

بررسی آزمایشگاهی تغییرات ارتفاع موج بر برش پایه و لنگر واژگونی جکت در مواجهه با امواج تصادفی در آب‌های عمیق دریا

آرش دلیلی اسکویی^۱، رامین وفايي پورسرخايبی^{۲*}، احمد ملکی^۳، حمید احمدی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران، پست الکترونیکی: arash_dalili@yahoo.com

۲- استادیار گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. پست الکترونیکی: raminvafaei@yahoo.com

۳- استادیار گروه عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران. پست الکترونیکی: maleki_civil@yahoo.com

۴- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، ایران. h-ahmadi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۸

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۹

چکیده

هدف از این تحقیق، به دست آوردن نیروی برش پایه و لنگر واژگونی جکت دریایی، در سه ارتفاع موج ۲۰، ۲۳ و ۲۸ سانتی‌متر می‌باشد. در این راستا، مدل سازه‌ی جکت به ارتفاع ۴/۵۵ متر، ساخته شده و در فلوم آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس (NIMALA)، به طول ۴۰۲ متر و عمق ساکن آب ۴ متر، در معرض امواج تصادفی دریا، تحت طیف جانسوپ قرار گرفت. بر مبنای نتایج به دست آمده، در تمام آزمایش‌ها شرایط آب عمیق حاکم است. با در نظر گرفتن موج موثر، به ازای کاهش ارتفاع موج از ۲۸ به ۲۳ سانتی‌متر، ۱۴/۱۷ درصد، ۲۳ به ۲۰ سانتی‌متر، ۲۰ به ۲۳ سانتی‌متر، ۵۲/۹۰ درصد، ۲۸ به ۲۰ سانتی‌متر، ۷۴/۵۷ درصد کاهش برش پایه و به ازای کاهش ارتفاع موج از ۲۸ به ۲۳ سانتی‌متر، ۳۳/۷۹ درصد، ۲۳ به ۲۰ سانتی‌متر، ۱۷/۰۶ درصد، ۲۸ به ۲۰ سانتی‌متر، ۵۶/۶۳ درصد، کاهش لنگر واژگونی وجود دارد.

کلمات کلیدی: جکت، امواج تصادفی، ارتفاع موج، برش پایه، لنگر واژگونی.

۱. مقدمه

حرکت شناورها، انفجار ایجاد کردند. برش پایه و لنگر واژگونی، ایجاد شده در نتیجه‌ی بارگذاری امواج روی سازه، یکی از مسایل مهم در پایداری جکت‌ها می‌باشند. با توجه به رفتار پیچیده‌ی 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 رفتار دقیق، بکند. در انجام مطالعات آزمایشگاهی، هر چقدر ابعاد سازه‌ی جکت و پارامترهای هیدرولیکی نظیر عمق آب، ارتفاع موج و طول فلوم

جکت‌های دریایی، سازه‌هایی هستند که درون دریاها و اقیانوس‌ها، احداث می‌گردند و از آن‌ها برای مقاصد اقتصادی و نظامی، استفاده 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 ضربه‌ایموج می‌باشند که ممکن است موجب ناپایداری سازه‌ی جکت شود. امواج می‌توانند در نتیجه‌ی طوفان،

بیشتر باشد، مقیاس بزرگ‌تر شده و مقادیر برداشت شده 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 تعیین‌کننده‌ی طراحی در سازه‌ی جکت در نظر گرفته می‌شود. بکارگیری 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-موسکویچ، برتشنايدر، جانسواپ و غیره استفاده می‌گردد. با توجه به انرژی زیاد موج طیف جانسواپ، در تحقیق حاضر، از این طیف برای تولید موج استفاده گردیده است. با کاهش ارتفاع موج بدلیل کاهش انرژی موج، مقادیر نیروهای داخلی اعضای جکت، برش پایه و لنگر واژگونی کاهش می‌یابد. در تحقیق حاضر، سازه‌ی جکت به ارتفاع ۴/۴ متر در فلوم آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس، (NIMALA) در مواجهه با امواج تصادفی دریا، تحت طیف موج جانسواپ با ارتفاع‌های مختلف قرار گرفته است. برش پایه و لنگر واژگونی با تغییرات سطح آب، اندازه‌گیری شده و رابطه‌ی بین ارتفاع موج، برش پایه و لنگر واژگونی به دست آمد. مطالعات انجام یافته در ارتباط با نیروی موج بر روی سازه در سه بخش آب‌های عمیق، نیمه عمق و آب‌های کم عمق، انجام یافته است (Sruthi and Sriram, 2017). معادله‌ی مورسیون (Morison, et al., 1950)، معادله‌ی بار کل وارد شده از طرف امواج به سازه جکت را بیان می‌کند. این معادله تخمین مناسبی از مقدار نیروی کل را ارائه می‌دهد.

