

بررسی تجربی حوادث ضربه موج در عرشه بر روی یک مدل TLP

خلاصه

تست های مدل به تحقیق درباره رفتار جهانی تنش سنتی پایه سکو کمک کرد و این کار توسط بار عرشه-موجی وابسته به وقایع امواج شدید با قله بلند نامعمول در دریاهاى موسمی انجام شد. آزمایشات تجربی به منظور اندازه گیری های همزمان بلندی سطح موج، حرکت جسم صلب، تنش پی و همچنین توزیع فشار در سطح زیرین عرشه مدل طراحی شد. نتایج بدست آمده گوناگونی تمامی اندازه گیری ها را نشان داد و همچنین بینشی را در اثر بارهای عرشه-موجی بر روی رفتار سکو، تنش های پی و فشار اسلمینگ فراهم کرد و همچنین ارتباط کیفی بین پارامترها را نشان داد. طبق آزمایشات مکرر در مواقع متعدد در پارامترهای موج مختلف، مشاهدات عمومی و نتیجه ها با در نظر گرفتن دینامیک سکو در طول اثر عرشه، تنش پی، شرایط پی سست، رینگینگ پی و فشار اثر منطقه ای بدست آمد. نتایج این تحقیق می تواند برای کالیبره کردن محاسبات دینامیک سیالات استفاده شود.

مقدمه

در سالهای اخیر، تلاش های زیادی برای تحقیق بر روی مشکلات اثر wave-in-deck در سکوهایی خارج از ساحل توسط آزمایشات تجربی یا متدهای عددی یا ترکیبی از هر دو انجام شده است. از این رو، دانش مهندسی حال حاضر به پیشبینی دقیق بزرگی و پراکندگی بارهای wave-in-deck و پاسخ جهانی بدست آمده از سازه های شناور که محدود باقی مانده نیاز داشت.

در بین سال های 2004 و 2005، طوفان های ایون، کاترینا و ریتا در خلیج مکزیک 126 سازه خارج از ساحل را تخریب کرد و به 183 سازه دیگر خسارت وارد کرد. خسارت های گزارش شده به ما می گویند که در حین طوفان های موسمی و گردبادها، ارتفاع موج در خیلی از سازه ها از ارتفاع طراحی بیشتر میشود. اخیراً در دسامبر 2015، 50 کارگری که در منطقه حفاری در دریای شمال زمانی صدمه دیدند که موج شدیدی به محل اقامت آن ها اصابت کرد که باعث کشته شدن یک نفر و مجروح شدن یک نفر دیگر شد. متوجه شدیم که این اثرات عرشه بیشتر از چیزی که توسط متدهای تئوری بدست آمده، رخ میدهد.

اکثر تحقیقات ثبت شده بر روی اثرات موج بر روی سازه های خارج از ساحل بر روی بدست آوردن جعبه های ساده شده عرشه یا سطح صاف تمرکز داشته است. با این وجود، سازه زیر عرشه مانند ستون ها و پل ها (پتون) می تواند بر روی بزرگی نیرو و پراکندگی آن بر روی قسمت بالایی عرشه تاثیر بگذارد. با توجه به فعل و انفعالات هیدرودینامیک بین ستون ها و پل ها در یک سکوی چند ستونی مانند سکوی ستونی تنشی (TLP)، اثرهای پراش و تابش می تواند باعث افزایش ارتفاع موج شود و بر روی سطح زیرین عرشه اثر بگذارد. نیدوزکی و هوستون فهمیدند که فاصله گذاری بین ستون ها نقش مهمی در فرازجوشی موج در زیر عرشه دارد که میتواند بر روی نیروی عمودی **wave-in-deck** اثر بگذارد. عبدولصمیم متوجه شد که محل تقاطع ستون های عرشه در یک مدل ثابت TLP که تحت امواج غیر معمولی با قله بلند قرار میگیرد، متحمل فشار ضربه ای **wave-in-deck** بیشتری نسبت به مناطق مرکزی زیر عرشه میشود. شانک و هنینگ بر روی اثر زیر سازه روی بزرگی بار **wave-in-deck** تحقیق کردند که این کار با استفاده از وصل کردن یک عرشه جعبه مانند به ستون های مربعی انجام شد. آن ها فهمیدند که حضور ستون تاثیر زیادی بر روی بزرگی نیروهای عمودی کلی و فشارهای محلی دارد و بزرگی باره به شدت افزایش یافت. با حضور ستون ها، حداکثر نیروی **wave-in-deck** عمودی تقریباً دو برابر ماکزیمم بار اندازه گیری شده در حالت بدون ستون افزایش یافت.

وقایع ضربه های شدید **wave-in-deck** ممکن است بارهای محلی و کلی اصلی را بر روی سازه خارج از ساحل شناور به وجود بیاورد. بارهای کلی میتواند نیروهای بزرگی را در پی و **riser** ایجاد کند و در نتیجه، بر روی حرکات سازه شناور تاثیر بگذارد، در حالی که بارهای محلی توانایی صدمه زدن به عرشه سازه و تجهیزات را دارد که میتواند امنیت افراد را به خطر بیندازد. بخش مهمی از تجربه تنش پی توسط یک TLP در شرایط طوفانی میتواند به پاسخ **ringing** مرتبط باشد که به یک پروسه بانندی باریک به علت خفگی کم در حرکات رو به بالا میگویند. از این رو، بررسی رفتار دینامیکی TLP به هنگام ضربه **wave-in-deck** مورد نیاز است.

در بین بررسی های تئوری شناخته شده، تئوری کاپلان برای تخمین اثر موج و بار ضربه بر روی سکوه های خارج از ساحل بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال، این متد برای آنالیز اثر موج بر روی عرشه سازه های پایه

گرانشی GBS و انواع دیگر سکوهای خارج از ساحل ثابت مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از این متد برای جامعه های طبقه بندی شده برای آنالیز کردن نیروهای اثری موج بر روی سکوهای شناور نیز توصیه میشود. بارهولم به صورت تئوری اثر موج های شدید بر روی عرشه یک سکوی semisubmersible (نصفه شناور) را در مقایسه با موج های معمولی مورد مطالعه قرار داد. نویسندگان از بررسی های انجام شده توسط ونگر برای حساب کردن حرکات سکو و از تئوری موج نظم دوم استوکس برای توصیف موج های ضمنی بهره بردند. کد پنل WAMIT برای بدست آوردن توابع انتقالی برای حرکات خطی بدست آمد. نویسندگان فهمیدند که اثر سکو، نیروی مکشی بزرگی را تولید میکند که باعث حرکات رو به پایین بزرگی شود. با استفاده از سازه های ثابت، تلاش هایی برای پیشبینی فشار ضربه و پراکندگی آن در طول عرشه با استفاده از تئوری موج خطی انجام شد. ونگ یک فرمول تئوری را برای فشار اثر بر روی سطح صاف با صرف نظر از ضخامت بدست آورد که نشان دهنده یک رابطه کیفی خوب با فشار اندازه گیری شده در آزمایشات مدل بود. محدودیت های مومنتوم و متدهای مشابه مربوط به کاربرد کینتیک موج های میدان موجی غیر آشفته است. متدهایی که بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی CFD هستند در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. کدهای تجاری مانند STAR-CCM+ و ANSYS FLUENT که به طور رایج استفاده میشوند برای مدل کردن و حل کردن مشکلات اثر wave-in-deck موجود هستند که از روش حجم سیال برای بدست آوردن جریان های هیدرودینامیک سطح آزاد استفاده میکنند. از این رو، تکنیک های مبتنی بر CFD برای استفاده تجربی در مدل کردن یک حجم شناور مرتبط به موج های شدید در حالت دریای نامعقول محدود است.

تست های مدل در گذشته برای تخمین زدن نیروهای wave-in-deck بر روی نوع های مختلف سازه های خارج از ساحل انجام میشود. تست های مدل به صورت قابل بحثی بهترین روش برای بدست آوردن بارهای wave-in-deck میباشد. اکثریت قابل توجهی از کارهای منتشر شده بر روی اندازه گیری نیروهای اثر wave-in-deck کلی بر روی جعبه های عرشه ساده شده یا سطح های صاف ثابت تمرکز دارد که به موج های معمولی و موج های تصادفی مرتبط بود. از طرف دیگر، تحقیقات انجام شده روی شناورهای چند ستونه رایج نادر است. همچنین اکثر تحقیقات بدست آمده بر روی این سازه ها به علت محرمانه بودن پروژه ها در دسترس عموم قرار ندارند. به نظر میرسد که آزمایشات

تجربی از اثر **wave-in-deck** بر روی سازه های خارج از ساحل شناور از اواسط دهه 2000 آغاز شده است. در میان این تحقیقات، جوهایست و هنیگ فواصل هوایی دینامیکی، بارهای موج و پاسخ مدل های TLP تحت شرایط موجی شدید را بررسی کردند. هر دو تحقیق یک حادثه **wave-in-deck** را گزارش داد که می توانست باعث مکانیزم پاسخی شدید اضافی شوند که یک تغییر جهت در بارگزاری شدید قابل توجه بود. در همان زمان، توزیع فشار ضربه **wave-in-deck** در اطراف جلو و پشت ستون های یک سکوی شناور چند ستونه و رابطه آن با بار کلی که شامل تنش پی میباشد، به طور سیستماتیک مورد بررسی قرار نگرفته است. گزارش هایی از اندازه گیری های دقیق و پیشبینی بار کلی و پاسخ دینامیکی سازه خارج از ساحل شناور، به علت حوادث اثر **wave-in-deck** به شدت محدود هستند. همانطور تکنیک های مبتنی بر CFD برای پیشبینی اثر دینامیکی یک حجم شناور لنگری به پیشرفت خود ادامه میدهد. اطلاعات **wave-in-deck** تجربی برای تایید شبیه سازی های CFD و برای تهیه کردن اطلاعاتی که میتواند برای طراحی این سکو ها استفاده شود مورد نیاز است. هدف این تحقیق، بررسی پاسخ کلی یک سیستم TLP تحت نیروهای **wave-in-deck** با استفاده از تست های مدل اتفاق های موجی شدید مختلف و تکرار واقعی آن ها است. این تحقیق بر روی تهیه دیدگاه های کیفی و جزئیات کمی در نیروهای اثر **wave-in-deck**، حرکات حجمی صلب، تنش های پی و فشار ضربه عرشه و روابط آن ها تمرکز دارد. پاسخ مدل TLP در رویدادهای موجی غیر متعارف متعدد با کینتیک های موجی مختلف اندازه گیری شد که این از چرخه 10000 ساله حالت دریا در شمال غربی استرالیا گرفته شده است. با انجام تست ها برای رویداد های موجی مختلف با شرایط واقعی مختلف، هدف این تحقیق تخمین گوناگونی پاسخ های اندازه گیری عرشه و نتیجه گیری هایی که ممکن است به صورت گسترده برای سازه های شناور هم نوع مورد استفاده قرار گیرد، میباشد. این تحقیق همچنین در نظر دارد که نتایج جزئی شده ای که می تواند برای کالیبره کردن نرم افزار آنالیز جهانی و شبیه سازی CFD را فراهم کند. برای اینکه نتایج آزمایش مدل بتواند برای مقایسه با شبیه سازی عددی در آینده قابل رقابت باشد، اطلاعات جزئی بر روی مدل و نتایج وجود دارد که شامل ارتفاع موج اندازه گیری شده در کاوش های موج های مختلف است، میباشد. اطلاعات جزئی بیشتری مانند سری های زمانی از ارتفاع موج اندازه گیری نیز موجود میباشد. یک روش که میتواند برای شبیه سازی عددی نتایج در این تحقیق

تجربی استفاده شود، تکنیک موج متمرکز است که به تئوری موج جدید نیز آن را می‌شناسیم. با وجود این که اکثر تحقیقات از تکنیک موج متمرکز برای بدست آوردن پاسخ سازه های ثابت استفاده کرده اند، رانزلی نشان داد که از یک روش مشابه می تواند برای بدست آوردن پاسخ دینامیکی یک سازه لنگری شناور میتوان استفاده کرد. این تکنیک نیازمند تاریخ زمانی ارتفاع موج در یک نقطه می باشد که در این مقاله و مقاله منبع توسط اولین نویسنده (عبدلصمیع) مورد استفاده قرار گرفت. استفاده کنندگان از CFD باید بدانند که تاریخ زمانی موج اندازه گیری شده می تواند با استفاده از تطبیق ترکیبات موج خطی از طریق تغییر فوریه مستقیم از نو نوشته شود. ترکیبات موج خطی بدست آمده، موج را در موقعیت مدل درست نشان نمیدهد و این به خاطر غیر خطی بودن تقاطع های موج میباشد. یک تکنیک انفعالی برای تنظیم ارتفاع و فاز ترکیبات موجی برای نوسازی تاریخ زمانی موج مورد نظر در موقعیت خواسته شده، مورد نیاز است.

