

بررسی آزمایشگاهی رفتار هیدروالاستیک یک سکوی شناور با استفاده از مدل هیبریدی

سید حامد شکیب^۱، محمد جواد خانجانی^۲، حمید شجاع رستگاری^۳

hshakib@buqaen.ac.ir

۱- مربی مهندسی عمران دانشگاه بزرگمهر قائنات

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بزرگمهر قائنات

چکیده

در مطالعات پیشین، مدل سازی تجربی سکوی شناور از دو جهت دارای اهمیت بوده است: ۱- صحت سنجی روش های عددی مورد استفاده در حل مسئله مورد نظر. ۲- ساخت مدل آب های عمیق با سیستم مهاری قطع شده. در این مطالعه پس از بدست آمدن ابعاد مناسب کابل قطع شده از روش عددی، به بررسی آزمایشگاهی رفتار هیدروالاستیک یک سکوی شناور تحت اثر نیروی موج پرداخته شد و در این راستا مطالعات تجربی و عددی اخیر مورد استفاده قرار گرفت. مدل با مقادیر بهینه مربوط به ابعاد سیستم مهار، تحت سه نوع موج سینوسی و دو طیف نامنظم با دامنه و پریودهای مختلف در دو عمق آب خور متفاوت قرار گرفته و مجموعاً ۳۶ تست تولید شد. بر اساس شرایط آزمایشگاهی برای مدل سازی آب های عمیق، مقیاس یکصدویستم انتخاب شد. بمنظور برون یابی صحیح نتایج مدل سیستم مهاری در حالت قطع شده به نتایج عمق واقعی، روش دو مرحله ای هیبریدی (آزمایش و روش عددی آفلاین) استفاده شد و نتایج بدست آمده برای تعیین ابعاد لازم کابل سیستم مهاری مورد استفاده در آزمایشگاه، بکار رفت. بر اساس یافته های قبلی، آزمایشات دریایی در مقیاس حدود یک پنجاهم مورد اطمینان بوده و برای مدل های کوچکتر، صحت سنجی نتایج لازم بنظر می رسد. در این راستا نتایج بدست آمده با یافته های مطالعات پیشین صحت سنجی شد که نشان از تایید مدل سازی سکو و نحوه مهاربندی آن در آزمایشگاه است.

واژگان کلیدی: سکوی شناور، مدل آزمایشگاهی، نیروی موج، پاسخ هیدروالاستیک، سیستم مهاری.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۸/۱۸

۱- مقدمه

در گذشته، مدل‌سازی کامل سیستم‌های تحت مطالعه شامل بدنه، کابل مهار و رایزرها، مد نظر بوده است اما با توجه به استحصال منابع از اعماق ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر و محدودیت‌های آزمایشگاهی، روش‌های نوینی از جمله روش‌های آنالیز رفتار سکوه‌های شناور بصورت دوسویه، به ابزاری مهم جهت برآورد رفتار کلی این سکوها در آب‌های عمیق و فوق عمیق تبدیل شده است [۱]. چالش اصلی در مطالعات مربوط به آب‌های عمیق، میزان عدم قطعیت نتایج و به بیان دیگر میزان قابلیت اطمینان آنهاست بگونه‌ای که بتواند به عنوان معیاری مستقل مورد توجه قرار گیرد که در این راستا مدل‌های فوق کوچک و مدل‌های هیبریدی مستثنی نیستند [۲]. آنچه اخیراً بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است مدل هیبریدی با رویکردهای آفلاین و آنلاین در استفاده از روش‌های عددی مربوطه بوده که خود نیز دچار چالش عدم قطعیت می‌باشد.

اولین نکته در جهت رفع چالش مذکور، پاسخ به این سوال است که چگونه مقیاس مناسب و تجهیزات مربوط به کابل قطع شده را بمنظور کاهش عدم قطعیت نتایج اختیار کنیم. دوم اینکه چگونه بفهمیم آیا نتایج شبیه‌سازی نهایی، هم‌خوانی مناسبی با آزمایشات مدل کامل دارد [۳]. استیون وینرستین (۲۰۰۱) مطالعه آزمایشگاهی اثر امواج نامنظم در شکاف هوایی^۱ ایجاد شده در یک سکوی شناور با مشخصات معلوم را انجام داد [۴]. در این راستا شان تی بینگ و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی بالا رفتگی موج، اطراف ستون‌های یک سکوی شناور و تعیین رابطه بین شکاف هوایی سکو و مشخصات موج برخوردی بصورت آزمایشگاهی پرداختند. نتایج آنها می‌تواند منبع معتبری جهت ارزیابی روش‌های تحلیل شکاف هوایی باشد [۵]. ماتوس و همکاران (۲۰۱۱)، یک مطالعه عددی-آزمایشگاهی، بمنظور بررسی حرکات تشدید یافته heave، pitch و roll را در یک مطالعه موردی برای یک سکوی نیمه‌مستغرق با آب‌خور زیاد انجام دادند. نتایج آنها نشان

می‌دهد برای حل نیروهای مرتبه دوم می‌توان از مولفه نیروهای سطح آزاد صرف‌نظر کرد [۶]. گونکالوز و همکاران (۲۰۱۳)، اثر گردابه را بصورت آزمایشگاهی بر روی حرکت یک سکوی شناور بررسی کردند. در این بررسی، سه حالت اثر همزمان جریان و امواج سطحی، میرایی و آب‌خور بصورت مجزا مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین دو نوع موج منظم و نامنظم بررسی شده و نتایج حاکیست که دامنه حرکتی در مورد امواج نامنظم کمتر و اثرات ثانویه گردابه‌ها قابل اغماض است [۷]. هوفت (۱۹۷۲) به بررسی فرکانس تشدید و عدم انطباق آن بر فرکانس طبیعی حرکت پرداخت، و مثالی در این مورد برای یک سکوی مستغرق با ابعاد گوناگون در هندسه قسمت زیر آب ارائه کرد. این هندسه طوری شکل یافته بود که تشدیدها در فرکانس طبیعی به حداقل برسند [۸]. آکاگی (۱۹۸۴) رفتار حرکتی یک سکوی شناور را با یک برنامه غیر خطی مرتبه دوم بهینه کرد. در آن مطالعه، متوسط حرکات heave سکو مورد بررسی قرار گرفت، و با در نظر گرفتن قطرها و فاصله‌های المان‌های مختلف بعنوان متغیرهای بهینه‌سازی، طیف پاسخ بهینه‌ای برای سکو بدست آمد [۹].