با روابط اندازه‌گیری شده توسط گودا، مقایسه نمودند (Sawaragi and Nochino, 1984). چان و همکاران (Chan, et al., 1995)، 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 با استفاده از انتگرال دوهمال را انجام داد. هیلدبرانت (Hildebrandt, 2013)، 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 همچنین مقایسه تراز سطح آب و فشار روی سازه بین مطالعه‌ی آزمایشگاهی و مدل عددی صورت پذیرفت. سروتی و سریرام (Sruthi and Sriram, 2017)، مطالعات آزمایشگاهی روی جکت‌های دریایی در آب نیمه عمیق، انجام داده و مقادیر نیرو را با تراز سطح آب اندازه‌گیری نمودند. بر مبنای نتایج اندازه‌گیری شده توسط ایشان مقدار ضریب اسلمینگ بین ۲/۲ تا ۴/۶ به دست آمد. دلایلی و وفایی پور تعیین طیف غالب موج در طراحی جکت‌ها از نظر برش پایه، را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند؛ بر مبنای تحقیقات ایشان طیف موج جانسواپ بدلیل داشتن انرژی طیفی زیاد برش پایه‌ی بیشتری را دارد (دلایلی و وفایی پور، ۱۳۹۷). شرایط بارگذاری، بارهای محیطی، طیف موج و ضوابط مربوط به سکوها دریایی منطبق با شرایط اقلیمی ایران، در آیین‌نامه طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران، بطور مبسوط آمده است (آیین‌نامه طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران، ۱۳۸۵).

$$F = F_D + F_I + F_S \quad \text{رابطه ۱}$$

در این معادله، F_D ، نیروی درگ، که بستگی به تابع غیرخطی سرعت، F_I ، نیروی اینرسی، که تابع خطی شتاب، F_S ، نیروی کوبشی می‌باشد که بستگی به سرعت برخورد موج به سازه دارد. برای به دست آوردن نیروی وارد بر سازه، گودا و همکاران (Goda, et al., 1966)، از مدل ریاضی مسأله‌ی آب ورودی استفاده نمود. نیروی امواج شکسته روی مقاطع مدور با قطر کم توسط وان کارمان (Von Karman, 1929)، انجام پذیرفت. برای درک بهتر ماهیت دینامیک موج شکسته روی سازه، در حالت‌های مختلف شکست موج، ساوارچی و ناچینو، تحقیقات جامعی را روی اندرکنش سازه‌ی جکت و امواج، انجام و نتایج را

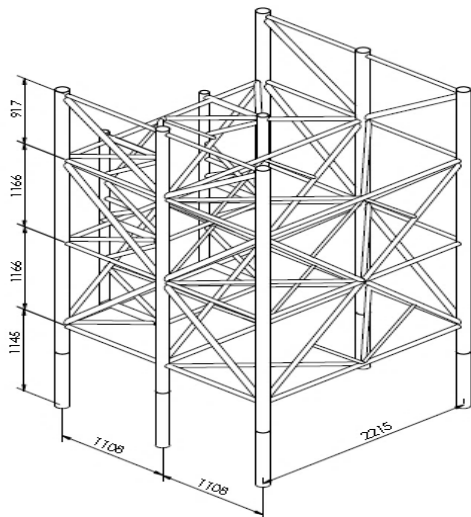
۲. انجام آزمایش‌ها

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 می‌باشد 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

۲-۲ مدل سازه‌ی جکت

سازه‌ی جکت مورد استفاده شده در آزمایش، از روی جکت ساخته شده در آب‌های خلیج فارس 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. سازه‌ی جکت در فاصله‌ی ۷۰ متر از موج‌ساز و ۳۳۲ متر از انتهای فلوم و موج‌نگار در فاصله‌ی ۲ متر بین سازه‌ی جکت و موج‌ساز قرار دارد. شکل (۲)، پلان ایزومتریک سازه‌ی جکت را نشان می‌دهد. شکل (۳)، پلان طولی فلوم آزمایشگاه و جکت، دستگاه‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. شکل (۴)، سازه‌ی جکت را در خشکی و در معرض امواج تصادفی نشان می‌دهد.

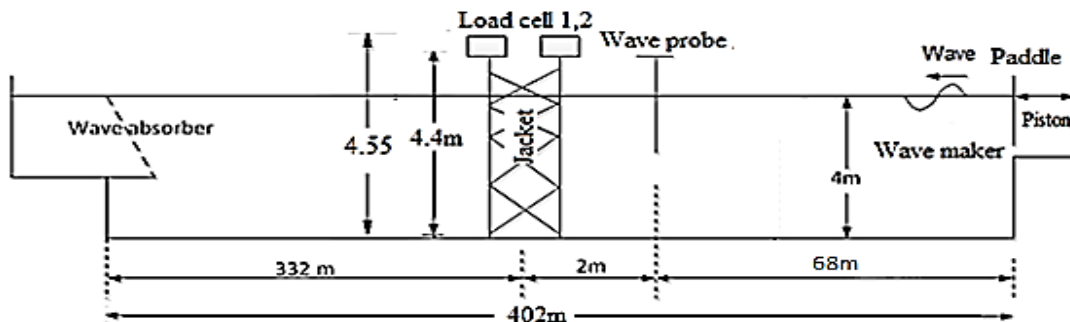


شکل ۲: شکل ایزومتریک سازه جکت بکار رفته در تحقیق حاضر

می‌باشد. نوع پدل موج‌ساز از نوع پیستونی بوده و مولد موج قادر به تولید امواج منظم و تصادفی تحت طیف‌های برتشنايدر، پیرسون- موسکوویچ و جانسوآپ بوده و حداکثر ارتفاع موج تولیدی ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. موج‌نگار، از سنسورهای مقاومتی بوده و قابلیت اندازه‌گیری تغییرات 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 اریابه‌ای به ابعاد ۷×۷/۶ متر، با دامنه‌ی 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 مسئله‌ی بازتاب امواج منتفی باشد. شکل (۱)، نمایی از فلوم و آزمایشگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایی کلی از فلوم از آزمایشگاه NIMALA