2. مدل و ابزارها

2.1 امکانات تست مدل

این آزمایش مدل در دانشگاه ماریتی استرالیا در مخزن آب انجام شد که این مخزن 100 متر طول و 3.55 متر عرض دارد که عمق آن 1.5 متر می باشد. این مخزن برای بدست آوردن شرایط موج های مختلف معمولی و غیر معمولی مدرج شده است. برای بدست آوردن پاسخ سکو و مستقل بودن موج، از باد و جریان آبی را صرف نظر میکنیم

2.2 مدل TLD

مدل با مقیاس 1:125 بر طبق تنش پی SNORRE-A مورد آزمایش قرار گرفت. در حالی که عرشه این سکو به عنوان یک سازه جعبه ای شکل مدل شده بود. خواص اصلی سکو در مقیاس اصلی و مقیاس مدل در جدول 1 و شکل 1 آورده شده است. به علق محدودیت های عمق حداکثری مخزن (1.5 متر)، عمق آب مقیاس شده مقیاسی از عمق اصلی که SNORRE-A در آن قرار دارد، نیست. در حالی که سختی محوری پی TLP برای نشان دادن طول واقعی، مدل شده است که عمق آب مدل شده با عمق آب واقعی متناسب است. این بررسی به علت این که هدف این تحقیق،

بدست آوردن بارهای هیدرودینامیکی عرشه یک سکو TLD است، مورد قبول است زیرا در این تحقیق، پاسخ اصلی TLP در عمق مورد نیاز نیست.

همانطور که هدف این تحقیق بدست آوردن دیدگاهی از رویداد wave-in-deck است، ارتفاع عرشه مدل TLP باید به دقت مشخص شود. برای بدست آوردن یک عددی که بدست آوردهیم به اندازه کافی برای رویدادهای اثر در موج های حالت های دریایی ره اندازه کافی بزرگ باشد، ترخیص عرشه استاتیکی از سکو به مقدار 15 متر انتخاب شده است (120 متر در مقیاس اصلی) که بعد به 12 متر (92 میلی متر در مدل) در نمونه کاهش پیدا کرد. این تغییرات یک توافقی است که به منظور اطمینان سازی برای بدست آوردن مقدار کافی رویداد اثر wave-in-deck است که می تواند در حین تست مشاهده و آنالیز شود حتی اگر تناوب اتفاق افتادن این رویدادها از مقیاس اصلی در دریا بیشتر باشد. تفاوت در ترخیص عرشه بین سکوی SNORRE-A و مدل استفاده شده در این تحقیق در شکل 2 نشان داده شده است. تناوب اثرهای امواج مورد انتظار نیز در بخش 3 بحث میشود.

این مدل به دو بخش تقسیم می شود: پوسته (ستون ها و پل ها) و قسمت بالایی عرشه. داشتن این دو بخش مجزا به ما این اجازه را می دهد که عرشه را هم به صورت جداگانه و هم به صورت یک سازه ترکیبی بررسی کنیم. این مدل طوری طراحی شده است که تا حد ممکن سخت و مانع دخول آب شود. همانطور که انتظار میرفت، قسمت بالایی ستون ها به هم بسیار نزدیک بود. یک تیغه اکریلیک بلند 100 میلی متری بر بالای گوشه های آلومینیومی به منظور جلوگیری از دخول آب به داخل عرشه نصب شده است که می توان نتایج آن را در جدول 3 مشاهده کرد.

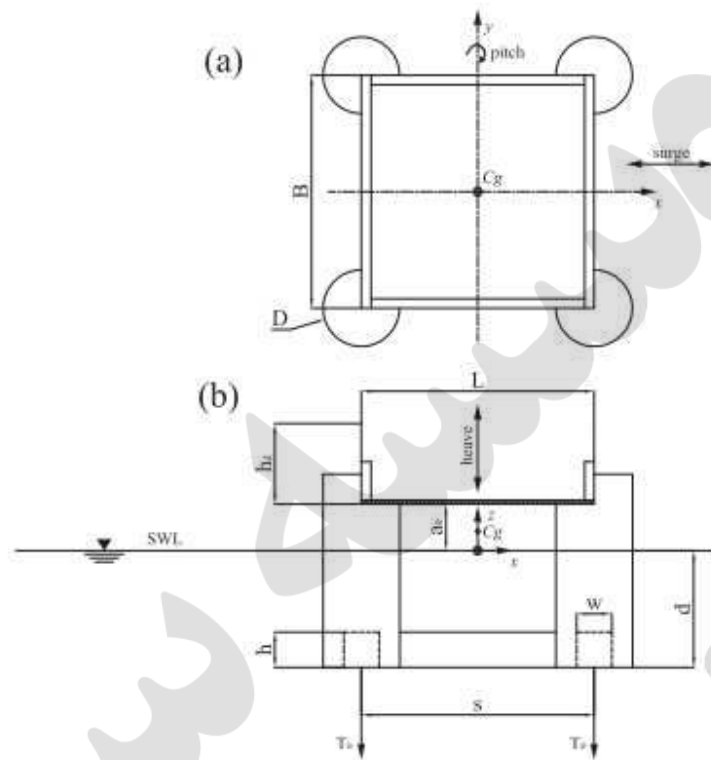
آزمایشات شیب و تست های دو نخه برای بدست آوردن مرکز گرانشی و حجم انجام شد که در جدول 1 نتایج آن آورده شده است. تنش افزاینده توسط یک حجم 1.70 کیلو گرمی واقع در 515 میلی متری بالای زانویی در مرکز سکو قرار دارد (شکل b6). مکان این حجم متمرکز شده طوری انتخاب شده است که نشان دهنده تنش بالا رونده در عرشه زیرین SNORRE-A باشد.

Parameter	Full scale	Model scale (1:125)	Tested model scale
Column diameter, D	25.00 m	200 mm	200 mm
Pontoon size, $h \times w$	11.50 \times 11.50 m	92 \times 92 mm	92 \times 92 mm
Column spacing, s	76.00 m	608 mm	608 mm
Column height	63.00 m	504 mm	505 mm
Deck size, $L \times B \times h_d$	124.50 \times 92.00 \times 15.00 m	996 \times 736 \times 120 mm	608 \times 608 \times 210 mm
Deck clearance, a_D	27.00 m	216 mm	120 mm
Platform's draft, d	38.125 m	305 mm	305 mm
Displacement, Δ	101,840 t	52.15 kg	52.15 kg
Total mass, M	77,640 t	39.75 kg	39.75 kg
Initial pretension per leg, T_0	6055 t	3.10 kg	3.10 kg
Number of tendon per leg, n	4	4	1
Total tendon length at zero offset, L_0	307.00 m	2456 mm	1195 mm
Axial stiffness per leg, nEA/L_0	2.42×10^8 N/m	15.49 N/mm	15.80 N/mm
Riser tension	3320 t	1.70 kg	1.70 kg
Centre of gravity, C_g (x, y, z)	n/a	n/a	(0.0, 0.0, 5.0) mm
Mass moment of inertia (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})	n/a	n/a	(5.23, 5.23, 5.63) kg.m ²
Water depth	310.00 m	2480 mm	1500 mm

جدول 1

2.3 سیستم پی

برای اینکه سیستم لنگری TLP SNORRE-A که متشکل از 4 پی در هر گوشه است را نشان دهیم، یک پی مجزا برای هر گوشه مدل برای بدست آوردن سختی یکسان استفاده می کنیم. نقاط چرخش پی در مدل TLP واقع در نقاط انتهایی ستون توسط نصب 3 لولای محوری در هر ستون مانند شکل 4 قرار گرفت. نقطه لنگر هر پی به کف مخزن متصل شد. قبولی محوری واقعی 4 پی TLP SNORRE-A با استفاده از فنرهای ضد زنگ مدل شد که سختی را با مقیاس درستی ارائه میدهد. فنر سبک با سختی محوری 15.80 N/mm بین یک طناب سیمی 3.2 میلی متری و پایه لنگر نصب شد (شکل 4). برای پایه شماره 1 و شماره 4 فنر به یک طناب سیمی و یک سلول باری ضد آب وصل شد. لنگر پلاستیکی، یک ترکیب قوی برای پی به کف مخزن را فراهم کرد. برای به دست آوردن پیش تنش، هر کدام از پی ها به یک سیم 1.20 میلی متری که متصل به انتهای لنگر بود وصل کردیم. از این رو، بدست آوردن به یک مکانیزم برای از دور کنترل کردن پیش تنش پی دست پیدا کردیم. $T=30.4$ N



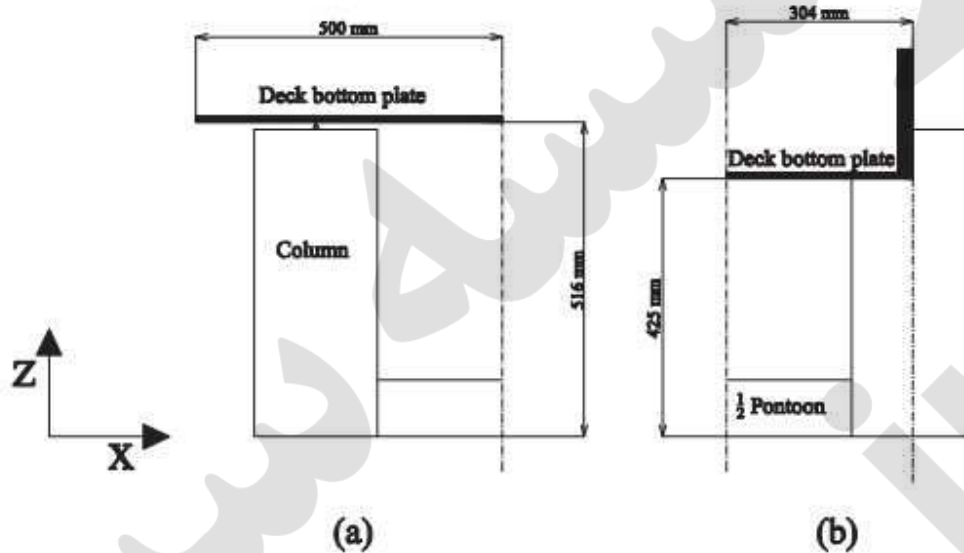
شکل 1

2.4 ابزارها

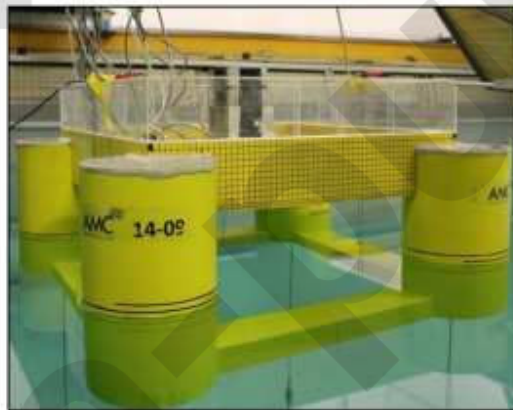
مکان 5 کاوش موج در جدول 2 آمده است. (سیستم مختصاتی در شکل 5 آمده است). کاوش موج WP1-WP3 اندازه ارتفاع موج های ورودی ضمنی را که در جهت X حرکت میکنند را بدست میآورد. در حین آزمایشات اثر موج، موج WP4 و WP5 به جلو و عقب لبه های بالایی سکو متصل بود.

حرکت خروشان مدل توسط یک ترانسفورماتور جابجایی خطی مغناطیسی بدست آورد که در شکل 6 نشان داده شده است. در ادامه، Xsens MT130، یک سیستم اندازه گیری حرکتی شش درجه آزادی بر روی مدل TLP برای اندازه گیری ترکیبات شتابی انتقالی و همچنین حرکات پرتابی مدل نصب شد. هدف این سیستم اندازه گیری مخصوص بدست آوردن اوج حرکت پرتابی است که با رویداد اثر موج در ارتباط است. این سیستم همزمان با سیستم DAQ روشن میشود اما اطلاعات آن با ارتفاع موج، بارها و اطلاعات امواج خروشان همگام نیست. به منظور پیدا کردن نقطه اوج حرکات پرتابی به وجود آمده توسط رویدادهای اثر wave-in-deck، یک همگام سازی تقریبی با مقایسه تاریخ

زمان پاسخ پرتاب با ارتفاع موج و تاریخ زمان حرکت امواج خروشان انجام شد که این فرایند توسط دوربین های ویدئویی ضبط شد. این راه، با وجود اینکه تضمینی برای درستی زمانی در اوج رویداد پرتاب نمی کند، بزرگی زاویه پرتاب شدید در درون چرخه رویداد اثر wave-in-deck را اندازه میگیرد.