فایلینگ (۱۹۸۶) به طراحی بهینه سیستم مهاربندی، رایزرها و سیستم لنگرهای بازگردان در سکوه‌های شناور پرداخته است. او با در نظر گرفتن میزان ثابتی از نسبت میان ظرفیت نیروی بازگرداننده سیستم مهاربندی و نیروهای محیطی برای تمام جهت‌ها، یک روش عددی جهت بهینه‌سازی آرایش خطوط ارائه کرده است [۱۰]. بیرک (۲۰۰۱) با استفاده از شیوه برنامه‌ریزی بهینه‌سازی و با در نظر گرفتن شرایط محیطی دریا در حالت‌های کوتاه مدت و بلند مدت و بکارگیری طیف‌های مختلف، به کمینه کردن مقادیر نیروی وارده از موج به بدنه پرداخته و حرکت سازه‌های فراساحل گوناگون مانند کشتی‌سان‌ها، بویه‌ها، سکوه‌های پایه کششی و سکوه‌های شناور نیز از طریق طراحی بهینه شکل آنها، کمینه شده است [۱۱].

فراری و همکاران (۱۹۹۴) روشی جهت طراحی بهینه خطوط مهار سکوه‌های شناور، ارائه دادند. در آن مطالعه، زاویه قرارگیری سکو نسبت به موج برخوردی، چیدمان مهارها و ترکیب خطوط بصورت زنجیری و بافته شده

¹ Air Gap

از نیروهای درگ ویسکوز و نیروی خطوط مهاری) و همچنین مطالعات آزمایشگاهی چاره‌ساز است [۱۷]. ییلماز (۱۹۹۶) معادلات حرکت سکوی شناور بزرگ را با در نظر گرفتن اثرات میرایی مهار و ویسکوزیته حل نمود و طیف پاسخ سکو را در درجات آزادی مختلف ارائه کرد. بنابر نتایج آن مطالعه، میرایی مهارها در شرایط معمولی دریا، تا ۴۰ درصد پاسخ surge سکو را کاهش میدهد که در شرایط طوفانی این عدد بسیار کم و حدود ۷ درصد است [۱۸].

یکی از احتیاجات اصلی در حوزه طراحی سکوها و بطور کلی سازه‌های شناور، کمینه‌سازی پاسخ Heave و قرار گرفتن مقدار آن در یک بازه معین حدود ۳۰ تا ۳۵ فوت است بطوریکه در برخی از انواع سکوها^۲، حرکات مذکور خارج از این محدوده قرار می‌گیرد [۱۹].

در کشور ایران اکثر سیستم‌های تولید موج دو بعدی بوده و لذا در این تحقیق سعی شد تا با در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر حرکات درجات آزادی سکوی شناور (طول موج، ارتفاع موج و عمق آبخور)، ۱- به بررسی تاثیر پارامترهای مذکور بر رفتارهای حرکتی سکوها^۲ شناور پرداخته شده، ۲- نتایج حرکات کلی با دیگر مطالعات سه بعدی مقایسه شده و ۳- با توجه به محدودیت عمق و روش عددی مناسب مشخصات کابل مهار طوری بهینه‌یابی شود تا با خطای قابل قبول نتایج نزدیک به مقادیر واقعی بدست آید. در این راستا، ابتدا نتایج مطالعه حاضر با تحقیقات سویلمز [۱۵] مقایسه و قابلیت اطمینان آنها احراز شد. سپس شرایط سکو در آب‌های عمیق بر روی مدل صحت‌سنجی شده، اعمال و در نهایت نتایج حاصل بررسی شد.

۲- مواد و روش

۲-۱- مشخصات فلوم

آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق در فلوم موجساز آزمایشگاه تولید موج مرکز علوم، تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی کرمان انجام شده است. این فلوم موجساز دارای طول ۲۰ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۱ متر است.

بعنوان متغیر در نظر گرفته شد و با تحلیل کل سازه شناور در قالب یک مثال عملی، نتایج تحقیقات ارائه گشت [۱۲]. در مطالعه آزمایشگاهی دیگر، جین ژان لی و همکاران (۲۰۱۴) به تعیین مقدار نیروی موج چند جهته بر یک استوانه شناور پرداختند و در نهایت فرمولی برای محاسبه نیروی موج وارد بر استوانه ارائه دادند بگونه‌ای که این نیرو وابستگی زیادی به پارامترهای موج از جمله تیزی و فرکانس آن دارد [۱۳].

در مطالعه‌ای متفاوت، رودمن و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۱، اثرات دینامیکی موج را بر روی یک سکوی پایه کششی بررسی کرده و در نهایت نیروی کششی هر رایزر را بدست آوردند [۱۴]. سویلمز (۱۹۹۵) مدل آزمایشگاهی یک سکوی نیمه شناور، که بعلت نقص فنی در دریا غرق و باعث بروز حادثه ای ناگوار شده بود، را ساخته و طیف پاسخ سکو را در ۶ درجه آزادی مورد بررسی قرار داد. در نهایت نتایج آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی روش عددی و کالیبراسیون نرم افزار تولید شده توسط آن نویسنده، بکار گرفته شد [۱۵].

کورین (۲۰۱۰) مدل سکوی شناور سه درجه آزادی را تحت آزمایش قرار داد و داده‌های حاصل را با نتایج روش‌های تحلیل زمانی (تئوری موج خطی ایری و معادلات اصلاح شده موریسون) و تئوری تفرق خطی مقایسه کرد. پس از ترسیم نتایج RAO^۲ و استحصال ضرایب اینرسی و دراگ از آزمایشات، نیروهای وارد به پروتوتیپ و RAO مربوطه بدست آمد و در نهایت بین نتایج تئوری تفرق و داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی ملاحظه شد [۱۶]. کتابداری و همکاران (۲۰۰۸) با فرض استوانه ای بودن یک عضو سازه شناور (از جمله ستون ها)، از روش تفاضل محدود و آنالیز تفرق مرتبه اول موج، به حل معادله پتانسیل تفرق و انتشار موج پرداخت و در نهایت نیروی وارد بر استوانه شناور را بدست آورد.

بمنظور پیش بینی حرکت سکوی شناور، روش‌های تحلیل حوزه فرکانس (در مورد حرکاتی که بتوان خطی در نظر گرفت)، تحلیل زمانی (برای سازه با حرکات غیر خطی ناشی

³ Dry Trees Semi-Submersible

¹ Smoothed Particle Hydrodynamics

² Response Amplitude Operators

۳-۲- موج های ساخته شده

معمولاً امواج بر اساس عمق نسبی $\frac{d}{L}$ طبقه‌بندی می‌شوند. در دسته بندی امواج برای $0.5 < \frac{d}{L}$ ، امواج در ناحیه عمیق قرار می‌گیرند. به لحاظ برخی ملاحظات مربوط به دستگاه موجساز، عمق آب ۷۰ سانتی متر انتخاب شد. با توجه به عمق مذکور، بازه مجاز انتخاب طول موج‌های لازم بدست می‌آید. امواج سینوسی با طول موج های ۱/۲، ۱ و ۰/۸ متر و ارتفاع امواج ۴ و ۶ سانتی متر انتخاب شد. با استفاده از تئوری امواج دامنه کوتاه پیوندهای متناظر بر اساس رابطه ۱ به شرح جدول ۱ می‌باشد [۲۰].