شکل ۳: مقطع طولی فلوم در آزمایشگاه NIMALA

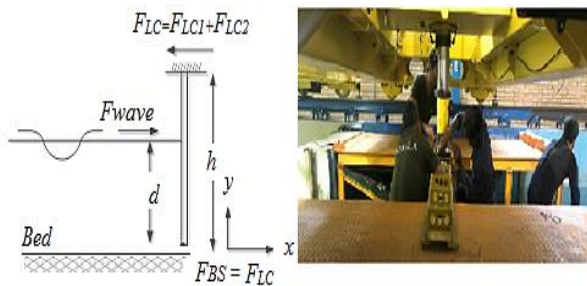


شکل ۴: مدل پیکربندی جکت، (a): خشکی، (b): در مواجهه با امواج تصادفی

۳-۲ برداشت و تفسیر داده‌ها

با توجه به نیروی موج، ظرفیت یک عدد نیروسنج، برای ثبت نیروی موج کافی نبود و امکان افزایش نیروی موج، مخصوصاً در حالت های حداکثری بیش از ۴۰۰ نیوتن وجود داشت، لذا از ۲ نیروسنج استفاده گردیده است. مسئله مهم در استفاده از این نیروسنج ها، تطابق مناسب ۲ 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. بدلیل کنترل بهتر و دسترسی در حین انجام آزمایش‌های متوالی، نیروسنج ها بجای آن که در کف سازه نصب شوند، در رأس سازه نصب شده‌اند. شکل (۶)، مکانیسم تعبیه‌ی این دو نیروسنج را نشان می‌دهند.

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. نیروسنج ها ساخت شرکت *WONBANGFORCETECH* با ظرفیت ± 400 نیوتن در جهت طولی و ± 50 نیوتن در جهت عرضی می‌باشد، انجام گرفته است. شکل (۵) تصویر این نیروسنج‌ها را نشان می‌دهد.

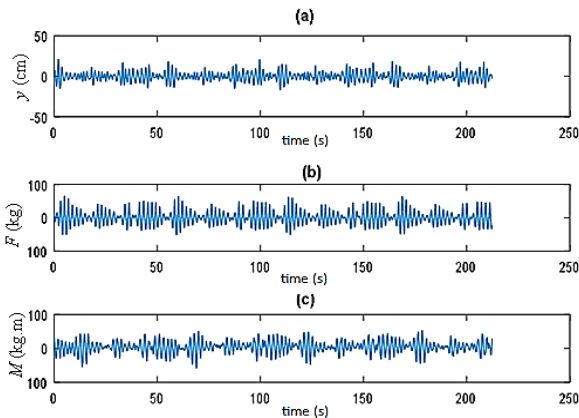


شکل ۶: مکانیسم برداشت برش پایه توسط نیروسنج‌ها

همان طوری که در شکل ملاحظه می‌گردد، نصب نیروسنج در رأس سازه‌ی جکت از لحاظ مقدار برش پایه با نصب آن در پایین سازه تفاوتی نخواهد کرد. برای برداشت لنگر واژگونی، در پایین



شکل ۵: نیروسنج های بکار رفته در تحقیق حاضر



شکل ۸: سری زمانی برداشت شده، (a): تراز سطح آب، (b): برش پایه، (c): لنگر واژگونی

این شکل برای یک سری برداشت انجام یافته است و جدول (۱)، کلیه آزمایشات صورت گرفته، طیف موج، جانسواپ، پارامتر γ در طیف، $3/3$ ، عمق آب، 400 سانتی‌متر، گام زمانی برداشت شده 0.05 ثانیه و تعداد برداشت‌های انجام یافته در هر ثانیه 20 داده بوده است. مکان قرارگیری سازه، ترازسنج، پدل موج مطابق شکل (۳) و سازه‌ی جکت مطابق شکل (۲) می‌باشد. در جدول (۱)، به ازای ارتفاع موج‌های ورودی، 20 ، 23 و 28 سانتی‌متر، حالت موج ناشکنا و به ازای ارتفاع موج 30 سانتی‌متر، موج در حالت شکسته می‌باشد. در این جدول نام مدل به طور اختصار بیان شده است. منظور از نام F20 به معنای آزمایش برش پایه (F) با ارتفاع موج 20 سانتی‌متر و پرپود $1/8$ ثانیه، M20، آزمایش لنگر واژگونی (M) با ارتفاع موج 20 سانتی‌متر و پرپود $1/8$ می‌باشد.