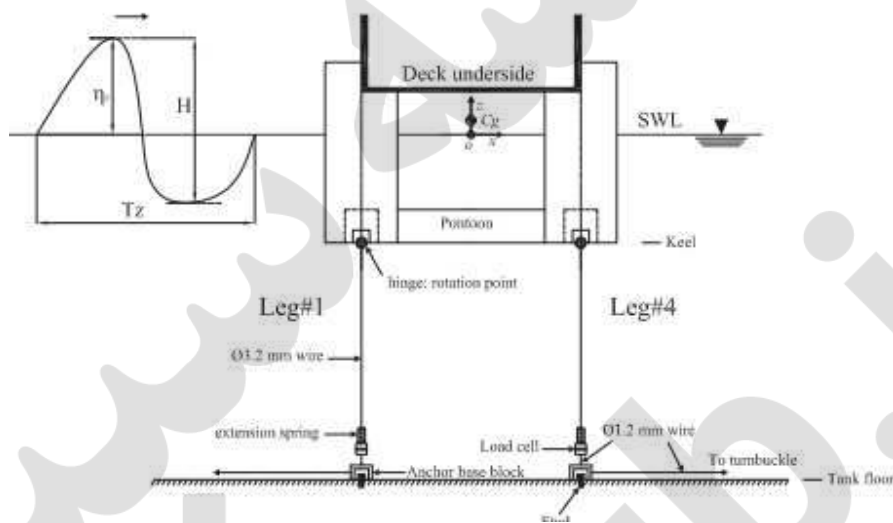
شکل 2



شکل 3

فقط دو تا از پی ها توسط دو سلول باری شناور FUTEK متصل بود (شکل 4). یکی از پی ها بالا موجی و دیگری پایین موجی بود. قسمت تحتانی سازه عرشه توسط 16 ترانسفورماتور فشاری piezoresistive ابزار کاری شده بود. قسمت جلویی هر کدام از ترانسفورماتورها تقریباً 4 میلی متر داخل آب فرو رفته بود. فشار این ترانسفورماتور ها در جلو و عقب

پخش شده بود. (شکل 6). مساحت اطراف ستون جلویی C2 توسط PT1 و PT4 ابزار کاری شده بود. در حالی که PT13 و PT16 فشار اثر موج اندازه گیری شده در نزدیکی ستون پشتی C3 را اندازه می‌گرفت. فشار باقی مانده ترانسفورماتور، PT5 و PT12، در وسط محدوده گسترده‌گی وارد شد. با اشاره به شکل 6، چهار ناحیه در طول و عرض زیرین عرشه توسط 4 ترانسفورماتور فشار برای هر کدام ابزار کاری شده بود. جدول 3 نشان دهنده مقدار هر ناحیه است. ترتیب ترانسفورماتور فشار محلی باعث مشخص شدن توزیع فشار میشود.



شکل 4

Wave probe (WP)	Location (x, y) without the model (m)	Location (x, y) with the model (m)
1	(-10.000, 1.280)	(-10.0, 1.280)
2	(-5.000, 1.280)	(-5.0, 1.280)
3	(-1.000, 0.000)	(-1.0, 0.000)
4	(-0.404, 1.200)	(-0.304, 0.000) moving with the model
5	(0.000, 1.2000)	(0.304, 0.000) moving with the model

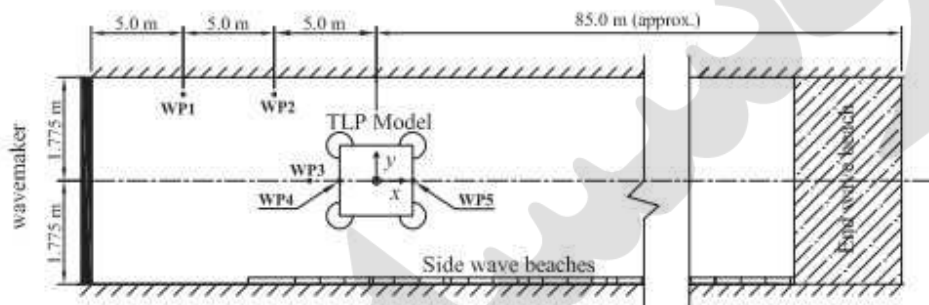
جدول 2

3. شرایط موج

3.1 حالت دریا

حالت دریایی که در این آزمایش مدل استفاده شد، بیانگر یک طوفان چرخه ای 10,000 ساله در شمال غربی استرالیا است. این حالت آب توسط طیف جانسون با ارتفاع موج قابل توجه $H_s=22.13m$ ، با اوج دوره 17 ثانیه (فرمول) و

پارامتر شکل اوج گاما=0.1 مدل سازی شد. پارامترهای مرتبط با مقیاس 1:125، $T_p=1.52$ ، $H_s=177\text{mm}$. فرض ما دریایی با امواج قله بلند است، بدون در نظر گرفتن باد یا جریان آب.



شکل 5

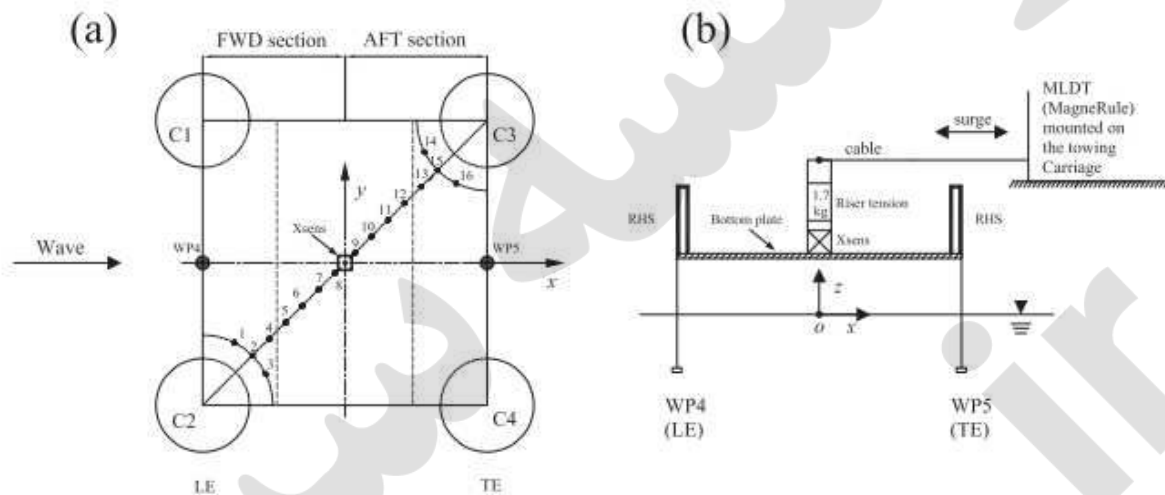
باید در نظر داشت که TLP مقیاس واقعی که در آزمایش این مدل مورد بررسی قرار گرفت، الزاما بیانگر بهترین راه حل برای طراحی در مقایسه با تریخی استاتیکی عرشه و در معرض قرار گرفتن آن با حالت دریای ناملاطم نیست. در حقیقت، بعدها مدل و حالت دریا طوری انتخاب شده اند که تضمین کند وقایع wave-in-deck بیشتر از یک بار در یک طوفان 10,000 ساله اتفاق بیوفتد. با وجود اینکه این مخالف چیزی است که یک طراح میخواهد، این گونه انتخاب ها اجازه میدهد که وقایع wave-in-deck در مدت های کوتاه منطقی مورد بررسی قرار بگیرد، که مقدار آن کمتر از طوفان های طراحی شده 3 ساعته است که شامل خواص موجی متفاوتی است.

3.2 موج های تکرر و درجه بندی

موج های تکرر غیر متعارف کوتاه مدت توسط موج ساز با استفاده از پروسه درجه بندی موج مکرر ترکیب شده است، که هدایت آن ها قبل از وجود مدل در مخزن انجام شده است. این پروسه شامل به راه انداختن یک تک موج تصادفی که در ابتدا برای حدود 22 دقیقه (120 ثانیه در مقیاس مدل) می باشد که این کار با استفاده از فرکانس مدل 200 هرتز برای کاوش های موج انجام می پذیرد. واقعی سازی موج می تواند برای آزمایشات بعدی مورد استفاده قرار گیرد، به شرطی که حداقل ارتفاع قله یک موج از فاصله هوایی استاتیکی $a=120\text{mm}$ (15 متر در مقیاس اصلی) در کاوش موج WP3 و WP5 بیشتر شود، که با لبه عرشه منطبق است. 9 واقعی سازی موج، هر کدام به مدت 450 ثانیه (40 ثانیه در حالت مدل)، که شامل 8 رویداد تجاوزی موجی انتخاب شده اند.

Zone	Definition	Pressure transducers (PT)
I	Around forward columns	1, 2, 3, 4
II	Forward middle section	5, 6, 7, 8
III	Aft middle section	9, 10, 11, 12
IV	Around aft columns	13, 14, 15, 16

جدول 3



شکل 6

با وجود این که هدف این تحقیق، بررسی کثرت رویداد های *wave-in-deck* ممکن نیست، تکرر امواج انتخاب شده می تواند به عنوان یک نمونه تفسیری احتمالی با معنی در نظر گرفته شود. با توجه به توزیع کوتاه مدت فوریتال از قله های موج، انتظار می رود که به طور میانگین 46 قله موجی از فاصله هوایی استاتیکی $a=15\text{m}$ در این حالت دریایی طوفان 3 ساعته فراتر رود. از این رو 9 واقعی سازی انتخاب شده تصادفی برابر با 17.4٪ تمام قله های موجی از سطح عرشه استاتیکی در موقعیت داده شده فراتر می رود. به نظر می رسد که این انتخاب برای عمومی سازی با توجه به پاسخ های TLP که شامل اثر های *wave-in-deck* می باشد، با وجود اینکه وسیع کردن بازه های رویدادهای موج ممکن است اعتماد به نفس بیشتری در نتایج به همراه داشته باشد، این کار ممکن است نیازمند آزمایشات مدل با تکرر موج های طولانی تر یا کاهش عرشه استاتیکی باشد.

ترکیب استفاده شده در بعد های مدل، حالت دریا و تکرر موج ها نشان دهنده یک توافق منطقی به منظور رسیدن به این هدف می باشد.

4. شروع آزمایش

4.1 برپایی مدل

مدل TLP بر روی خط مرکزی مخزن با مرکز ثقل $x=y=0$ واقع در 15 متری موج ساز قرار گرفته است (شکل 5). 85 متر باقی مانده از مخزن به ما این اجازه را داد که به مقدار کافی زمان برای اجرا بدون دخالت موج های بازگشتی را داشته باشیم. یک فرکانس نمونه 20 KHz برای تمام کانال ها برای رسیدن به فشار ضربه ای زمان کوتاه اعمال شد. 24 کانال (یکی برای ترانسفورماتور جابجایی خطی، دو تا برای سلول های بارگذاری، 16 تا برای ترانسفورماتور فشار و 5 تا برای کاوش های موجی) در فرکانس 20 کیلو هرتز اعمال شد که یک سری داده به حجم mb220 برای 40 ثانیه از زمان استفاده را تولید کرد.

4.2 دوره های طبیعی و خفگی

آزمایشات پوسیدگی برای سیستم پی TLP انجام شد. روش کاهش لگاریتمی برای بدست آوردن نسبت خفگی مورد استفاده قرار گرفت. دوره زمانی مدل TLP با مقادیر مقیاس اصلی گرفته شده از جوهانسن، جدول 4، مقایسه شد. یک تفاوت بزرگ در دوره طبیعی موج پیدا شد که همانطور که انتظار میرفت، به علت عمق آب و طول پی، به مقیاس مدل نشد. دوره های زمانی بالا رفتن و استقرار با تمامی اطلاعات مقیاس اصلی تطابق داشت که مقادیر آن به ترتیب 10٪ و 3.7٪ بود.

4.3 تست مانریکس

با قرار گرفتن مدل TLP در مخزن، پارامترهای موج برای هر کدام از وقایع موجی (WE) برای هر تاریخ زمانی WP3 استخراج شد (شکل 5). آنالیزهای عرضی برای بدست آوردن دوره عبور صفر، Tz، ارتفاع قله، C، ارتفاع قله تا پایین موج و H اعمال شد (شکل 4). جدول 5 این پارامترها را بررسی میکند به طوری که؟؟ طول موج برآورده شده از روابط پراکندگی می باشد. رویدادهای موج آغاز شده در WP3 غیر شکستی بوده که توسط شیب موج نشان داده است. $(S=H/\lambda)$. سرعت فاز، C، توسط λ/Tz برای هر رویداد موجی بدست آمد. همچنین، همانطور که در جدول آمده است، سرعت افقی، U، در قله محاسبه شده در تئوری موجی نظم دوم استوکس در $Z=C$ می باشد. با وجود اینکه

ممکن است تئوری استوکس در پیشبینی کینتیک امواج شدید دقیق نباشد، با این وجود، این سرعت افقی به عنوان یک اندازه گیری تقریبی برای رویدادهای موج قرار می گیرد.