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (1)$$

برای ساخت انواع موج در فلوم، مشخصات موج مربوطه به دستگاه داده شده و با استفاده از سنسورهای موج‌سنج، درستی آن ملاحظه می‌گردد. در صورت نیاز طی چند مرحله اعداد درست تولید می‌شود. مطابق شکل (۳) جهت تولید طیف‌های موج از نمودار چگالی موج - فرکانس مخصوص آن طیف استفاده شده و برنامه دستگاه تنظیم و نمودار شکل (۴) رسم می‌شود.

۴-۲- مدل فیزیکی

مدل‌سازی نسبتاً دقیق و مشابه پروتوتیپ، شرایط مناسب محیطی در آزمایشگاه، انتخاب مقیاس مناسب و شناسایی دقیق اثرات مقیاس قادر خواهد بود نتایج کاربردی و قابل استنادتری در خصوص برآورد پارامترهای طراحی ارائه دهد. برای در نظر گرفتن نیروهای غالب مشارکت‌کننده در اینرسی سازه، بهترین معیار عدد فرود است که معمولاً در مدل‌سازی سازه‌های فرا ساحل استفاده می‌شود [۲۱]. مدل سکوی نیمه‌مستغرق با مقیاس یک‌صدویستم ساخته شد.

جدول (۱) مشخصات موج های سینوسی تولید شده در آزمایشگاه بر اساس ناحیه عمیق.

شماره	طول موج (m)	پریود (s)	فرکانس
۱	۱/۲	۰/۸۸	۱/۱۴
۲	۱	۰/۸	۱/۲۵
۳	۰/۸	۰/۷۱	۱/۳۹

جنس بدنه فلوم از شیشه معمولی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر می‌باشد و در انتهای فلوم یک صفحه مشبک به عنوان جاذب موج به صورت شیب‌دار قرار دارد. زاویه قرارگیری این صفحه قابل تنظیم بوده و مناسب‌ترین مقدار برای آن ۳۰ درجه در نظر گرفته شد. روی این صفحه برای جذب بهتر موج یک ساحل سنگ چین اجرا شد.

۲-۲- سنسورها

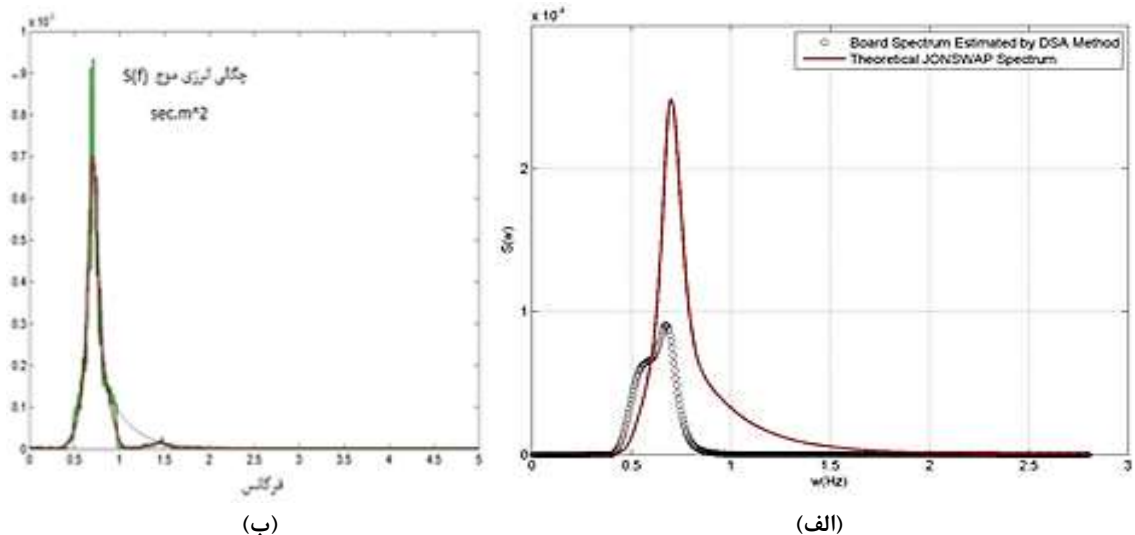
جهت کالیبراسیون دستگاه موجساز برای ساخت موج مورد نظر، از سنسورهای موج‌سنج استفاده شد. با استفاده از تعداد ۶ عدد از این نوع سنسورها، نوسانات سطح آب در نقاط مختلف فلوم اندازه‌گیری می‌شود (مطابق شکل (۱)). همچنین با استفاده از دستگاه موج نگار و دو سنسور صوتی آن، جابجایی سازه مدل در نقاط مشخص شده اندازه‌گیری می‌گردد (مطابق شکل (۲)). این سنسورها می‌توانند با فرستادن موج صوتی به سطح سازه متحرک جابجایی آن را اندازه‌گیری کند.



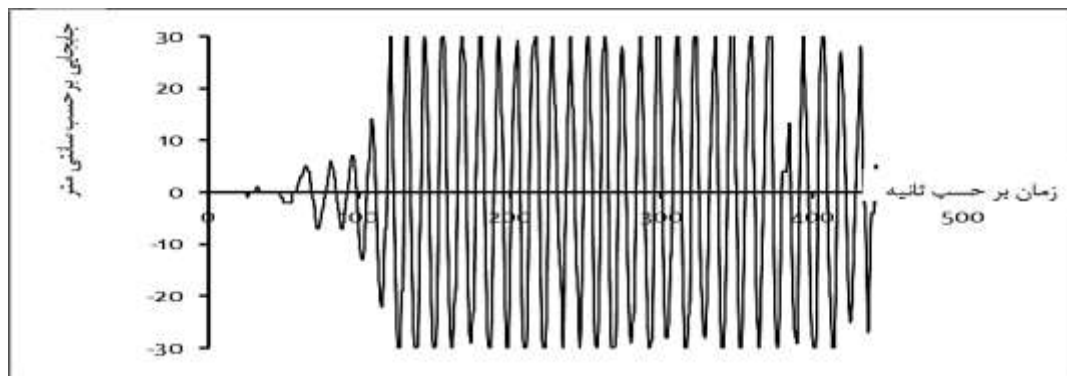
شکل (۱) میله‌های حسگر سنج موج.



شکل (۲) سنسورهای صوتی.



شکل (۳) نمودار طیف Jonswap ساخته شده در آزمایشگاه نسبت به طیف ایده آل به روش آزمون و تکرار (الف) مرحله نهایی و (ب) نتیجه مرحله اول.



شکل (۴) موج سینوسی منظم آزمایشگاهی با ارتفاع موج ۶ سانتیمتر.

مشخصات کامل مدل در جدول (۲) ارائه شده است. بر پایه تشابه هندسی و مقیاس یک صدویستم انتخابی مدل، طول کابل بین ۵ تا ۱۰ متر در آزمایشگاه باید لحاظ گردد که با توجه به شرایط مدل کامل^۱ و مشخصات فلوم این عمل قابل قبول نیست. بر اساس تئوری کابل‌های بریده شده که در بخش ۲-۵ به شرح آن پرداخته می‌شود طول و قطر بهینه کابل انتخاب شد.