جدول ۱: کل آزمایشات انجام یافته

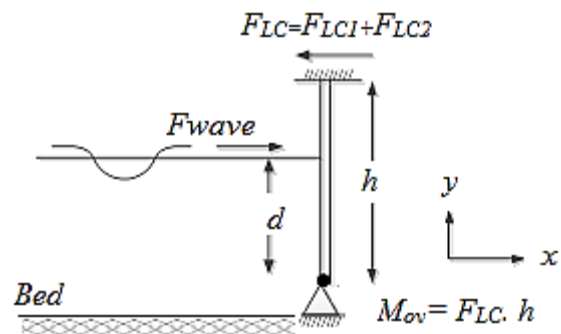
ارتفاع موج ورودی (سانتی‌متر)	برش پایه				لنگر واژگونی			
	۲۰	۲۳	۲۸	۳۰	۲۰	۲۳	۲۸	۳۰
حالت موج	ناشکنا	ناشکنا	ناشکنا	شکسته	ناشکنا	ناشکنا	ناشکنا	شکسته
نام آزمایش	F20	F23	F28	F30	M20	M23	M28	M30

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 می‌باشد. یکی از این تقاطع‌ها در حالت خیزآب و دیگری فروآب می‌باشند. فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی تقاطع خیزآب و سطح

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 بود. در شکل‌های (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 می‌باشد.

$$\sum M_o = F_{wave} \cdot d - F_{LC} \times h = 0, M_{ov} = F_{wave} \cdot d = F_{LC} \cdot h$$

رابطه ۳



شکل ۷: مکانیسم اندازه‌گیری لنگر واژگونی

مقدار حاصلضرب d در F_{wave} همان لنگر واژگونی جکت (M_{ov}) است. بنابراین در این حالت مقادیر اندازه‌گیری شده از نیروسنج‌ها (که با حالت اندازه‌گیری برش پایه متفاوت است)، بایستی در مجموع ارتفاع کل جکت ($4/40$ متر) و فاصله نیروسنج تا راس جکت (15 سانتی‌متر)، یعنی $4/55$ ضرب شوند تا لنگر واژگونی حاصل گردد.

شکل (۸)، سری زمانی برداشت شده‌ی تراز سطح آب (a)، برش پایه (b) و لنگر واژگونی (c)، را نشان می‌دهد.

۳. نتایج و بحث

با استفاده از سری زمانی برداشت شده، طی آزمایش‌های انجام یافته، ارتفاع موج برای هر تک موج از سری امواج با استفاده از

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 موثر
۱۴/۰۳	H_{av} (cm)	ارتفاع موج میانگین
۲/۳۷	T_{max} (s)	پریود موج حداکثر
۱/۶۸	T_{av} (s)	پریود موج موثر
۲/۰۷	T_S (s)	پریود موج میانگین

طول موج در کلیه حالات (آب عمیق، نیمه عمیق و کم عمق) از رابطه و $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$ برای آب عمیق، از رابطه $L = \frac{gT^2}{2\pi}$ ، به دست می‌آید، اگر با توجه به داده‌های به دست آمده طول موج از این دو رابطه با هم 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) نشان می‌دهد که شرایط آب عمیق در حالت‌های موج متوسط ($\frac{d}{L_{av}} = 0.85 > \frac{1}{2}$)، موج موثر ($\frac{d}{L_S} = 0.85 > \frac{1}{2}$) 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

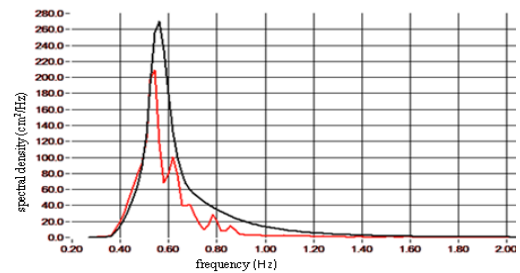
نزدیک به آب عمیق می‌باشد و می‌توان شرایط آب عمیق را متصور شد. این حالت برای تمامی آزمایشات بررسی گردیده و شرایط آب عمیق در تمامی آن‌ها برقرار می‌باشد.

جدول ۳: طول موج حاصل شده از داده‌های آزمایش F28

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

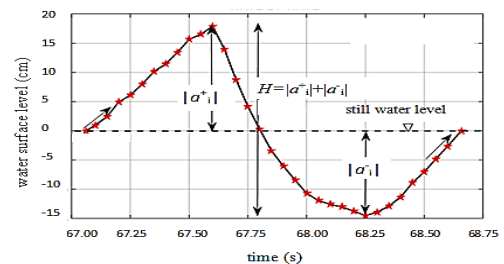
داده‌های برداشت شده توسط دو نیروسنج تأخیر فاز نداشته و انطباق خوبی با هم دارند، لذا جمع آوری داده‌های برداشت شده از دو دستگاه، برش پایه را نتیجه می‌دهد. شکل (۱۲)، داده سری زمانی دو دستگاه نیروسنج را در یک بازه‌ی کوتاه زمانی برای رویت بهتر نشان می‌دهد.

ساکن آب یک موج را تشکیل می‌دهد. بدین منظور برنامه‌ای در نرم افزار MATLAB تهیه شده که از سری زمانی سطح آب امواج را یک به یک تفکیک کرده و ارتفاع و پریود تک تک امواج، را ارائه می‌دهد. از روی ارتفاع و پریودهای به دست آمده، ارتفاع ماکزیمم، ارتفاع موج موثر، ارتفاع موج میانگین، پریود ماکزیمم، پریود موج موثر، پریود میانگین، طول موج و فرکانس حاصل می‌گردد. شکل (۹)، طیف جانسواپ و طیف برداشت شده از سطح آب را برای آزمایش برش پایه (که در آن ارتفاع ۲۸ سانتی‌متر، پریود ۱/۸ ثانیه، فرکانس ۰/۵۶ هرتز، بدون موج شکن)، نشان می‌دهد.