5. آنالیزهای عدم اطمینان

عدم قطعیت پاسخ های TLP اندازه گیری شده در زمان و بزرگی توسط چندین (حداکثر 5) تکرار برای هر کدام از 9 واقعی سازی امواج بدست آمد و گوناگونی نتایج برای امواج و پاسخ های آن ها ارزیابی شد. به عنوان مثال، 4 اجرا از واقعی سازی امواج که شامل دو رویداد WE2 و WE3 بودند، که در شکل 7 نیز آمده اند، در زیر به طور جزئی شرح داده شده اند. دو اثر عرشه ایجاد شده توسط رویدادهای موجی WE2 و WE3 را می توان در زمان های بین 5 تا 7 ثانیه برای WE2 و 23 تا 25 ثانیه برای WE3 مشاهده کرد. 3 قله موجی دیگر در این تاریخ زمانی از ترخیص عرشه استاتیکی بدون تاثیر زیادی بر روی عرشه فراتر رفت.

Wave event (WE#)	H (mm)	η_c (mm)	T_x (s)	λ (m)	C (m/s)	u (m/s)	S (-)
1	231	145	1.48	3.39	2.29	0.65	0.068
2	260	163	1.37	2.92	2.13	0.85	0.089
3	238	171	1.65	4.16	2.52	0.60	0.057
4	227	137	1.35	2.84	2.10	0.72	0.080
5	186	156	1.76	4.67	2.65	0.42	0.040
6	168	126	1.73	4.53	2.62	0.37	0.037
7	191	144	1.44	3.22	2.24	0.55	0.059
8	261	160	1.46	3.31	2.27	0.77	0.079

جدول 4

Wave event (WE#)	H (mm)	η_c (mm)	T_x (s)	λ (m)	C (m/s)	u (m/s)	S (-)
1	231	145	1.48	3.39	2.29	0.65	0.068
2	260	163	1.37	2.92	2.13	0.85	0.089
3	238	171	1.65	4.16	2.52	0.60	0.057
4	227	137	1.35	2.84	2.10	0.72	0.080
5	186	156	1.76	4.67	2.65	0.42	0.040
6	168	126	1.73	4.53	2.62	0.37	0.037
7	191	144	1.44	3.22	2.24	0.55	0.059
8	261	160	1.46	3.31	2.27	0.77	0.079

جدول 5

4 تاریخ زمانی اندازه گیری شده از حرکات موجی در شکل 8 آورده شده است و تنش های پی مرتبط با آن ها نیز در شکل 9 برای پی های بالا موج (LEG1) و پایین موج (LEG4) از مدل آورده شده اند. از لحاظ کیفی تمام پاسخ های

جهانی کلی نشان دهنده گوناگونی محدودی بین اجراهای پشت سر هم بودند. علیرقم این موضوع، فشارهای محلی اندازه گیری شده در نقاط مجزا عرشه، گوناگونی بیشتری در فضا، زمان، بزرگی و مدت داشته اند. این را می توان در شکل 10 دید، جایی که فرکانس های زمانی ترانسفورماتورهای فشاری PT8 و PT16 برای WE2 نشان داده شده است. با این وجود تفاوت های تاریخ های زمانی هر دو ترانسفورماتورهای فشاری یک روند رایج از سیگنال فشاری اثر، که آن را می توان به صورت افزایش شدید در بزرگی پس از یک کاهش آهسته تعریف کرد، واضح است.

مقادیر ماکزیمم بالا رفتگی موج های اندازه گیری شده در WP3، ماکزیمم و مینیمم تنش های پی و فشار ضربه در PT8 و PT16 در جدول های 6 تا 8 برای 4 آزمایش خلاصه شده اند. مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب گوناگونی نیز آورده شده است. مقادیر CV برای بالا رفتگی ماکزیمم اوج، به ترتیب 2.5٪ برای مثبت و 1.5٪ برای مینیمم بالا رفتگی موج است. مقدار CV کمتر از 3٪ برای تمامی رویداد های موجی گزارش شده در این مقاله بدست آمده است که نشان دهنده یک تکرار خوب از موج ساز می باشد. ترکیبات دینامیکی تنش های پی ماکزیمم و مینیمم نشان دهنده گوناگونی مشابهی برای WE2 (2.8٪) و گوناگونی بزرگتری برای WE3 است. در جایی که تنش های منفی به مقدار قابل توجهی گوناگونی بیشتری نسبت به تنش های مثبت داشتند.

بزرگی فشار اثر در طول اجراها با انحراف معیار تقریباً 1 کیلو پاسکال برای PT8 و 0.122 کیلو پاسکال برای PT16 (جدول 8) تفاوت زیادی داشت که با CV حداکثری 9٪ رابطه داشت، یا حدوداً سه برابر بزرگتر از ماکزیمم بالا رفتگی موج در همان رویداد بود. وجود اختلاف در گوناگونی پاسخ های اندازه گیری شده انتظار میرفت که آن را می توان به پاسخ فیزیکی غیر خطی ربط داد. پاسخهای غیر خطی بزرگ، عدم اطمینان بزرگ تری دارند، پس بنابراین تولید دوباره دقیق آن ها دشوار است. در حقیقت، هر پاسخ TLP به X ممکن است به عنوان یک متغیر احتمالی که به بالا رفتن موج Z در حالت کلی بستگی دارد، در نظر گرفته شود:

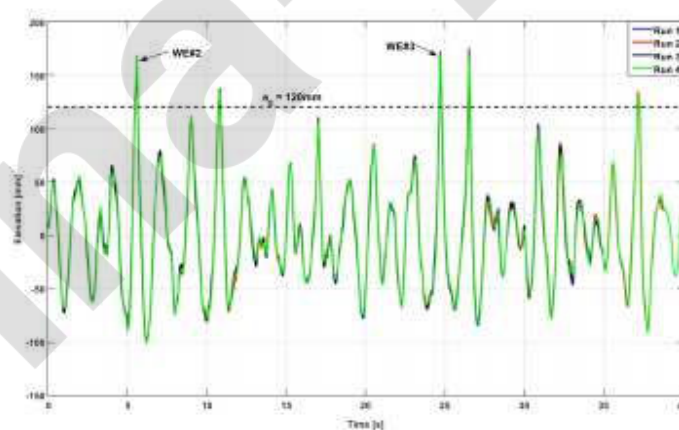
$$X = K(a, b, c, \dots)Z^a \quad (1)$$

که در اینجا $K(a,b,c,...)$ ضریب است که بستگی به تمامی پارامترهای فیزیکی مدل و رویدادهای موج مخصوص به جز بالارفتگی موج Z دارد. با خطی سازی تابع بالا در نزدیکی مقادیر مورد انتظار و بدست آوردن واریانس آن، رابطه زیر بدست میآید:

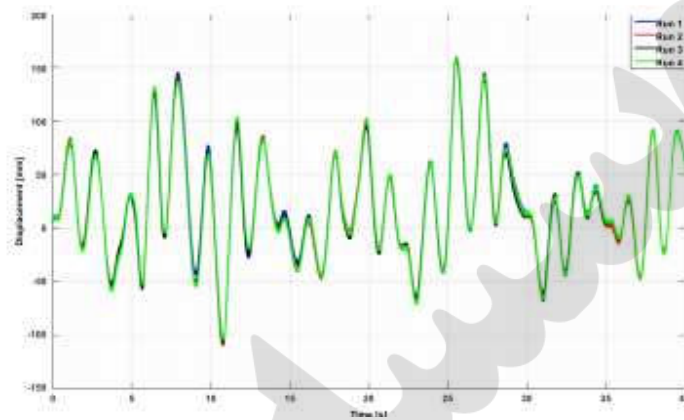
$$CV(X) \approx a CV(Z) \quad (2)$$

از این رو، با وجود اینکه فرم تابعی دقیقی از پاسخ مجهول است، اندازه متغیر وابسته غیر خطی در بالارفتگی موج می تواند از مقدار CV اندازه گیری شده استنباط شود. مقادیر قدرت، a ، نیز در جداول آورده شده است. واضح است که تنش های پی ماکزیمم حدودا با بالارفتگی موج در $WE2$ رفتاری خطی دارد در حالی که برای $WE3$ رفتار غیر خطی بالایی مشاهده می شود، مخصوصا برای تنش های مینیمم.

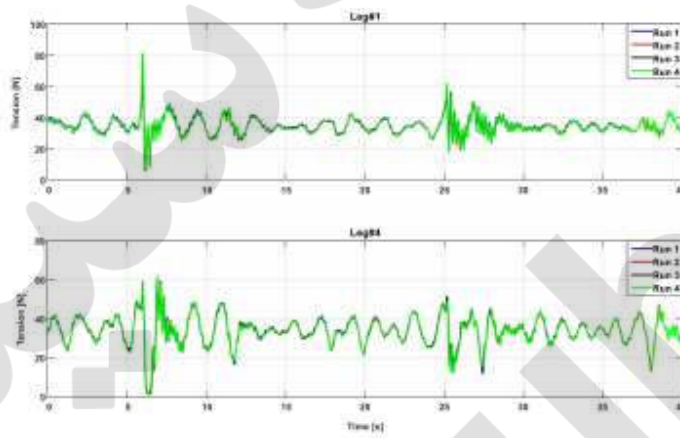
به همین شکل CV فشار اثر (جدول ۸) رفتاری غیر خطی دارد و با قدرت بین ۳ و ۴ ارتباط مستقیم دارد. گوناگونی فشار اندازه گیری شده توسط تمام ترانسفرماتور در اجراهای آزمایش مختلف را می توان از طرح موجود در شکل ۱۱ مشاهده کرد. شکل ۱۱ برای رویداد موجی $WE2$ می باشد. یک گوناگونی بالای به خصوصی (CV تا ۷۰٪ یا تا ۳۰) برای قسمت جلوی موقعیت عرشه $PT1$ و $PT6$ بدست آمد. این نشان دهنده یک رابطه غیر خطی بالای شدید با مقدار عددی بالای و همچنین یک مقدار بزرگی از تست های اجرا شده برای تولید مقادیر یکسان از فشار اثر برای چنین موقعیت هایی نیاز ماندقابل ذکر است که حضور مقیاس کوچک جریان هیدرو دینامیک بی ثبات و توربولانس ممکن است نقشی در گوناگونی مشاهده شده در اندازه گیری های فشار اندازه گیری شده $wave-in-deck$ در نقاط مجزا داشته باشد.



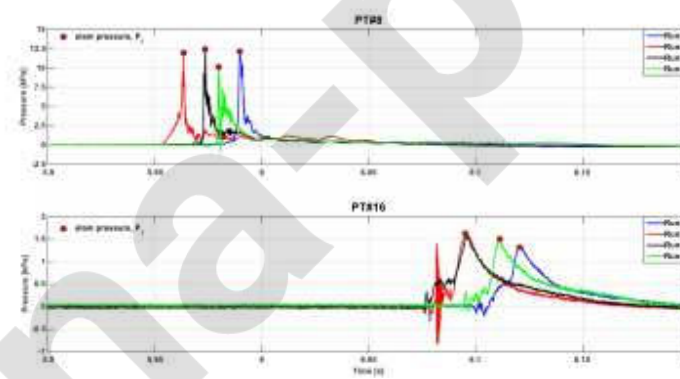
شکل 7



شکل 8



شکل 9



شکل 10

Run id	WE#2		WE#3	
	WP3 (+)	WP3 (-)	WP3 (+)	WP3 (-)
1	158	-100	163	-68
2	162	-97	169	-67
3	163	-98	171	-69
4	168	-100	170	-67
Mean (mm)	162.75	-98.75	168.25	-67.75
σ (mm)	4.11	1.50	3.59	0.96
CV (%)	2.53	1.52	2.14	1.41

جدول 6

WE#2 [$H = 260$ mm, $T_x = 1.37$ s]									
Leg#	Tension	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Mean	σ	CV (%)	α (-)
1	T_{max}	47.5	49.8	49.2	50.8	49.3	1.38	2.81	1.11
	T_{min}	-23.8	-23.3	-24.6	-23.3	-23.8	0.61	2.58	1.70
4	T_{max}	31.0	29.9	30.2	31.7	30.7	0.81	2.65	1.05
	T_{min}	-28.3	-28.5	-28.5	-29.1	-28.6	0.35	1.21	0.80
WE#3 [$H = 238$ mm, $T_x = 1.65$ s]									
1	T_{max}	29.7	30.2	27.8	31.2	29.7	1.43	4.80	2.2
	T_{min}	-9.6	-11.7	-7.8	-12.8	-10.5	2.22	21.22	15.1
4	T_{max}	18.1	18.4	21.2	18.7	19.1	1.42	7.44	3.5
	T_{min}	-13.0	-14.8	-13.5	-17.3	-14.7	1.92	13.12	9.3

جدول 7

PT#	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Mean	σ	CV (%)	α (-)
8	12.08	11.96	12.32	10.05	11.6	1.05	9.00	3.56
16	1.34	1.62	1.57	1.51	1.51	0.12	8.00	3.16

جدول 8

قابل ذکر است که حضور مقیاس کوچک جریان هیدرودینامیک بی ثبات و توربولانس ممکن است نقشی در گوناگونی مشاهده شده در اندازه گیری های فشار ضربه ای wave-in-deck در نقاط مجزا داشته باشد. با توجه به قطرستون های رینولدر 1.7×10^5 و 1.2×10^5 برای WE2 و WE3 تخمین زده شد. طرح های مرتبط با تمامی رویدادهای موجی بررسی شده در ضمیمه A آورده شده است.