با تنظیم ارتفاع متاسنتریک مدل، درجه پایداری بیشتری قابل تولید است که در این راستا با افزودن یک جرم اضافه که حتی المقدور کمترین اثر اندرکنشی را دارا باشد، پارامتر مذکور قابل تغییر خواهد شد.

این مدل دارای یک عرشه به ابعاد ۶۰ و ۸۰ سانتیمتر، چهار ستون به قطر ۹ سانتیمتر و به ارتفاع ۳۰ سانتیمتر، و دو پانتون به طول ۱/۲ متر، عرض ۱۵ سانتیمتر و ضخامت ۶ سانتیمتر است. جنس عرشه از نئوپان بوده که دارای ضخامت یک سانتیمتر است. ستون‌ها با مقطع لوله و از جنس پی وی سی ساخته شد که از بالا به عرشه و از پایین به پانتون‌های چوبی ضد آب متصل است. مدل آزمایشگاهی ساخته شده دارای جرم کل ۱۲ کیلوگرم است (مطابق شکل (۵)). بوسیله چسب ضد آب مدل کاملاً آب بندی شده و نیز بمنظور افزایش آبخور از وزنه‌هایی چسبیده به ستون سکو استفاده شد. مهاربندی مدل توسط ۴ کابل بسته شده به گوشه‌های عرشه انجام می‌شود.

^۱ Full Scale

جدول (۲) مشخصات سکوی شناور به تفکیک مدل و پروتوتیپ.

پارامترها	پروتوتیپ	مدل	
		مقیاسی	اجرایی
پیش کشیدگی در راستای افق (کیلوگرم)	۷۰/۰۰۰	۰/۰۷۰	۰/۰۷۰
زاویه انحراف در محل اتصال به سازه (درجه)	۳۰	۳۰	۳۰
قطر موثر	۱۵۰	۱/۵	۱/۵
وزن واحد در حالت غوطه‌ور (کیلوگرم بر متر)	۲۰/۰۰۰	۰/۰۲۰	۰/۰۲۰
طول خط مهار	۱۰۰۰	-	-
طول زمین افتادگی (متر)	۱۰۰	-	-
مدول الاستیسیته (GPa)	۳۶۰	۳/۶	۳/۱
مقاومت گسیختگی	۴۵۰۰۰	۴۵۰	۴۵۰
نیروی متوسط قابل اعمال به نقطه مهار در کف فلوم	۷۲۵۰۰۰۰	۷/۲۵	۷/۲

همچنین مدل‌سازی کابل قطع شده^۱، باید با در نظر گرفتن موارد زیر انجام گردد [۲۲].

- مدل‌سازی صحیح مشخصه‌های مربوط به نیروهای بازگرداننده.
 - مدل‌سازی صحیح ارتباط شبه استاتیکی بین پاسخ‌های مدل در حالت مهار شده.
 - مدل‌سازی مقدار معینی از میرایی سیستم مهار، رایزرها و نیروی جریان.
 - مدل‌سازی شبه استاتیکی خط مهار در حالت کشش.
- در یک مطالعه آزمایشگاهی با مقیاس معلوم، شرایط تشابه سینماتیکی و دینامیکی علاوه بر تشابهات هندسی باید وجود داشته باشد که از این رو کابل‌های مهاری باید مورد توجه بیشتر قرار گیرند. عمق قابل دسترسی در فلوم اقتضات مدل‌سازی را مرتفع نکرده بنابراین لازم است تا با ابزاری مناسب شرایط آزمایشات طوری مهیا گردد تا پاسخ‌های پروتوتیپ با مدل نظیر آن، تطابق قابل قبولی داشته باشد.

در مطالعه حاضر، به کمک نرم افزارهای آباکوس و متلب این هدف تامین گردید. در این راستا، تحقیقات مولینز [۲۳] مد نظر قرار گرفت. در آن مطالعه بکمک یک الگوریتم بهینه‌ساز و تعریف تابع اختلاف تغییر مکان‌های حداکثر بین کابل اصلی و قطع شده (مطابق شکل (۶)) برای هر یک از اجزای کابل، تابع مذکور کمینه شد و ضرایب وزنی مجهول در تابع هدف تعیین گردید. در یک رویکردی مناسب‌تر، می‌توان تابع هدف را اختلاف عددی بین فرمول طیف پاسخ حرکت سازه اصلی و مدل، با در نظر گرفتن ضریب مقیاس برای تمام پارامترهای مشارکت کننده، تعریف کرد. با انتخاب مقادیر طیف حرکت سازه اصلی برای زمان‌های دلخواه متناظر با طیف مدل (شامل حداکثر جابجایی‌ها)، یک دستگاه با تعداد دلخواه معادله و سه مجهول بدست می‌آید. مجهولات همان مشخصات کابل مورد استفاده در آزمایشگاه هستند. به این معنی که با رعایت مقادیر بدست آمده برای کابل در آزمایشگاه، مدل نزدیک‌ترین رفتار را به سازه اصلی خواهد داشت.

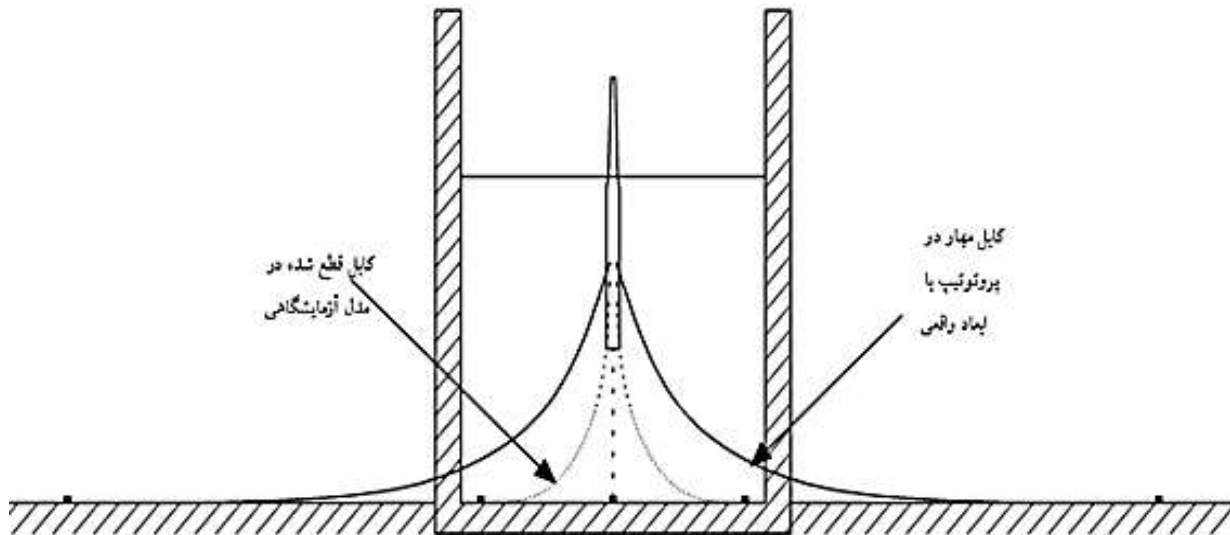


شکل (۵) مدل آزمایشگاهی سکوی شناور.