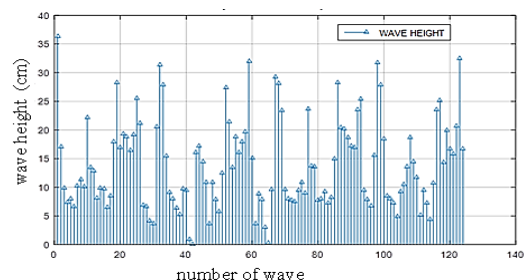


شکل ۹: طیف جانسواپ و طیف برداشت شده از سطح آب

طیف موج پیشنهادی و تولید شده تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. برای همین آزمایش، شکل (۱۰)، تک موج استخراج شده از برنامه و شکل (۱۱)، نمودار ارتفاع‌های موج را نشان می‌دهد. برای این آزمایش جدول (۲)، نشان دهنده‌ی مشخصات امواج به دست آمده را ارائه می‌دهد.

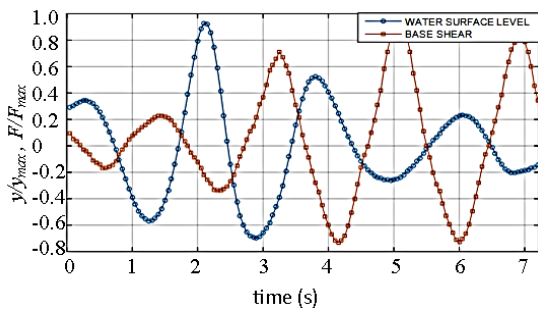


شکل ۱۰: مرتفع‌ترین موج حاصل شده از سری زمانی سطح آب



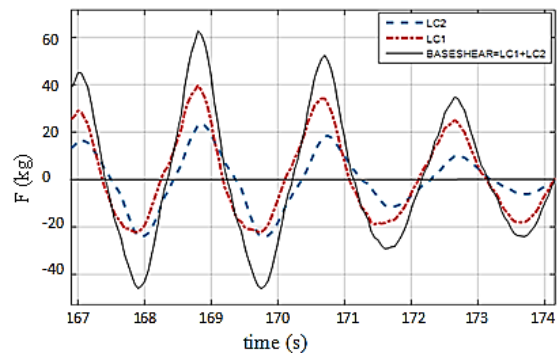
شکل ۱۱: ارتفاع‌های به دست آمده از سطح آب

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 ۱ ثانیه خواهد گردید. به عبارت بهتر مدت زمان رسیدن موج از ترازسنج به نیروسنج که ۲ متر می‌باشد معادل ۱ 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 پایه را به دست آورد. به عبارت بهتر، برای ارتفاع موج H_i ، F_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 پایه‌ی بیشتری را نتیجه می‌دهد. همین روال در مورد لنگر واژگونی و در کلیه‌ی آزمایش‌ها نیز صدق می‌کند.



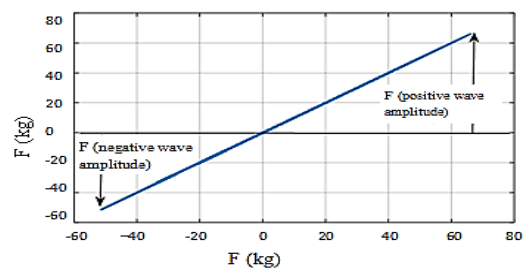
شکل ۱۴: داده‌های حاصل از سطح آب و برش پایه به صورت بی‌بعد

با توجه به تطابق مناسب سری‌های زمانی بعد از شیفت داده‌ها، شکل (۱۵) a و b و c به ترتیب نمودار برش پایه در حالت بی‌بعد ($\frac{F}{F_{max}}$) در مقابل ارتفاع موج بی‌بعد ($\frac{H}{H_{max}}$) را به ترتیب برای امواج ۲۰، ۲۳، ۲۸ سانتی‌متر نشان می‌دهد. برای همین امواج، شکل (۱۶) a و b و c به ترتیب نمودار لنگر واژگونی در حالت بی‌بعد ($\frac{M}{M_{max}}$) در مقابل ارتفاع بی‌بعد ($\frac{H}{H_{max}}$) را نشان می‌دهد. ضریب رگرسیون نزدیک به ۱، نشان‌گر رفتار خطی مناسب بین ارتفاع موج، برش پایه و لنگر واژگونی می‌باشد.



شکل ۱۲: سری زمانی نیروسنج‌های (۱) و (۲)

هنگامی که سطح آب از سطح آب ساکن بالا می‌رود، نیروی مثبت شده به سمت راست بوده و مقدار نیروی ضربه موج بر سازه‌ی جکت را نشان می‌دهد. زمانی که سطح آب از سطح آب ساکن، پایین‌تر حرکت می‌کند سازه‌ی 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 (حوض)، بیشتر گردد. شکل (۱۳)، نشان می‌دهد ماکزیمم نیروی موج در حالت برخواست موج، ۶۶/۲۹ کیلوگرم و ماکزیمم در حالت فروآب موج (۵۱/۶۱- کیلوگرم) می‌باشد. به عبارت بهتر، نیروی موج در حالت برخورد، ۲۲/۱۵٪ از نیروی مکشی موج در حالت حوض بیشتر است. در صورتی که میانگین تمام امواج در یک سری زمانی موج در نظر گرفته شود، این مقدار ۹/۵۴٪ خواهد شد.