۶ نتایج و بحث

نتیجه یک مجموعه از نتایج کامل برای تمامی رویدادهای موجی، شامل تاریخچه زمانی بالا رفتگی موج در لبه جلویی عرشه و پشتی، حرکت موجی سکو و تنش‌های پی در ضمیمه A آورده شده. در این بخش فقط نتایج انتخاب شده برای پشتیبانی کردن از تفسیر رفتار مشاهده شده TLP مورد بحث قرار می‌گیرد.

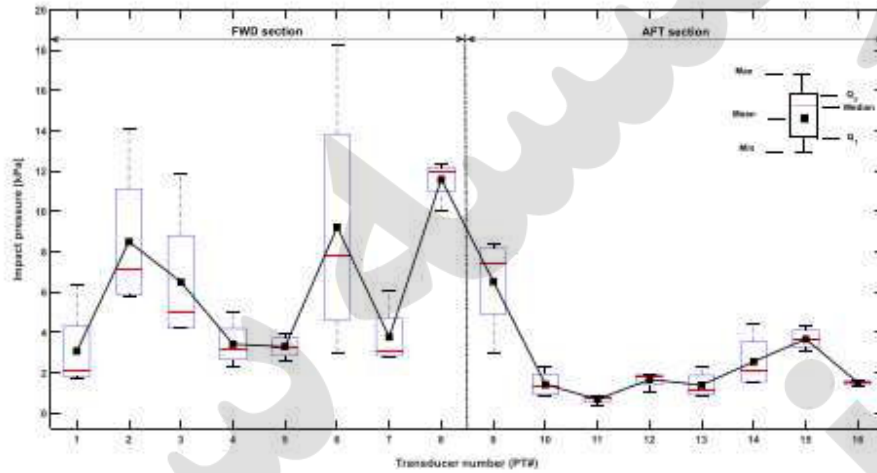
۶.۱: دینامیک‌های مدرن تحت تاثیر اثر wave-in-deck

تاریخچه زمانی بالا رفتگی موج در جلو و لبه پوشتی عرشه، رفتار موجی سکو و تنش‌های پی در شکل ۱۲ برای WE1 آورده شده است. برای تفسیر دینامیک‌های سکو، مهم است که پارامترهای مختلفی را معرفی کنیم که به صورت شماتیک در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. در این شکل موقعیت عرشه در سیستم مختصاتی محلی (X, Z) با مرکزیت لبه جلوی سکو در شرایط استاتیکی شرح داده شده. این پارامترها به شکل زیر هستند

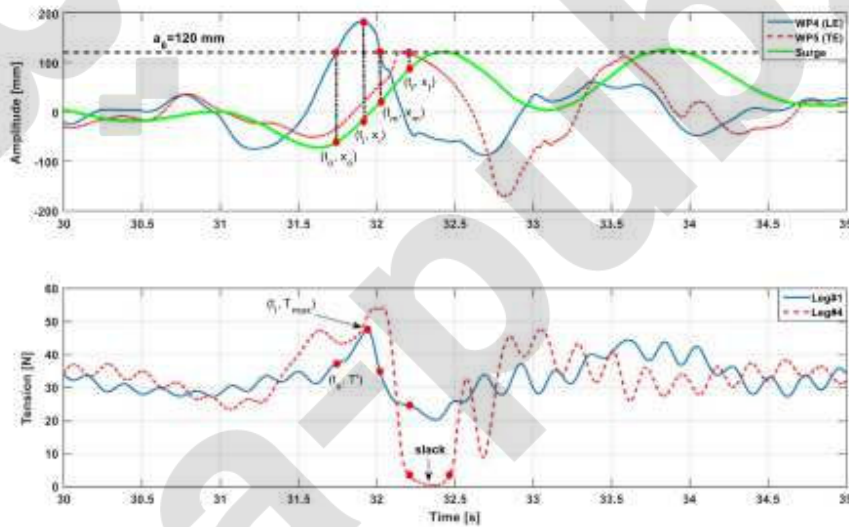
- T_0 : زمان آغاز تماس هنگامی که موج با لبه جلویی تماس می‌کند
- t_i : زمانی است که پی بالای موج بیشترین تنش را به طوری که قله موج با لبه جلویی سکو تماس پیدا می‌کند.
- t_m : زمان پایانی تماس با لبه جلوی عرشه زمانی که موج از لبه جلویی جدا شده و در طول عرشه گسترده می‌شود.
- t_f : زمان پایان تماس با لبه پشتی سکو زمانی که موج عرش را رها می‌کند و از عرش جدا می‌شود.
- $X(t)$: مختصات افقی لبه جلویی عرش نسبت به شرایط استاتیکی در نمونه زمانیه مرتبط است.
- زمانی که تنش پی بالا موج به $dt = t_i - r_0$ می‌رسد.
- زمان تقاطع با لبه جلویی سکو $dt = t_m - t_0$
- صوت موج افقی سکو در تماس اولی U_0
- صورت مجی یه سکو در زمان تنش ماکسیمم در پی بالا موج $U = dx/dt$
- صورت افقی نسبیه قله موج و سکو U_0
- صورت افقی قله موج استفاده شده در این پارامتر بصورت تقریبی اندازه‌گیری شده است که برای هدفه مقایسه کردن آن با صورت مجی سکو کافی است. $U = dx/dt$

با در نظر گرفتن شکل‌های ۱۲ و ۱۳ سکو نسبت به رویداد wave-in-deck را می‌توان در ۴ مرحله توصیف کرد

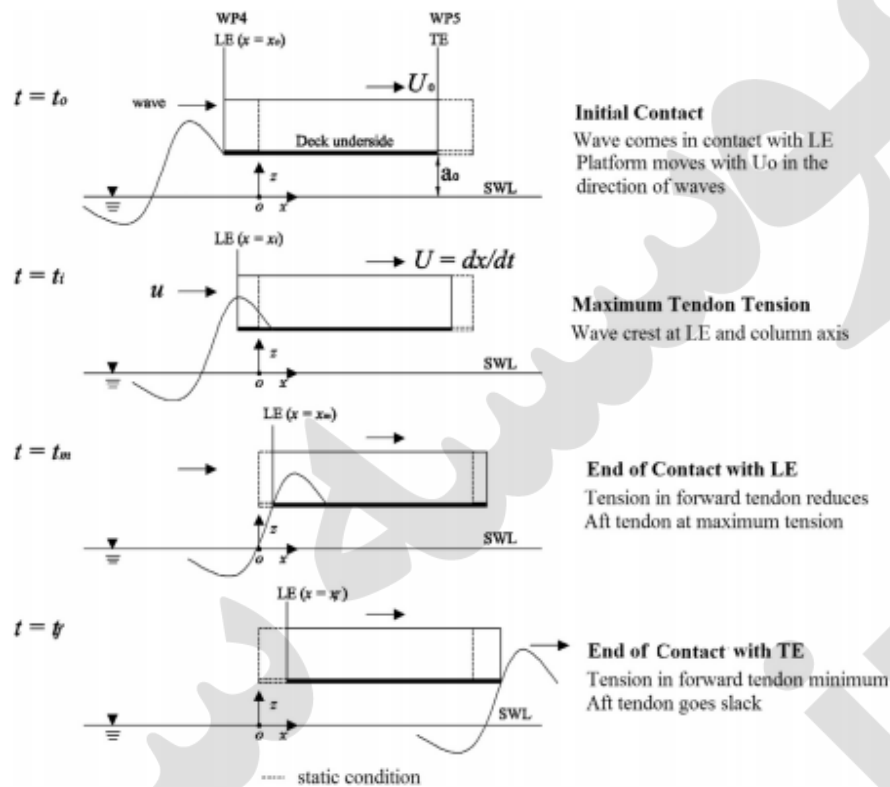
- در زمان $t_0=31.74$ (شکل ۱۲) موج با لبهٔ جلویی سکو تماس پیدا کرد که در $z=a_0=120\text{mm}$ اتفاق افتاد. عرش در $x_0=-61.28\text{mm}$ قرار داشت به طوری که نقطه آغازین مدل به سمت موج بود و در حال حرکت در جهت X با $U_0=0,09\text{m/s}$ بود. پی بالای موج (؟؟) متهم افزایش $T'=T_0+\hat{c}$ شد.



شکل 11



شکل 12



شکل 13

- در زمان $t_i = 31.90$ s (شکل 12) پی بالای موج تحت تنش حداکثری ($T_{max} = 48.00$ N) این زمانی بود که قله موج هنوز با لبه جلوی عرشه در $x_i = -19.95$ mm تماس بود. مدل اکنون با سرعت بالاتری $U = dx/dt = 0.30$ m/s در حرکت بود و سرعت افقی نسبی ($u_r = u - U$) بین قله موج و مدل ۰٫۳۹ متر بر ثانیه بود. در زمان $t_m = 32.03$ s قله موج در حال ترک لبه جلویی سکو بود که در موقعیت $x_m = 21.40$ mm قرار داشت. در طول این مدت زمان $(t_m - t_i = 0.13$ s) تنش در پی بالای موج به صورت ناگهانی کاهش پیدا کرده و تقریباً به مقدار مشابهی با مقدار T' که در تماس اولی تجربه شد می‌رسد. به همین صورت بارهای ناگهانی در تنش بالای موج wave-in-deck تقریباً برای 0.28 ثانیه در مقیاس مدل (3.13 در مقیاس اصلی) به طول انجامید.
- در زمان $t_f = 32.03$ ثانیه (شکل 12) موج به صورت مماسی در حال ترک لبه پشتی سکو است $x_f = 93.40$ mm می‌باشد. از این روا سکو ۱۵۴٫۶۸ میلی متر (۱۹٫۳۳ در مقیاس اصلی) در مسیر موج در طول اثر موج طی کرد. این

حرکت موجی فقط ۴,۵ درصد طول موج را نشان می‌دهد. پی پایین مجی (LEG4) تحت تنش خیلی کم (۳,۶۰) بود در حالی که تنش در پی بالا مجی همچنان کشش پیدا کرد (۲۴,۹۳) و مدل یک حرکت پرتبی بزرگی را به مقدار تقریباً (۸۰ درصد) را تجربه کرد.

Wave event (WE#)	T_z (s)	u (m/s)	x_0 (mm)	x_1 (mm)	dt (s)	U_0 (m/s)	U (m/s)	u_z (m/s)	dt_{1x}/T_z (%)
1	1.48	0.65	-61.28	-19.95	0.16	0.09	0.26	0.39	19
2	1.37	0.85	-3.44	20.64	0.06	0.32	0.37	0.48	9
3	1.65	0.60	27.17	62.59	0.09	0.30	0.39	0.21	9
4	1.35	0.72	10.88	34.38	0.09	0.24	0.27	0.45	11
5	1.76	0.42	-33.46	-15.27	0.12	0.09	0.15	0.27	16
6	1.73	0.37	-55.83	-36.55	0.08	0.14	0.24	0.13	10
8	1.46	0.77	-47.43	-5.86	0.14	0.16	0.30	0.47	20

• جدول ۹

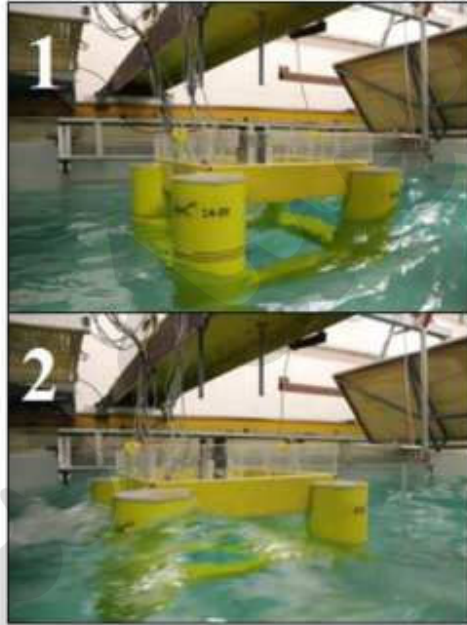
در شک ۱۲ می‌توان مشاهده کرد که تنش‌های مینیمم در هر دو پی‌ها بد از زمان tf اتفاق افتاد هنگامی که پی پایین موج ضعیف شد. سپس یک افزایش سریع در تنش و تعدادی نوسان $ringing$ در پی پایین موج ایجاد شد. پی بالا مجی نیز پاسخ $ringing$ با ارتفاع کمتری را نشان داد.