۲-۵- مدل‌سازی مهاربندها

توجه به اهمیت تئوری کابل‌های بریده به منظور توجیه درست رفتار مدل در آزمایشگاه، جهت استحصال موارد زیر بسیار مفید است: ۱- رفتار حرکتی کلی سکوی شناور در مواجهه با نیروهای محیطی مختلف. ۲- تعیین اثرات میرایی و سختی کابل در جهت تشدید حرکات سکو. ۳- تعیین نیروهای طراحی بدنه سکو و مهاربندها.

¹ Truncated

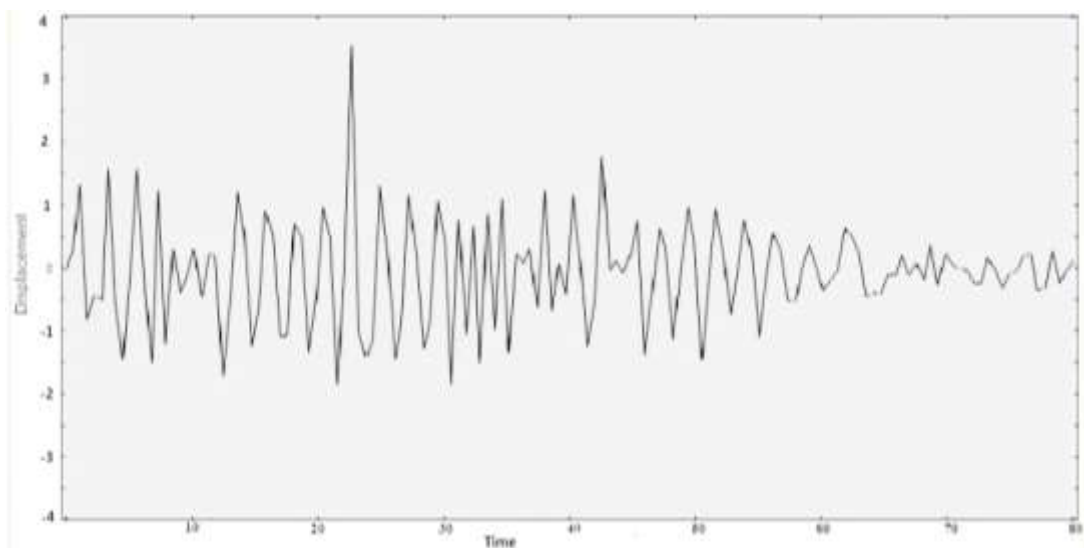


شکل (۶) نمایش مفهوم کابل قطع شده مورد استفاده در شبیه سازی حرکت مدل در مطالعه مولینز.

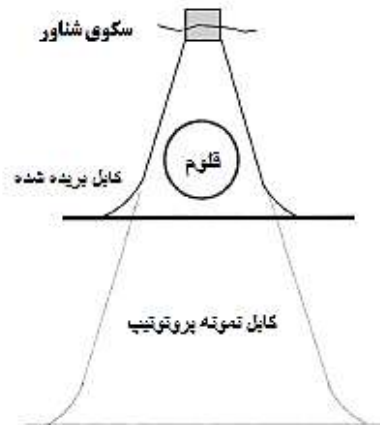
پاسخ مدل، تنها یک حالت از مشخصات موج در نظر گرفته شد و بر این اساس، رابطه حرکت مدل بدست آمد (معادلات ۲ و ۳). همچنین از مقادیر ماکزیمم طیف سازه اصلی نظیر (از حیث زمان) سازه مدل (با اعمال ضریب مقیاس)، در سمت دیگر معادلات استفاده شد. در نهایت مقادیر بهینه مشخصات کابل مورد استفاده در آزمایشگاه طبق جدول (۳) بدست آمد. شماتیک تشابه مورد نظر در روش قطع کابل مهار در شکل (۸-الف) و مراحل مورد نیاز ایجاد این تشابه در شکل (۸-ب) نشان داده شده است.

با الگوریتم اجتماع ذرات این دستگاه حل شده و جوابهای بهینه شده بدست آمد. طیف مدل نیز از مقادیر آزمایشگاهی با در نظر گرفتن مقادیر متفاوت برای پارامترهای طول و ارتفاع موج، آبخور و همچنین برای مشخصات کابل (طول، قطر و فاصله محل اتصال) قابل دستیابی است.

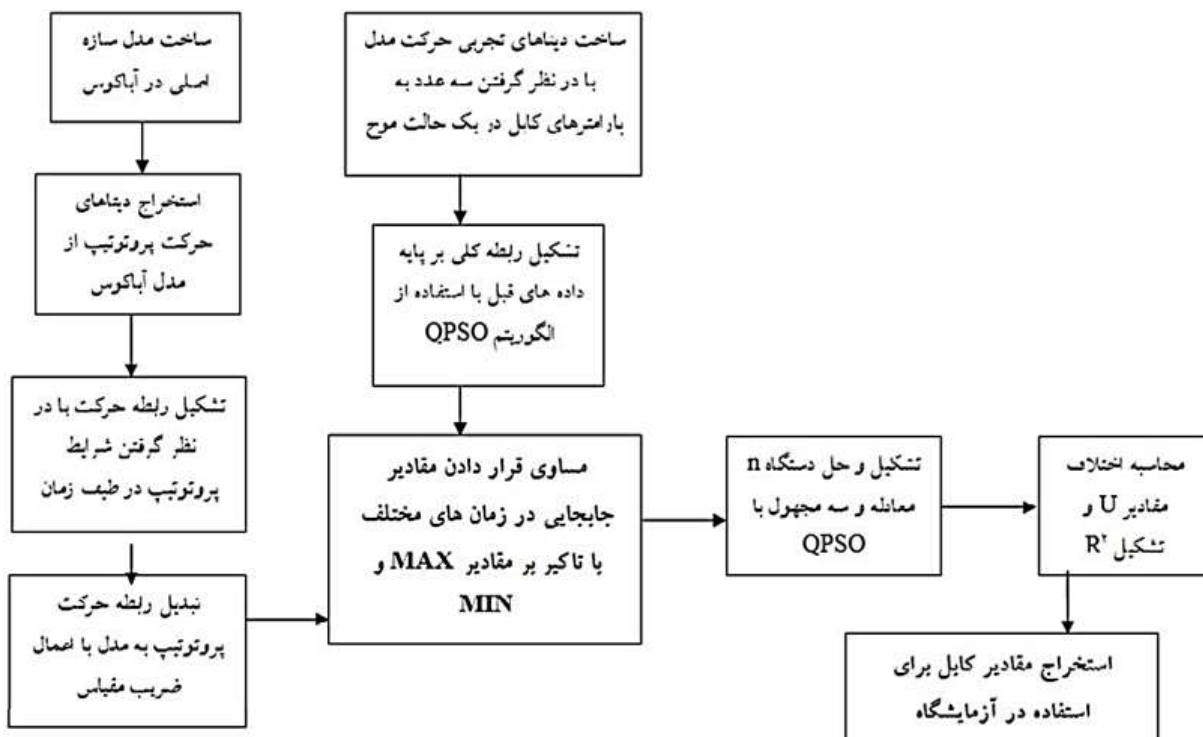
در این مطالعه، فرمول طیف سازه اصلی، با استفاده از نرم افزار آباکوس (مطابق شکل (۷)) با در نظر گرفتن مقادیر ثابت برای مشخصات مهاربند و مقادیر متغیر برای مشخصات موج، تولید شد. برای دستیابی به رابطه طیف