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 بی‌بعد، 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 (۲ متر) می‌باشد. به عبارت بهتر، اول داده‌های تراز سطح آب برداشت

مطابق جدول (۶)، با در نظر گرفتن موج موثر، به ازای کاهش ارتفاع موج از ۲۸ به ۲۳ سانتی متر، ۱۴/۱۷ درصد، ۲۳ به ۲۰ سانتی متر، ۵۲/۹۰ درصد، ۲۸ به ۲۰ سانتی متر، ۷۴/۵۷ درصد کاهش برش پایه و به ازای کاهش ارتفاع موج از ۲۸ به ۲۳ سانتی متر، ۳۳/۷۹ درصد، ۲۳ به ۲۰ سانتی متر، ۱۷/۰۶ درصد، ۲۸ به ۲۰ سانتی متر ۵۶/۶۳ درصد، کاهش لنگر واژگونی وجود دارد و برای حالت‌های میانگین و حداکثر درصد کاهش‌ها، در جدول (۶)، آمده‌اند.

$$F = a_1 H + b_1$$

رابطه ۳

$$\frac{F}{F_{\max}} = a_2 \frac{H}{H_{\max}} + b_2$$

رابطه ۴

$$\frac{F}{\rho \cdot g \cdot H_{av}^3} = a_3 \frac{H}{g \cdot T_{av}^2} + b_3$$

رابطه ۵

$$M = a'_1 H + b'_2$$

رابطه ۶

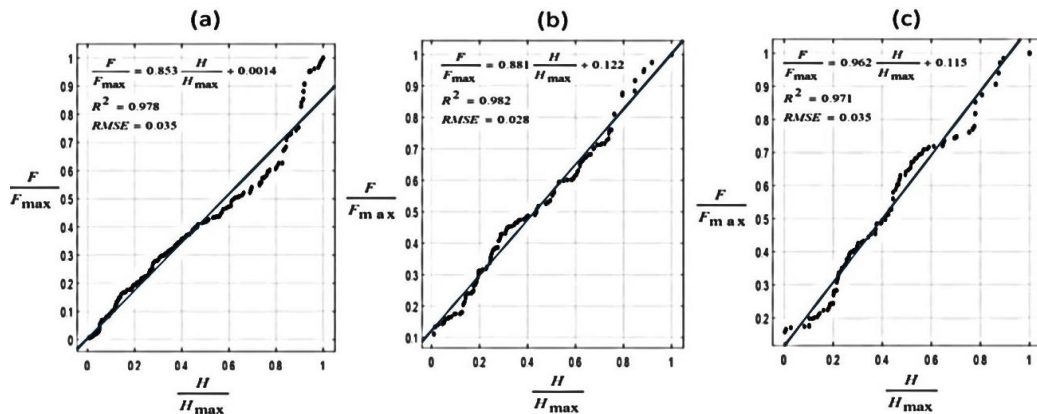
$$\frac{M}{M_{\max}} = a'_2 \frac{H}{H_{\max}} + b'_2$$

رابطه ۷

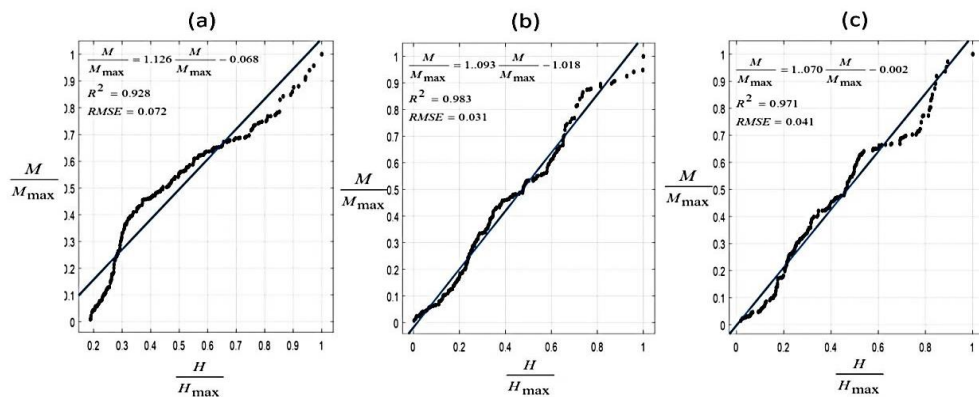
$$\frac{M}{\rho \cdot g \cdot H_{av}^4} = a'_3 \frac{H}{g \cdot T_{av}^2} + b'_3$$

