. The wave barriers were 5m long having a 30cmX30cm cross-section. There was a 50cm gap between each barrier end and the adjacent flume wall. The wave barrier was located at distances of 3m and 5m from the wave probes and the jacket structure, respectively. Fig. 3 illustrates the longitudinal section of the wave flume along with the jacket structure and the equipment.



Fig. 1. Wave flume and manned chariot of NIMALA marine laboratory

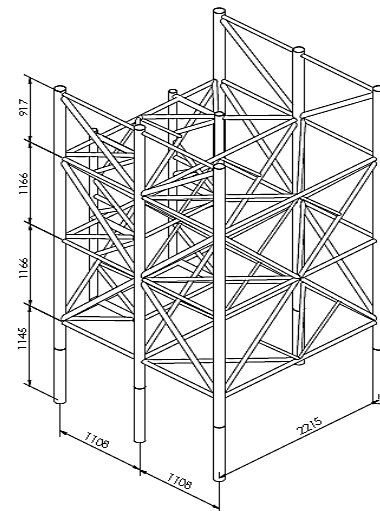


Fig. 2. Isometric view of the jacket model (unit: mm)

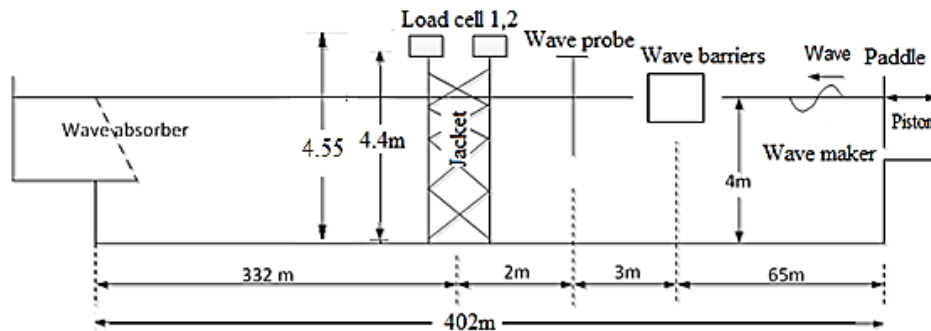


Fig. 3. Longitudinal section of the wave flume along with the jacket, wave barrier, and the equipment

3. Results and discussion

Recorded data were used to develop a set of equations expressing the relationships between the wave height (H) and base shear (F)/overturning moment (M) in the forms of Eqs. (1)-(6). The unknown coefficients calculated based on the regression analysis are given in Table 1. Fig. 4 depicts the amount of reductions in the base shear and overturning moment due to the presence of a floating wave barrier with a square cross-section. It can be seen that, when the significant wave height is considered, the square-cross-section wave barrier has led to 24.67% and 19.78% reduction in the jacket's base shear and overturning moment, respectively.

$$F = a_1H + b_1 \tag{1}$$

$$F/F_{\max} = a_2(H/H_{\max}) + b_2 \tag{2}$$

$$F/(\rho g H_{av}^3) = a_3(H/gT_{av}^2) + b_3 \tag{3}$$

$$M = a'_1 H + b'_1 \tag{4}$$

$$M/M_{max} = a'_2(H/H_{max}) + b'_2 \tag{5}$$

$$M/(\rho g H_{av}^4) = a'_3(H/gT_{av}^2) + b'_3 \tag{6}$$

Table 1. The unknown coefficients of Eqs. (1)-(6) calculated based on the regression analysis of the data extracted from the experiments conducted on the jacket with a wave barrier having a square cross section

Test ID	Eq. (1)				Eq. (2)				Eq. (3)			
	a_1	b_1	R^2	RMSE	a_2	b_2	R^2	RMSE	a_3	b_3	R^2	RMSE
FN23	1.73	7.03	0.98	1.63	0.88	0.12	0.98	0.02	28.22	5.14	0.98	1.19
FS23	1.92	-0.34	0.98	1.17	0.97	-0.01	0.97	0.02	37.62	-0.32	0.98	1.01
Test ID	Eq. (4)				Eq. (5)				Eq. (6)			
	a'_1	b'_1	R^2	RMSE	a'_2	b'_2	R^2	RMSE	a'_3	b'_3	R^2	RMSE
MN23	7.27	-3.76	0.98	6.61	1.09	-0.01	0.98	0.03	1066.00	-24.19	0.98	42.52
MS23	7.76	-12.47	0.97	6.50	1.18	-0.07	0.97	0.03	1301.01	-101.40	0.98	52.93

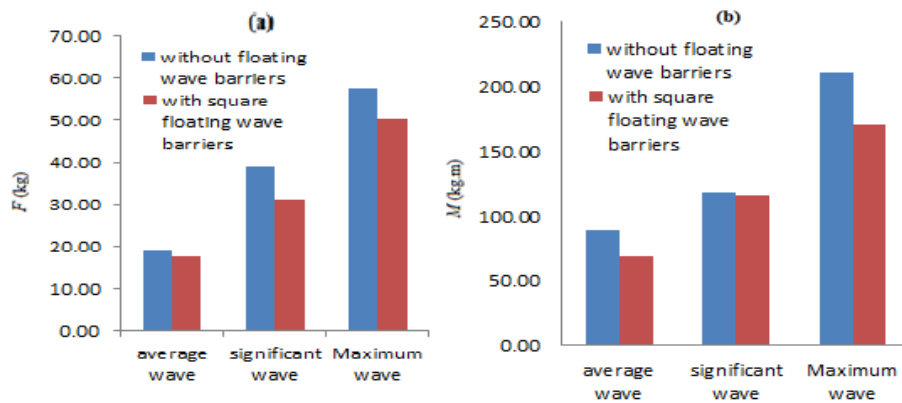


Fig. 4. The reduction of the: a) base shear, b) overturning moment due to the presence of a square-cross-section wave barrier

4. Conclusions

The effects of a floating wave barrier installed in front of an offshore jacket structure on the wave height and jacket’s base shear and overturning moment were experimentally investigated. A jacket model with a height of 4.55m was fabricated and tested in the wave flume of the NIMALA marine laboratory. A square cross-section was selected for the wave barrier. Results showed that the average decrease in the jacket’s base shear due to the presence of a floating wave barrier with a square-cross section was 24.67%. The use of the wave barriers with a square cross-section also resulted in 19.78% decrease in the jacket’s overturning moment. Hence, it can be concluded that a wave barrier can significantly reduce the base shear and overturning moment in an offshore jacket structure.

5. References

Abul-Azm AG, Gesraha MR, “Approximation to the hydrodynamics of floating pontoons under oblique waves”, *Ocean Engineering*, 2000, 27, 365-84.

Christensen ED, Bingham HB, Skou Friis AP, Larsen AK, Jensen KL, “An experimental and numerical study of floating breakwaters”, *Coastal Engineering*, 2018, 137, 43-58.

Dong GH, Zheng YN, Li YC, Teng B, Guan CT, Lin DF, “Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters”, *Ocean Engineering*, 2008, 35, 931-38.

Gesraha MR, “Analysis of shaped floating breakwater in oblique waves: I. Impervious rigid wave boards”, *Applied Ocean Research*, 2006, 28, 327-38.

Rahman MA, Mizutani N, Kawasaki K, "Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater", *Coastal Engineering*, 2006, 53, 799-815.