شکل (۷) طیف پاسخ حرکت پروتوتیپ در نرم افزار آباکوس.



(الف)



(ب)

شکل (۸- الف) نمایش شماتیک مفهوم کابل قطع شده و (ب) مراحل شبیه سازی و بهینه یابی پارامترهای کابل در آزمایشگاه.

$$Z = (H)^{-3.95} \cdot (d)^{4.05} \cdot (L)^{1.5} \sin(0.25t - 0.97) + (H)^{13.54} \cdot (d)^{2.79} \cdot (L)^{-4.627} \sin(1.58t + 0.6) + (H)^{-8.01} \cdot (d)^{4.02} \cdot (L)^{3.27} \sin(1.47t - 1.66) + (H)^{-1.88} \cdot (d)^{-1.37} \cdot (L)^{2.33} \sin(1.51t - 0.76) + (H)^{-8.80} \cdot (d)^{7.7} \cdot (L)^{1.86} \sin(1.73t + 3.57) + (H)^{-0.671} \cdot (d)^{2.213} \cdot (L)^{0.62} \sin(1.34t + 1.1) + (H)^{-11.1} \cdot (d)^{-3.97} \cdot (L)^{6.74} \sin(1.28t - 0.11) + (H)^{-1.62} \cdot (d)^{2.16} \cdot (L)^{0.98} \sin(1.71t - 0.65) \quad (2)$$

$$X = (H)^{-20.38} \cdot (d)^{0.27} \cdot (L)^{9.11} \sin(0.51t + 1.13) + (H)^{-9.83} \cdot (d)^{1.98} \cdot (L)^{4.38} \sin(1.06t + 0.51) + (H)^{9.3} \cdot (d)^{-0.809} \cdot (L)^{-1.86} \sin(1.5t - 1.08) + (H)^{3.35} \cdot (d)^{-3.39} \cdot (L)^{1.36} \sin(1.18t + 0.28) + (H)^{4.84} \cdot (d)^{-0.16} \cdot (L)^{-0.44} \sin(1.24t - 0.33) + (H)^{26.64} \cdot (d)^{-0.29} \cdot (L)^{-8.47} \sin(1.4t - 0.026) + (H)^{6.205} \cdot (d)^{-4.98} \cdot (L)^{0.78} \sin(0.68t - 0.73) + (H)^{4.1} \cdot (d)^{-4.01} \cdot (L)^{1.23} \sin(0.74t - 1.64) \quad (3)$$

گرفتند. فاصله افقی این مهاربندها از کف فلوم تا سازه برای انجام آزمایشات ۱/۵ متر انتخاب شد (مطابق جدول (۴)). سازه در دو عمق آبخور ۵/۵ و ۱۹ سانتی متر نیز قرار گرفت. ۶ نوع موج سینوسی و ۳ نوع طیف موج Jonswap به این مدل اعمال شد. در مجموع ۳۶ تست (آزمایش) تولید شد. برای اندازه‌گیری جابجایی افقی و قائم سکو از دو سنسور صوتی بصورت همزمان استفاده شد. این دو سنسور بصورت افقی و قائم در مرکز تقارن سازه قرار گرفت. از دو صفحه ثابت نیز بعنوان سطح بازگردان موج صوتی جهت برداشت جابجایی مدل استفاده شد.

قبل از انجام آزمایشات بروی مدل سکوی شناور و بدست آوردن داده های قابل قبول، در ابتدا باید مشخصات کابل در آزمایشگاه به روش کابل‌های بریده شده تعیین شود. جهت بدست آوردن نتایج قابل اطمینان، تثبیت موقعیت سکو^۱ در تمامی درجات آزادی لازم بوده و مهمترین بخش مدل‌سازی در آزمایشگاه می‌باشد. قدم اول صحت سنجی پاسخ مدل فیزیکی در مقایسه با داده های حاصل از مطالعات قبلی است. در مطالعه سویلیمز طیف پاسخ مدل بدون در نظر گرفتن اثر کابل در حالت عبور حجم سیلاب معین^۲ در آزمایشگاه بدست

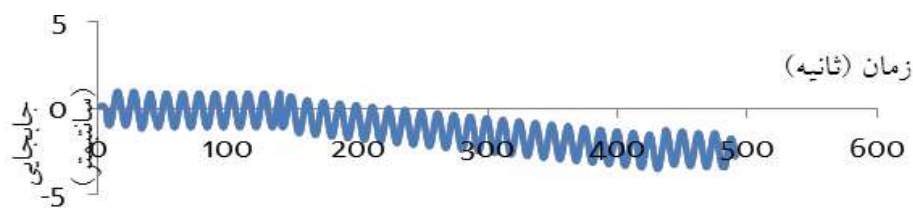
آمده، که با مقادیر مستخرج از این مطالعه (مطابق شکل (۹)) مقایسه شد. نتیجه حاصل، حاکی از تطابق خوب رفتار مدل حاضر با مطالعه قبلی است. لازم به ذکر است که پاسخ‌های قبل سیلاب مطابق‌اند.

جدول (۳) مشخصات استاتیکی و دینامیکی کابل مهار به تفکیک مدل و پروتوتیپ.