رابطه ۸

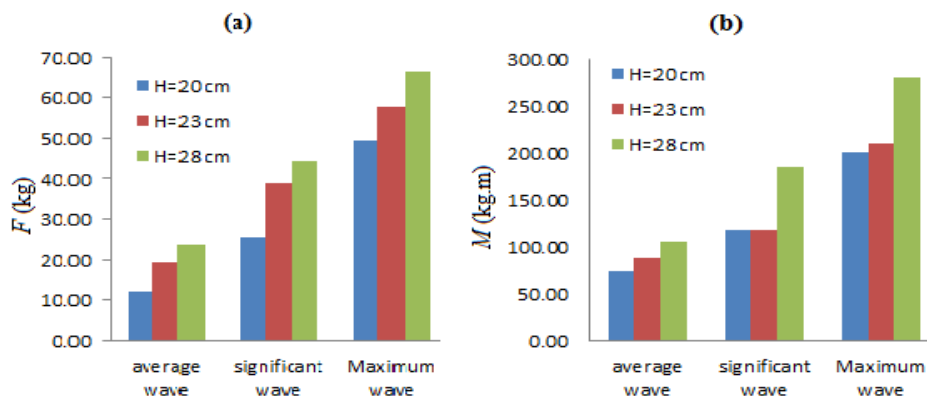
معادله (۳) رابطه خطی بین برش پایه و ارتفاع موج و معادلات (۴ و ۵) حالت بی‌بعد روابط، معادله (۶) رابطه خطی بین لنگر واژگونی و ارتفاع موج و معادلات (۷ و ۸) حالت بی‌بعد روابط را در حالت کلی بیان می‌کنند. در این معادلات، a و b ضرایب خط، ρ چگالی آب در شرایط آزمایش، g شتاب ثقل و بقیه پارامترها در جدول (۲) آمده‌اند. در جدول (۴) مقادیر ارتفاع موج، برش پایه، لنگر واژگونی در مقادیر حداکثر، موج موثر، میانگین و در جدول (۵) ضرایب خط برازش یافته به همراه ضریب رگرسیون، برای معادلات (۳) تا (۷) آمده است. از نتایج حاصل شده در جدول (۴)، می‌توان کاهش برش پایه و لنگر واژگونی را به ازای کاهش ارتفاع موج ملاحظه نمود. در این راستا جدول (۶)، درصد کاهش برش پایه و لنگر واژگونی به ازای کاهش ارتفاع موج و شکل (۱۷)، نتایج جدول (۴) را به صورت نمودار میله‌ای نشان می‌دهد. در شکل (۱۷)، ملاحظه می‌گردد که روند افزایش برش پایه و لنگر واژگونی با افزایش ارتفاع موج در امواج میانگین، موثر و حداکثر به طور مشابه عمل می‌کند.



شکل ۱۵: نمودار برش پایه در مقابل ارتفاع موج در حالت بی‌بعد، a: ارتفاع موج ۲۰، b: ارتفاع موج ۲۳، c: ارتفاع موج ۲۸ سانتی متر



شکل ۱۶: نمودار لنگر واژگونی در مقابل ارتفاع موج در حالت بی‌بعد، a: ارتفاع موج ۲۰، b: ارتفاع موج ۲۳، c: ارتفاع موج ۲۸ سانتی متر



شکل ۱۷: a: برش پایه، b: لنگر واژگونی، در مقادیر حداکثر، موج موثر، میانگین

جدول ۴: ارتفاع موج، برش پایه، لنگر واژگونی در مقادیر حداکثر، موج موثر، میانگین

Tests	H (cm)				T (s)		F (kg)			M (kg.m)		
	H _{wm}	H _{av}	H _s	H _{max}	T _{wm}	T _{av}	F _{av}	F _s	F _{max}	M _{av}	M _s	M _{max}
									F (kg)			F (kg)
F20	۲۰	۷/۹۰	۱۶/۰۷	۲۳/۳۶	۱۸	۱/۱۵	۱۲/۱۱	۲۵/۴۸	۴۹/۳۸			
F23	۲۳	۱۱/۱۸	۱۹/۶۳	۲۹/۲۶	۱۸	۱/۴۹	۱۹/۲۵	۳۸/۹۶	۵۷/۶۸			
F28	۲۸	۱۴/۰۳	۲۳/۲۶	۳۶/۳۹	۱۸	۱/۶۵	۲۳/۸۲	۴۴/۴۸	۶۶/۲۹			
M20	۲۰	۱۰/۰۶	۱۶/۱۱	۲۵/۰۱	۱۸	۱/۲۱				۷۳/۵۲	۱۱۸/۱۱	۲۰۰/۳۳
M23	۲۳	۱۱/۱۷	۱۹/۶۹	۳۱/۷۱	۱۸	۱/۵۱				۸۸/۳۶	۱۳۸/۲۷	۲۱۱/۰۲
M28	۲۸	۱۴/۳۱	۲۳/۴۱	۳۷/۳۱	۱۸	۱/۶۱				۱۰۵/۲۷	۱۸۵/۰۰	۲۸۱/۳۲

جدول ۵: ضرایب خط برازش، برای معادلات (۲) تا (۷)

Tests	معادله (۱)				معادله (۲)				معادله (۳)			
	a ₁	b ₁	R ²	RMSE	a ₂	b ₂	R ²	RMSE	a ₃	b ₃	R ²	RMSE
F20	۱/۸۰	-۰/۲۰	۰/۹۷	۱/۷۵۶	۰/۸۵	-۰/۰۱	۰/۹۷	۰/۰۳	۴۸/۳۷	-۰/۴۱	۰/۹۷	۳/۵۶
F23	۱/۷۳	۷/۰۳	۰/۹۸	۱/۶۳	۰/۸۸	-۰/۱۲	۰/۹۸	۰/۰۲	۲۸/۲۲	۵/۱۴	۰/۹۸	۱/۱۹
F28	۱/۷۵	۷/۶۴	۰/۹۷	۲/۳۶	۰/۹۶	-۰/۱۱	۰/۹۷	۰/۰۳	۱۷/۳۲	۲/۷۶	۰/۹۷	۰/۸۵
M20	۹/۱۶	-۳/۷۸	۰/۹۱	۴/۶۹	۱/۱۲	-۰/۰۶	۰/۹۲	۰/۰۷	۱۳۰۹/۰۰	-۱۳۴/۶۰	۰/۹۲	۱۴۳/۵۰
M23	۷/۲۷	-۳/۷۶	۰/۹۸	۶/۶۱	۱/۰۹	-۰/۰۱	۰/۹۸	۰/۰۳	۱۰۶۶/۰۰	-۲۴/۱۹	۰/۹۸	۴۲/۵۲
M28	۸/۰۵	-۰/۵۵	۰/۹۷	۱۱/۰۶	۱/۰۷	-۰/۰۱	۰/۹۷	۰/۰۴	۴۹۷/۷۰	-۱/۱۳	۰/۹۷	۲۷/۶۶