جدول ۹ تمامی پارامترهای کلیدی موج و پاسخ مدل برای تمامی رویدادهای موجی متوسط در طول اجراهای متعدد را خلاصه کرده است. مشاهدات زیر به عمل آمد:

• در تمامی رویدادهای اثر موج، در زمان تماس ابتدایی موج با عرش، مدل همواره در جهت مثبت مثبت X در حرکت بود. سرعت مدل U_0 در بین بازه $0.09-0.32$ متر بر ثانیه بود. حتی اگر سکو در روبروی موجها قرار داشت باز هم با موجها حرکت میکرد. این رفتار احتمالاً از نیروهای هیدرودینمیکی مجی بر روی ستونها و پتمها به محض اثر عرش نشأت می‌گیرد.

در تمامی رویدادهای موجی سرعت موجی مدل به مقدار بالاتری $U=0.15-0.39$ m/s در طول فاز فعال رویداد $wave-in-deck$ افزایش یافت (dt). در نتیجه سرعت افقی نسبی u_r ، بین قله موج و عرش همواره در مقایسه با مقادیر ابتدایی در شرایط یکسان برای یک سازه فیکس شده کوچکتر بود. این کاهش در سرعت نسبی به طور متوسط ۵۰ درصد در مقایسه با صورت ذری موج در قله موج مختل نشده بود.

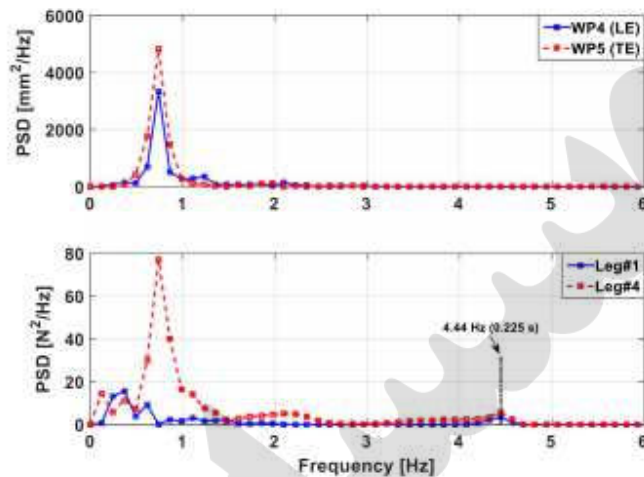
- به طور میانگین ، مقدار موج در تماس باقی مانده با قسمت جلویی عرش در طول زمان ۱۳ درصد Tz باقی ماند، و در طول این زمان ، تنش بالای موج بیشترین مقدار بر گذاری را تجربه کرد



شکل 14

Waver event (WE#)	Minimum tension, T_{min} [N]	Slackness duration, t_{slack} [s]	t_{slack}/T_x [%]	Max pitch angle (°)
1	0.46	0.30	20	0.80
2	1.78	0.34	25	0.67
8	1.41	0.25	17	0.65

جدول 10



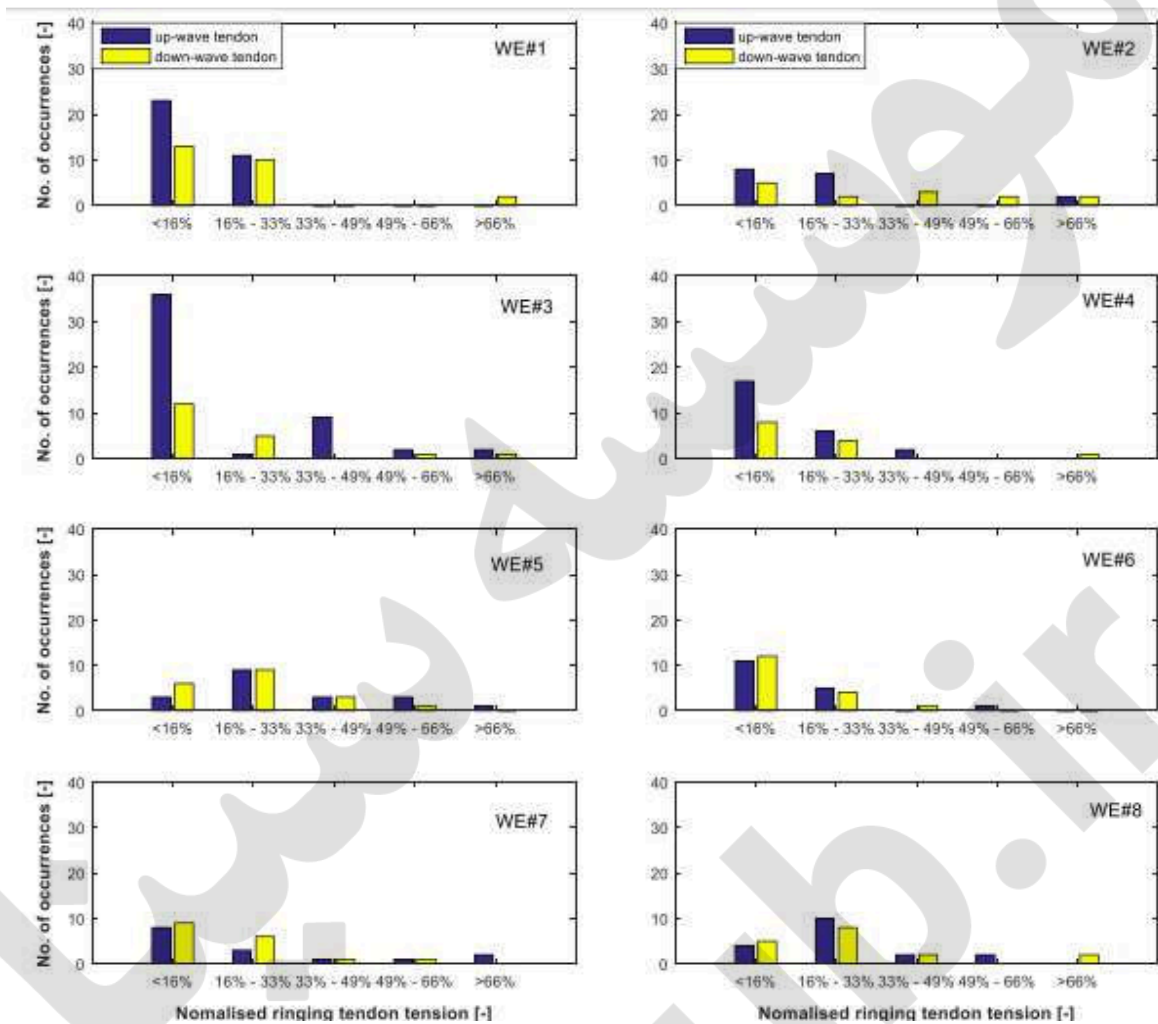
شکل 15

- رویدادهای موج مشابه (WE8 و WE2) دینامیک‌های مدل مشابهی را در خصوص سرعت نسبی ایجاد کرد. با این وجود اختلاف‌ها در $dtLE/Tz$ بدست آمد که میتواند به تفاوت در Tz و موقعیتها $x0$ اولیه بین رویدادهای موجی مختلف نسبت داد.
 - در تمامی رویدادهای موجی آزمایش شده، تجاوز قلّه موج اندازه‌گیری شده در لبه جلویی سکو همواره بیشتر از لبه پشتی بود. این نشان دهنده در ساده پراکنش تولید شده توسط خود عرش است.
- شکل ۱۴ نشان دهنده اثر متقابل بین ؟؟؟ و مدل در طول فازهای ورودی و خروجی آب است.

6.2 شرایط های پی ضعیف

شرایط پی ضعیف در پی پایین موجی به علت رویداد های موجی WE1، WE2 و WE8 مشاهده شد. مدت زمانی که پی پایین موجی ضعیف باقی ماند (t slack) بین 0.25 تا 0.35 ثانیه در مقیاس مدل و 3 تا 4 ثانیه در مقیاس اصلی بود. این زمان ها در جدول 10 خلاصه شده اند. با داشتن رابطه مستقیم با اندازه گیری های پی ضعیف، یک پاسخ پرتابی بزرگ نسبی با زاویه پرتاب در جهت پایین موج بین 65 تا 80 درجه اندازه گیری شد. جوهانسن نیز یک زاویه پرتاب بزرگی را (0.3 درجه) در حین آزمایش مدل SNORRE-A TLP زمانی که مدل به یک تجاوز عرشه ای بزرگ مرتبط بود مشاهده کرد. علاوه بر این، جوهانسن شبیه سازی CFD برای SNORRE-A TLP در مقیاس اصلی با

استفاده از 2 حالت موجی معمولی شدید شامل ؟؟؟؟؟ بدست آورد. در ؟؟؟؟ (در حدود 3 متر تجاوز عرشه زمانی که پراکنش و اثرهای فرازجوشی را در نظر بگیریم)، حرکات پرتابی سکو در حدود 0.3 درجه بدست آمد. از آن جایی که تجاوز عرشه در مقیاس واقعی برابر در WE1، WE2 و WE8 در این تحقیق بزرگ تر از 3 متر در مقیاس اصلی گزارش شده اند، که حدودا 2 برابر بزرگتر از آن چه جوهانسن بدست آورد، پاسخ های پرتابی ماکزیمم بزرگ تر توجیه شده هستند. با اندازه گیری های تنش پی، بالا رفتگی موج در جلو و عقب سکو به ما نشان می دهد که این رویدادهای موجی باید باعث ایجاد نیروهای به خصوصی بر روی مدل شده باشند، که از اثر عرشه نشات گرفته اند. با توجه به مطالعات دیگر انجام شده بر روی مشکلات اثر wave-in-deck در عرشه های ثابت، نیروی رو به پایین روی عرشه را شناسایی کردیم، که بزرگی آن ها می تواند به بزرگی ترکیب نیروی رو به بالا باشد. شارنکه و عبدولصمیع بزرگی نیروی رو به پایین را به حجم اضافه شده در اطراف سازه عرشه، در جهت X و Z نسبت می دهند که به سمت پایین در این زمان شتاب می گیرد. از این می توان برداشت کرد که نیروی مکش به مقادیر قابل توجهی از جریان رو به پایین آب از زیر عرشه، زمانی که موج بعد از اثر عرشه را ترک می کند، بستگی دارد. کاهش آنی که ابتدا در ستون های شناور پشتی عرشه پس از اثر عرشه اتفاق می افتد می تواند یک فاکتور سهمیم باشد.



شکل 16

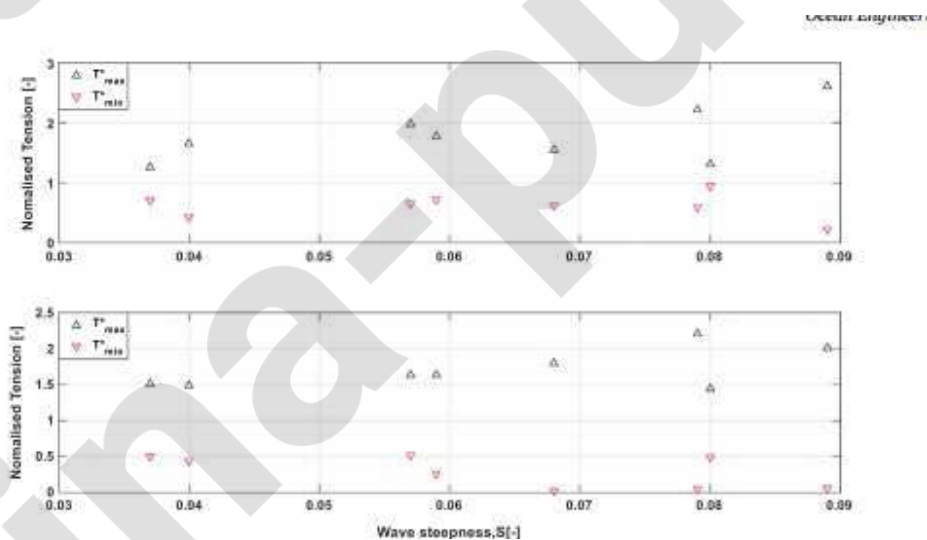
6.3 پاسخ ringing پی

در تمامی رویداد های موج، مدل TLP حرکات عمودی متناوبی را در طول دوره ای نزدیک به بالا آمدن طبیعی اش (0.225 ثانیه) تجربه کرد که این را به اسم ringing می شناسیم. پاسخ ringing گذرای کوتاه مدت در پی های بالا و پایین موجی مشاهده شد. طیف های انرژی هر دو تنش پی برای رویداد موجی WE1 برای پنجره زمانی 31.9 تا 40 ثانیه در شکل 15 آمده است. شکل نشان دهنده انرژی به خصوصی در اطراف فرکانس طبیعی بالا آمدن می باشد، در جایی که طیف بالا آمدگی موج (که توسط WE4 اندازه گیری شد) تقریباً در این فرکانس هیچ گونه محتوی ای نداشت. این نشان میدهد که ringing پی اکثراً توسط اثر wave-in-deck به وجود آمده است.