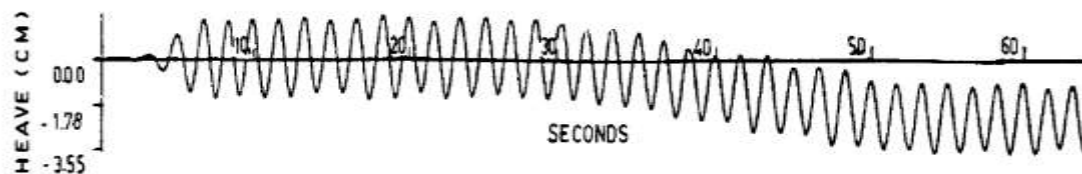
پارامترها	پروتوتیپ	مدل	
		مقیاسی	اجرایی
جابجایی (کیلوگرم)	۳/۰۰۰/۰۰۰	۳۰	۳۰/۵
ابعاد پانتون (متر)	طول	۱۲۰	۱/۲
	عرض	۱۵	۰/۱۵
	ارتفاع	۶	۰/۰۶
فاصله ستون‌ها (متر)	طولی	۵۰	۰/۵۰
	عرضی	۷۰	۰/۷۰
قطر ستون‌ها (متر)	۹	۰/۰۹	۰/۰۹
عمق آب (متر)	۸۰۰	۸	۸
آبخور (متر)	۱۹ و ۵	۰/۰۵ و ۰/۱۹	۰/۰۵ و ۰/۱۹
	ارتفاع متاسنتریک (متر)	Roll	۲/۸۸
Pitch		۲/۳۶	۰/۰۲۳۶
شعاع ژیراسیون (متر)	Roll	۴۰/۴	۰/۴۰۴
	Pitch	۴۱/۳	۰/۴۱۳
	Yaw	۴۶/۶	۰/۴۶۶

۲-۶- آزمایشات

سکوی شناور در فاصله ۸/۵ متری از دستگاه موج‌ساز قرار گرفت و توسط ۴ مهاربند در گوشه های عرشه خود به کف فلوم مهار شد. این خطوط مهار به صورت خمیده قرار



(الف)



(ب)

شکل (۹) مقایسه شکل پاسخ heave در دو مطالعه آزمایشگاهی (الف) مدل بیلماز و (ب) مدل مورد استفاده در مطالعه حاضر.

² Progressive Flooding

¹ Dynamic Position

در نمودارهای اثرات امواج منظم (شکل های (۱۰) تا (۱۲))، با افزایش فرکانس موج تابشی، از نظم حرکتی مدل کاسته شده و تعداد نقاط ماکزیمم جابجایی نیز دچار کاهش می شود.

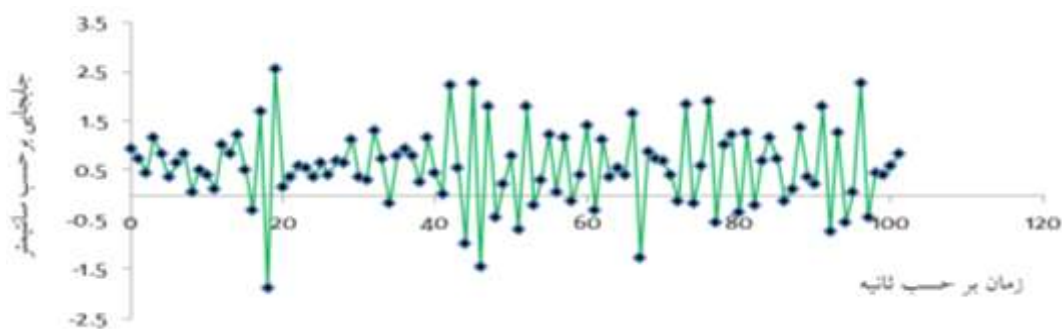
همچنین در فرکانس پایین تر میزان حداکثر تغییر مکانها افزایش یافته که در فرکانس $1/14$ اکثر قلهها در موقعیت قائم ۳ سانتیمتری از مبدا قرار دارند در حالی که در فرکانس $1/39$ این مقادیر به حدود ۲ الی $2/5$ سانتیمتر تنزل یافته است. تعداد حسیضها در فرکانس پایین تر بصورت چشمگیری بیشتر شده و مقادیر عددی متناظر نسبت به مقادیر قلهها متقارن تر است. قابل ذکر است که در فرکانس بالاتر تمایل سازه شناور به کاهش آبخور در حین حرکت بیشتر بوده که در اشکال (۱۰) و (۱۱) اکثر فواصل طی شده در مقادیر مثبت محور قائم قرار گرفته است.

جدول (۴) مقادیر بهینه مهاربندها.

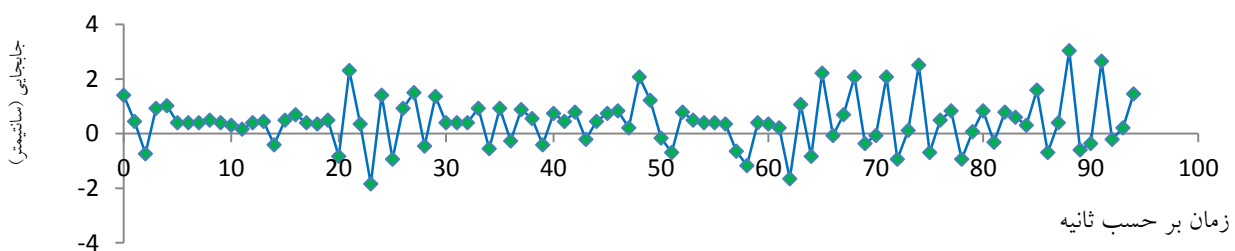
پارامتر	مقادیر اصلی (cm)
X	۶۵
D	۰/۰۸
L	۱۴۴/۷

۳- بحث

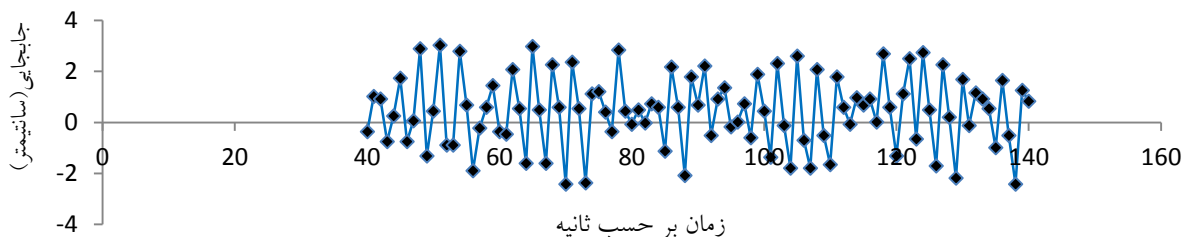
سکوی شناور تحت طول موج، عمق آبخور و ارتفاع موج مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت معادله حرکت در دو جهت heave و sway بدست آمد ابتدا موج سینوسی با ارتفاع و طول ثابت تحت عمق آبخور مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۱۰) نمودار حرکت heave مربوط به مرکز جرم مدل ترسیم شده است. شکستگی های نزدیک به هم می تواند تحت اثر امواج برگشتی از انتهای فلوم و اثرات ثانویه مربوط به جداره باشد. شکل نمودار شبه سینوسی بوده و با تقریب خوبی با یک عبارت سینوسی چهار جمله ای بیان می شود.



شکل (۱۰) نمودار جابجایی قائم مدل تحت اثر موج سینوسی با آبخور ۷ سانتیمتر، فرکانس $1/39$ ثانیه و دامنه ۴ سانتیمتر.



شکل (۱۱) نمودار جابجایی قائم مدل تحت اثر موج سینوسی با عمق آبخور ۷ سانتیمتر، فرکانس $1/25$ ثانیه و دامنه ۴ سانتیمتر.