جدول ۶: درصد کاهش برش پایه و لنگر واژگونی به ازای کاهش ارتفاع موج

	درصد کاهش برش پایه			درصد کاهش لنگر واژگونی		
	میانگین	موثر	حداکثر	میانگین	موثر	حداکثر
کاهش ارتفاع موج از ۲۸ به ۲۳ سانتی متر	-۲۳/۷۴	-۱۴/۱۷	-۱۴/۹۳	-۱۹/۲۶	-۳۳/۷۹	-۳۳/۳۱
کاهش ارتفاع موج از ۲۸ به ۲۰ سانتی متر	-۹۶/۷۰	-۷۴/۵۷	-۳۴/۲۴	-۴۳/۳۲	-۵۶/۶۳	-۴۰/۴۲
کاهش ارتفاع موج از ۲۳ به ۲۰ سانتی متر	-۵۸/۹۶	-۵۲/۹۰	-۱۶/۸۱	-۲۰/۱۷	-۱۷/۰۶	-۵/۳۴

۷. بحث و نتیجه گیری

۱۵، شماره ۳، صفحات ۲۵-۳۳.

مظاهری، س.، نجیبی، ح.، ۱۳۹۰، بررسی پاسخ دینامیکی سازه جکت تحت اثر امواج و جریانات دریایی، چهارمین همایش بین المللی صنایع فراساحل.

Chan, E.S., Cheong, H. F., Tan, B. C., 1995, Laboratory study of plunging wave impacts on vertical cylinders. *Offshore Eng.* 1(2), 94-100.

[https://doi.org/10.1016/0378-3839\(94\)00042-V](https://doi.org/10.1016/0378-3839(94)00042-V)

Goda, Y., Haranka. S., Kitahata, M., 1966, Study on impulsive breaking wave forces on piles. *Port. Harab. Tech. Res. Inst.* 6(5), I-30.

Hildebrandt, A., 2013. Hydrodynamic of breaking waves on offshore wind turbine structures (Ph.D. Thesis, Franziskus- Institute for Hydraulics, Water ways, and coastal Engineering, Hanover.

[Http://www.nimala.ir](http://www.nimala.ir)

Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., Schaaf, S.A., 1950. The forces exerted by surface waves on piles. *J. Pet. Technol., Pet Trans., AIME*, 189, 149-154.

<https://doi.org/10.2118/950149-G>

Sawarangi, T., Nochino, M., 1984, Impact Forces on nearly breaking waves on Vertical circular cylinder, *Coast. Eng. J.* 27, 249-263.

<https://doi.org/10.1080/05785634.1984.11924391>

Sruthi, C., Sriram, V., 2017, Wave impact load on jacket structure in intermediate water depth, *Ocean Eng.* 140, 183-194.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.023>

Von Karman, T., 1929, the impact on seaplane floats during landing. *Natl. Adviso. Comm. Aeronaut.*

بررسی برش پایه و لنگر خمشی واژگونی در مواجهه با امواج تصادفی دریا تحت طیف جانسوآپ در این تحقیق مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. بر اساس آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها در این تحقیق، برای ارتفاع‌های موج ۲۰، ۲۳ و ۲۸ سانتی‌متر امواج ناشکنا و ارتفاع موج ۳۰ سانتی‌متر امواج شکسته ملاحظه گردیدند که فقط امواج ناشکنا مورد استفاده قرار گرفتند. شرایط آب عمیق بر اساس تحلیل موج به موج در کلیه‌ی آزمایش‌ها حاکم بود. با در نظر گرفتن موج موثر، به ازای کاهش ارتفاع موج از ۲۸ به ۲۳ سانتی‌متر، ۱۴/۱۷ درصد، ۲۳ به ۲۰ سانتی‌متر، ۵۲/۹۰ درصد، ۲۸ به ۲۰ سانتی‌متر ۷۴/۵۷ درصد کاهش برش پایه و به ازای کاهش ارتفاع موج از ۲۸ به ۲۳ سانتی‌متر، ۳۳/۷۹ درصد، ۲۳ به ۲۰ سانتی‌متر، ۱۷/۰۶ درصد، ۲۸ به ۲۰ سانتی‌متر ۵۶/۶۳ درصد، کاهش لنگر واژگونی وجود دارد.

۸. قدردانی

از پرسنل و همکاران آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس به خصوص 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.

۹. منابع

آیین‌نامه طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران، ۱۳۸۵، نشریه شماره ۹-۳۰۰ (سکوه‌های دریایی).

دلیلی، آ.، وفایی‌پور، ر.، ملکی، آ.، ۱۳۹۷، تعیین طیف غالب موج در طراحی جکت‌ها از نظر برش پایه، فصلنامه آنالیز سازه- زلزله دوره