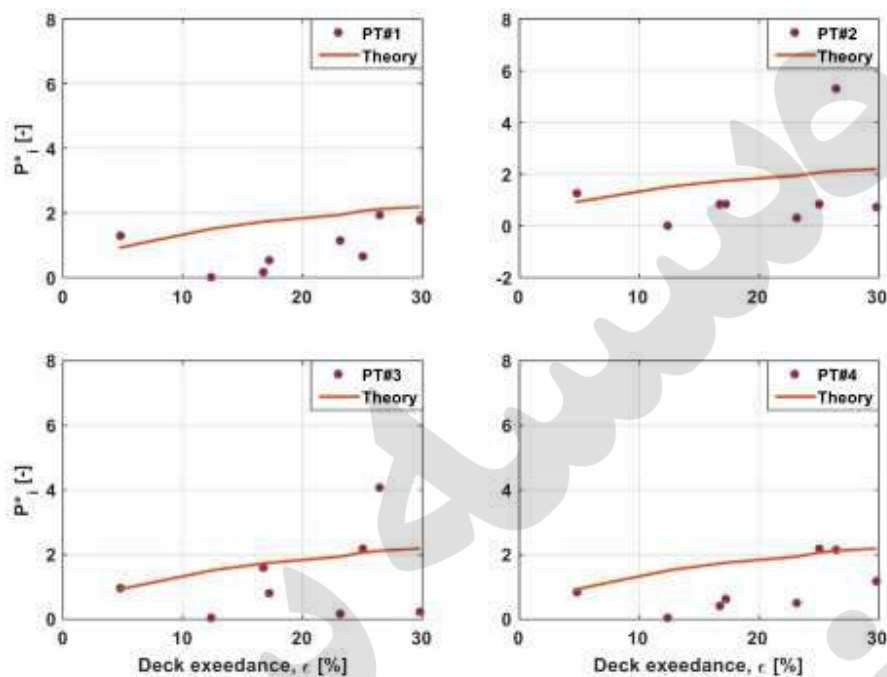
نتایج بیشتر، که در ضمیمه A آمده است، نشان می دهد که پاسخ ringing تقریباً در تمامی رویداد های موجی حاضر بود. در مواقعی که TLP به اثر wave-in-deck تکی مربوط بود، ringing در تاریخ زمانی پی فقط پس از نقطه تنش پی مینیمم مشاهده شد. در مواقع نادری که TLP به 2 اثر wave-in-deck پشت سر هم مرتبط بود، پاسخ ringing به وجود آمده توسط موج پیشین در طول تمام تاریخ زمانی از اثر بعد از تنش پی مینیمم قابل مشاهده بود. در بعضی مواقع محتوی با تکرر بالا در تنش پی، قبل یا حتی بدون حضور اثر wave-in-deck مشاهده شد. در این شرایط، دشوار است که پاسخ ringing به وجود آمده توسط رویدادهای wave-in-deck را از پاسخ های کشسانی به وجود آمده توسط بارگذاری موجی نظم دوم با نکرر مجموع، تفکیک کنیم. زیرا چنین آنالیز هایی خارج از حوزه این تحقیق می باشد. حرکات با فرکانس بالا و تنش های دینامیکی سکو را می توان به طور کلی به ringing اشاره داد.

WE#	H (mm)	T_z (s)	S (-)	Tension in Leg#1 (N)		Tension in Leg#4 (N)	
				T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}
1	231	1.48	0.068	47.08	18.83	54.33	0.46
2	260	1.37	0.089	79.69	6.66	61.11	1.78
3	238	1.65	0.057	60.13	19.92	49.51	15.75
4	227	1.35	0.080	39.90	28.70	43.73	14.90
5	186	1.76	0.040	50.48	13.04	45.30	13.43
6	168	1.73	0.037	38.30	21.67	45.82	15.27
7	191	1.44	0.059	53.78	22.00	49.64	8.00
8	261	1.46	0.079	67.63	17.99	67.34	1.41

جدول 11



شکل 17



شکل 18

به منظور محدود کردن پاسخ های ringing مرتبط با رویداد های موجی، راه های زیر استفاده شد:

- مدت ringing توسط تعدادی از نوسانات مشاهده شده در تاریخ زمانی تنش پی تا پاسخ تنش نوسانی تقریباً به صفر رسید.
 - بزرگی ماکزیمم و مینیمم هر کدام از نوسانات مشاهده شده استخراج شد و بازه تنشی (Tr) مشاهده شد.
 - بازه های تنشی سپس توسط پیش تنش های پی به صورت عادی در آمد. (تنش پی ringing عادی شده $T^*r = Tr/T0$) و طبق تعداد باری که اتفاق افتادند گروه بندی شده اند.
- مثال هایی از پاسخ های ringing شناسایی شده در رویداد های موجی WE1 و WE8 برای پی های بالا موج و پایین موج در شکل 16 آورده شده اند.
- در اکثر مواقع، همانطور که انتظار می رفت، تعداد وقوع (N) به صورت معکوس با بازه تنش پی برای هر جفت پی ها متناسب است. وقایع موجی WE3 و WE1 بزرگ ترین مقدار وقایع پی ringing را، در پی بالا موجی به صورت خاص، با بازه تنشی ringing بیش از 15٪ پیش تنش پی را به وجود آورد. یک خاصیت به خصوص از رویداد موجی WE3،

همانطور که در شکل 7 نیز نشان داده شده است، دومین موج سرازیر متوالی بود که دلیل احتمالی به وجود آمدن بالا آمدن نوسانی بلندتر در سکو بود. این مشاهدات نشان داد که هنگامی که به نظر می رسد سکو دومین اثر عرشه را توسط موج های بزرگ متوالی از دست بدهد، این موج می تواند به صورت گسترده ای به تمدید پاسخ پی با تکرر بالا مرتبط باشد.

به طور میانگین، بزرگی بازه ringing در LEG1 و LEG4 در تمامی رویداد ها به یک مقدار بود. از طرف دیگر، پاسخ ringing مشاهده شده در پی بالا موج LEG1 به نظر شدید تر از پی پایین موج LEG4 بود. این مشاهدات با مقادیر بالا تری از فشار ضربه ای اندازه گیری شده در طول بخش جلویی زیر عرشه در اکثر مواقع به خوبی مرتبط بودند.

6.4 تنش مینیمم و ماکزیمم

بزرگی تنش پی ماکزیمم و مینیمم اندازه گیری شده در اجراهای تکرار شده در جدول 11 خلاصه و میانگین گیری شده است. تنش ماکزیمم در پی های بالا موج و پایین موج مرتبط با هر رویداد موجی حدودا از سطح یکسانی هستند، به جز وقایع موجی WE1 تا WE3، بدون این که روندی واضح از تنش بالا تری را توسط پی بالا موج و پایین موج تجربه کنیم. تنش مینیمم در LEG4 به صورت قابل توجهی کمتر از LEG1 هست، به خصوص در وقایع موجی WE1، WE2، WE8، زمانی که پی پایین موج ضعیف می شود. به منظور مقایسه کردن تنش های شدید، آن ها را با استفاده از پیش تنش های پی، $T_0=30.4 \text{ N}$ ، ساده کردیم. تنش ماکزیمم ساده شده $(T^*_{max}=T_{max}/T_0)$ و تنش مینیمم $(T^*_{min}=T_{min}/T_0)$ در شکل 17 بر خلاف شیب موج نشان داده شده است. در اکثر شرایط، T^*_{max} ، با شیب موج افزایش پیدا می کرد، اما این روند بسیار قابل ملاحظه نبود. به طور قابل ملاحظه ای، دو وقایع WE2 و WE3 بیشترین تنش پی را که حدودا 2.5 برابر پیش تنش بود، به وجود آورد. قابل ذکر است که از همه رویداد های موجی مطالعه شده، تنش پی ماکزیمم در پی بالا موج در رویداد موجی WE2 اتفاق افتاد که توسط بزرگ ترین شیب موجی مشخص شد، نه بلندترین قله موج. برای تنش ماکزیمم، یک روند به گونه ای بود که هر چه پی پایین موج تنش کمتری را با افزایش شیب موج تجربه می کرد. تنش مینیمم در پی بالا موجی تغییر قابل توجهی نداشت. همانطور که قبلا اشاره شد، رویدادهای موجی WE1، WE2، WE8 و تنش مینیمم کمتری را در طول رویدادهای موجی دیگری

که می توانیم به زاویه پرتاب بزرگ تر مشاهده شده در طول چنین وقایع موجی نسبت دهیم، ایجاد کرد. (جدول 10). مشاهده دیگری که کردیم این بود که در تمامی رویدادهای موجی بررسی شده تنش پی مینیمم در رویداد موجی WE1 اتفاق افتاد که توسط ارتفاع قله ملایم و همچنین شیب موج میانه مشخص میشد. این نشان می دهد که انتخاب رویداد موجی به خصوصی که ممکن است بیشترین یا کمترین تنش را ایجاد کند (شامل شرایط پی ضعیف)، که برای طراحی TLP مورد نیاز است، کار راحتی نیست و بازه ای از رویداد های موجی یا ضوابط دیگری نیز باید مورد بررسی قرار گیرد.

6.5 فشار ضربه ای wave-in-deck

مقادیر فشار اندازه گیری شده P_i توسط فشار موج هیدرواستاتیک ساده شده اند:

$$P_i^* = \frac{P_i}{\rho g \eta_c} \quad (3)$$

که ρ چگالی، g شتاب گرانشی، η_c ارتفاع قله برای هر رویداد موجی اندازه گیری شده توسط WE3 بر قسمت جلویی مدل است. میانگین فشارهای ماکزیمم ساده شده در طول اجراهای موجی مکرر برای همه رویدادهای موجی برای مناطق عرشه 1 تا 4 در جدول های 18 تا 21 آورده شده است. زمانی که فشار به عنوان یک تابع از تجاوز عرشه نسبی در نظر گرفته شود، $\epsilon = 1 - a_0/\eta_c$ ، روند رو به رشد با افزایش تجاوز نسبی واضح است که با ارتفاع قله موج رو به افزایش در مقایسه با تریخ عرشه آب ساکن نسبت دارد. همان شکل، نتایج آزمایش انجام شده را با نتایج بدست آمده Wang برای فشار بالا برنده موجی ماکزیمم بر روی یک صفحه افقی مقایسه می کند. نتایج وانگ برای فشار اثر موجی ماکزیمم به یک فرمول ساده ختم میشود:

$$P_i^* = \frac{P_i}{\rho g \eta_c} = \pi \tanh(kd) \sqrt{1 - \left(\frac{a_0}{\eta_c}\right)^2} \quad (4)$$

که d عمق آب، k عدد موج ($2\pi/\lambda$) و λ طول موج است. برای رویداد های موجی مجزا مقادیر مختلف در جدول 5 آورده شده است. به علت این که مطالعات وانگ محدود به صفحه صاف ثابت است، کاربرد آن برای سازه های شناور

قابل بحث است. با این وجود، مقایسه های اشکال 18 تا 21 نشان می دهد که روند فشار های اندازه گیری شده به طور کلی با فرمول ونگ مشابه است، حتی اگر نتایج اندازه گیری مختلفی مشاهده شود. یک توضیح ممکن برای این مشاهدات می تواند در این حقیقت باشد که پاسخ های عمودی (بالا آمدن) TLP همیشه کوچک است و گردش های افقی (موج بلند) در طول یک اثر در مقایسه با طول موج، کم است. از این رو با وجود این که پاسخ های TLP موجی بر روی فشار اثر می گذارد و معادله وانگ به طور کلی برای همه رویداد ها کارآمد نیست، زمانی که چندین رویداد اثر با خواص موجی و فازهای متفاوت به عنوان روندی برای گرایش های فشار اثر عرشه متوسط به منظور نزدیک شدن برای سازه ثابت می باشند، اما با گوناگونی وسیع تری. تحقیقات بیشتری برای تایید یا رد کردن این موضوع مورد نیاز است.

تحقیقات تجربی نشان می دهد که فشار اثر در قسمت جلویی عرشه از قسمت عقب عرشه بزرگتر می باشد، به جز در PT1,16 و PT2,15. (نزدیک ستون ها و انتهای عرشه، جایی که روند معکوس است). با مقایسه فشار بین مناطق جلو و عقب ستون ها، در اکثر مواقع، فشار نزدیک قسمت انتهایی سکو بیشتر از قسمت انتهایی جلو می باشد (جایی که فشار در PT16 بزرگ تر از فشار در PT1، PT15 و PT2 می باشد). این می تواند به خاطر این که فراز جوشی موج در اطراف ستون های عقبی ا و اثر پایین آمدن سکو بزرگ تر است، باشد.

6.6 روابط بین تنش پی و فشار اثر

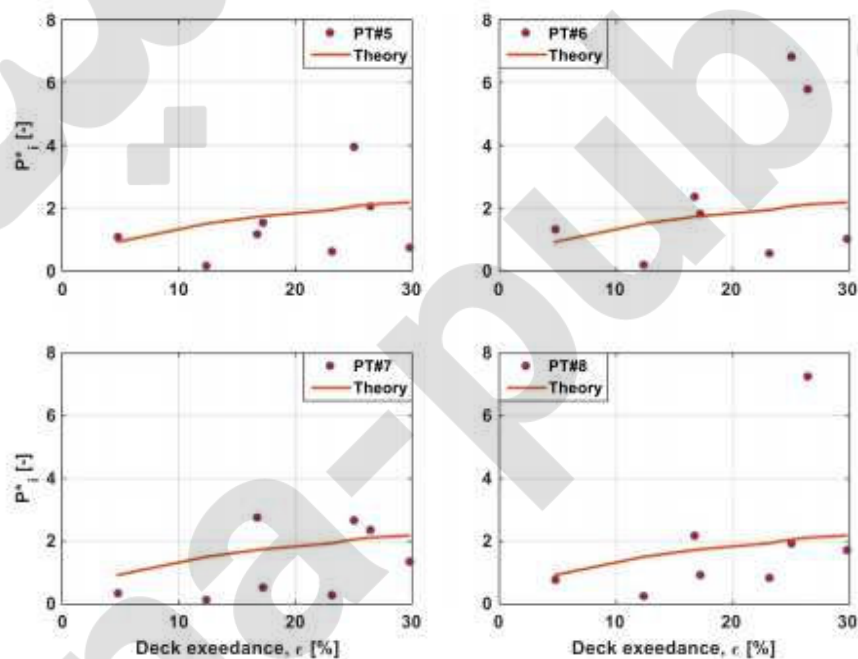
مقدار حداکثری تنش های پی و فشارهای محلی در مناطق جلویی و عقبی در شکل 22 آورده شده است. این شکل نشان می دهد که روابط بین تنش پی ماکزیمم و فشار محلی اندازه گیری شده در اطراف ستون های زیرین عرشه قرار دارند. با در نظر گرفتن نیروهای کششی حرکتی، بزرگی فشار ضربه ای wave-in-deck ممکن است به صورت مخصوصی به تنش پی ماکزیمم مرتبط باشد، همانطور که در تعدادی از رویداد های موجی بررسی شده در این تحقیق واضح بود. برای تایید این اکتشاف، تحقیقات بیشتری مورد نیاز است.

7 نتیجه گیری

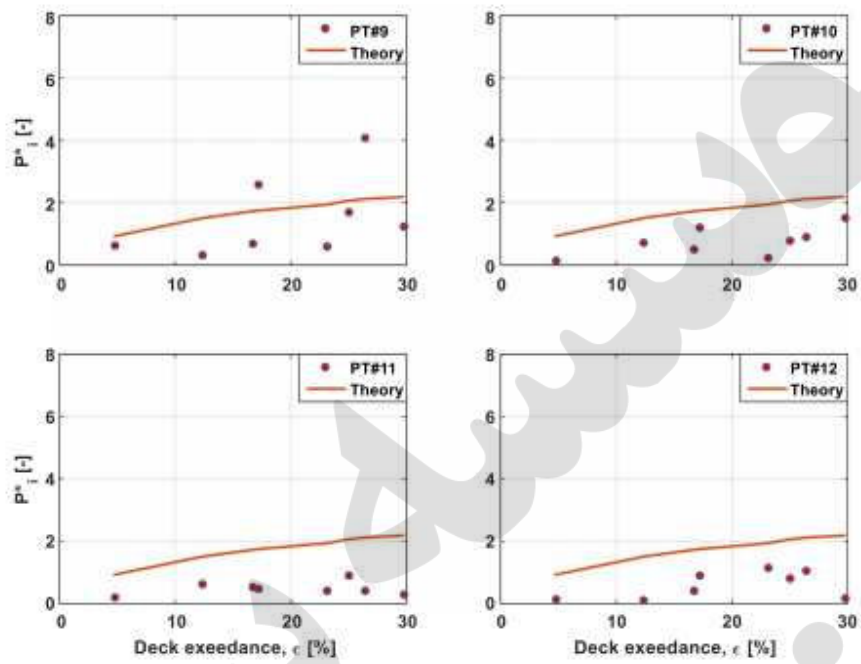
این تحقیق تجربی یک سری اطلاعات جزئی را بر روی رفتار کلی TLP به خاطر رویدادهای wave-in-deck در موج های غیر طبیعی فراهم کرد که می توان از آن برای آنالیز درجه بندی و مدل های CFD استفاده کرد. تحقیقات آزمایشات مدل بر روی فعل و انفعالات موج های غیر معمولی، بدون در نظر داشتن باد و جریان آب تمرکز داشت. اندازه گیری ها و مشاهدات پاسخ های مدل نیز نتایج مختلفی را نشان داد. در زیر فقط به یک خلاصه کلی از نتایج می پردازیم

7.1 گوناگونی اندازه گیری ها در آزمایش مدل

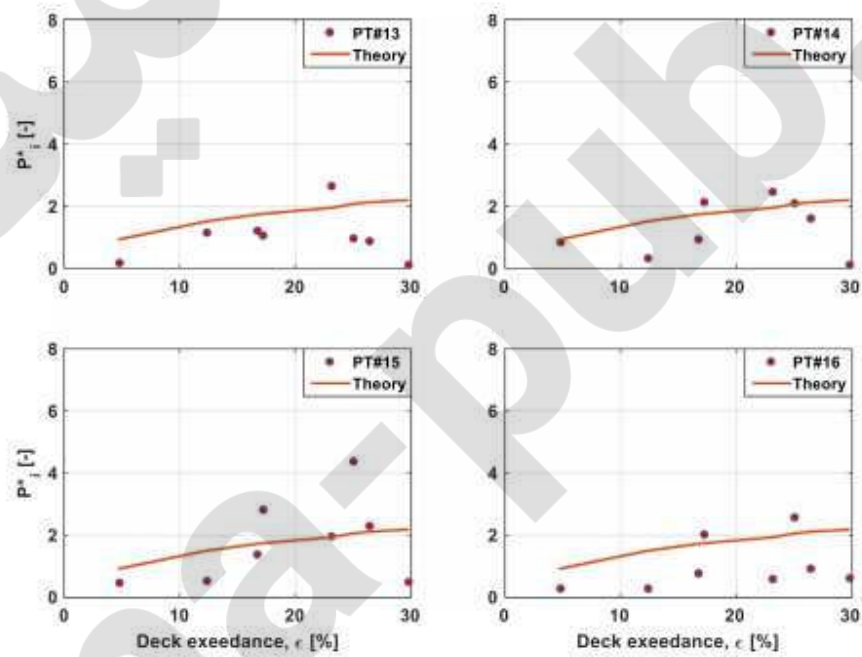
بر طبق اجزای تست مکرر با امواج پشت سر هم مشابه فهمیدیم که بالا آمدگی موج، تنش پی و حرکت موجی سکو گوناگونی محدودی دارند. برای فشارهای اثر، این گوناگونی سه فاکتور مهم است. این یک درجه بالاتر غیر خطی از پاسخ های فشار اثر را حتی زمانی که 5 اجرای متوالی برای هر شرایط مختلف آبی را تایید میکند. همچنین پیشنهاد میشود که یک سری اجزای کافی برای بدست آوردن گوناگونی فشار اندازه گیری شده انجام دهیم.



شکل 19



شکل 20

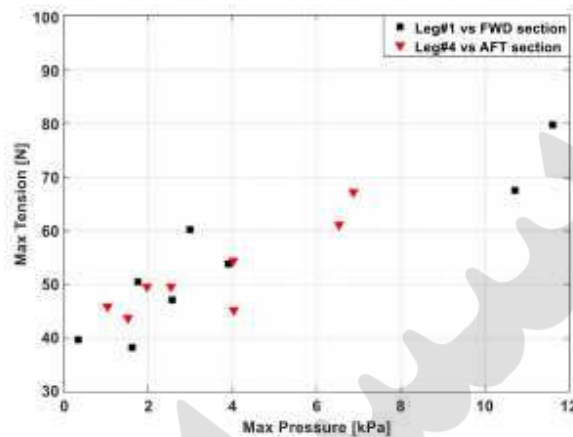


شکل 21

7.2 دینامیک های سکو و تنش های پی تحت اثر موجی شدید

در تمامی رویداد های موجی شدید، قبولی سکوی شناور در مسیرهای افقی به نظر میاید که دارای اثری مثبت به وسیله کاهش سرعت افقی نسبی و بالا بردن اثر افقی wave-in-deck در مقایسه با سازه ثابت داشته باشد. تنش ماکزیمم در پی بالا موج معمولا زمانی اتفاق می افتد که قله موج به لبه جلویی سکو و جلوی ستون ها برسد. تنش ماکزیمم در پی پایین موج تقریبا همزمان اتفاق می افتد و در بعضی از مواقع از تنش در پی بالاموج فراتر هم می رود. به طور میانگین، موج با لبه جلویی سکو در حدود 13٪ مدت موج در تماس است، که چیزی در حدود 2.2 ثانیه در مقیاس اصلی است. در این مدت، پی بالای موج بیشترین بارگذاری را تجربه می کند. رد بسیاری از مواقع، پی پایین موج یک کاهش ناگهانی در تنش را تجربه می کند که تا نزدیکی صفر می رود، که با زاویه پرتاب نسبتا بزرگی در مسیر پایین موج همزمان می باشد که به سمت نیروی مکش هیدرودینامیکی که در زیر عرشه پس از اثر اولیه اشاره دارد. این نتایج که توسط نتایج تحقیقات تجربی دیگر محققان که بر روی نیروهای اثر wave-in-deck بر روی سکوهایی ثابت تحقیق کرده اند تایید می شود نشان داد که بزرگی نیروی رو به پایین تولید شده توسط قوه آب در حال جریان به بزرگی نیروی اثر رو به بالا باشد. کاهش آبی در شناوری ستون های جلویی پس از اثر عرشه می تواند یک فاکتور سهمیم برای ضعیف شدن پی باشد. شرایط پی ضعیف برای حدود 3 تا 4 ثانیه در مقیاس اصلی طول کشید. این اگر در مقیاس اصلی باشد ممکن است به قطع شدن و شکست پی از سکو ختم شود.

تنش های ماکزیمم و مینیمم تجربه شده توسط پی های پایین و بالا موج با شیب موج قوی مرتبط است. با افزایش شیب موج، تنش های ماکزیمم افزایش و تنش مینیمم در پی پایین موج کاهش یافت. رویدادهای موجی که تنش های پی ماکزیمم و مینیمم را به وجود آوردند، در کل با بزرگترین شیب یا قله موج ارتباطی ندارند. این نشان می دهد که انتخاب رویداد موجی طراحی یا تکررات موج در شرایط آبی یکسان، نیازمند توجهات بیشتری است. موج های شدید با یا بدون تجاوز به عرشه سکو، باعث ایجاد پاسخ ringing سکو و حتی کشسان شد. بزرگی تنش های ringing به وجود آمده توسط اثر wave-in-deck، پیش تنش اولیه تا 15٪ فراتر رفت. مدت زمان پاسخ های ringing می تواند تا 8.2 برابر دوره موجی پس از اثر عرشه ادامه داشته باشد.



شکل 22

7.3 فشار اثر بر زیر سکو

روند کلی فشار اثر ماکزیمم به عنوان تابعی از تجاوز عرشه، به طور کلی با پیش بینی ونگ برای صفحه افقی ثابت موافق است، اما با گوناگونی وسیع تری. قسمت جلویی عرشه فشار های بالا تری را نسبت به عقب عرشه تجربه می کند که مناطق نزدیک انتها و اطراف ستون ها، جایی است که این روند معکوس است و استثنا هستند. این می تواند باعث شود که فرازجوشی موج در اطراف ستون های پشتی و همچنین اثر پایین رفتن سکو بزرگ تر باشد. در تمامی رویداد های موجی آزمایش شده، فشار های اثر ماکزیمم اطراف ستون های جلو و پشت یک رابطه مثبت با تنش های ماکزیمم پی های بالا موج و پایین موج را نشان داد. این می تواند ثابت کند که بزرگی فشار ضربه ای wave-in-deck به قدری بزرگ بود که به طور ناگهانی تنش های پی را افزایش دهد.