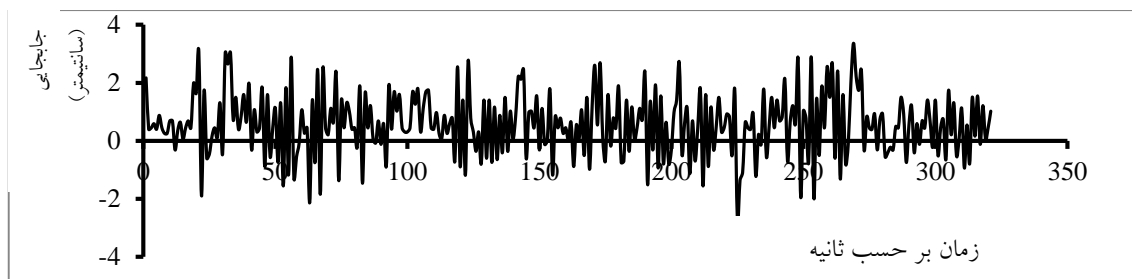


شکل (۱۲) نمودار جابجایی قائم مدل تحت اثر موج سینوسی با آبخور ۷ سانتیمتر، فرکانس $1/14$ ثانیه و دامنه ۴ سانتیمتر.

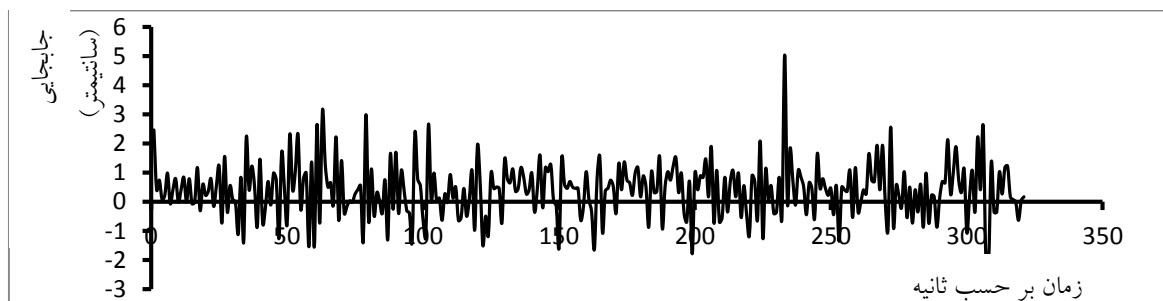
در اشکال (۱۵) و (۱۶) که برای ارتفاع موج ۵ و ۶ سانتیمتر ثبت شده است، موارد بالا قابل تعمیم است. مقدار ماکزیمم در سه نمودار تفاوت چندانی نداشته بلکه مقادیر متوسط و تناوب آنها متفاوت است. در مقایسه با امواج منظم، سازه تحت تعداد حرکات ناگهانی (ضربه‌ای) بیشتری قرار گرفته که بعنوان نمونه در شکل ۱۴ در فواصل زمانی تقریبی ۱۵ ثانیه حادث می‌شود. این بازه در اشکال (۱۵) تا (۱۷) با افزایش ارتفاع موج بصورت محسوسی کوچکتر می‌شود. در شکل (۱۳) سازه تحت طیف نامنظم در آب‌خور بالاتر قرار گرفته است. مشاهده می‌گردد که در این آزمایش میزان حداکثر تغییر مکان‌ها کاهش یافته و شدت ضربات (اختلاف دامنه بین فاز آرام و نقطه شوک) نیز کم شده است.

پدیده رزونانس با فرض اینکه جریان غیر چرخشی است، در فرکانس‌های بالا مشهود بوده و باعث اثرات مرتبه دوم می‌شود. این نتایج در مطالعه ماتوس [۶] بصورت جزئی‌تر و با در نظر گرفتن اثرات میرایی و آب‌خور بصورت مجزا و توأم انجام شده است.

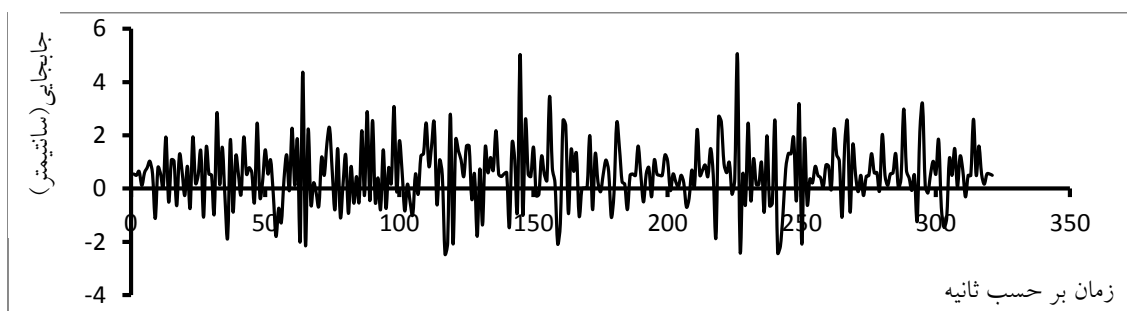
در اشکال (۱۳) الی (۱۶)، اثر ارتفاع موج مشخصه در طیف نامنظم بر حرکت *sway* و *heave* مدل بررسی شده است. مقدار جابجایی متوسط مدل در دامنه بالاتر بیشتر شده و نقاط ماکزیمم تکین در دوره کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد. بطوریکه در مورد موج با ارتفاع ۵ سانتیمتر حدود ۵۰ ثانیه بوده که با کاهش ارتفاع موج به ۳ سانتیمتر (مطابق شکل (۱۴)) بندرت قابل مشاهده است.



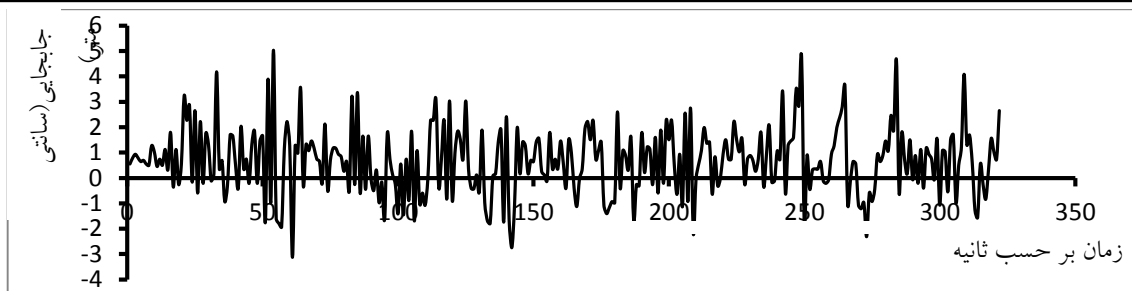
شکل (۱۳) نمودار حرکت *sway* سکوی شناور بر حسب سانتی متر تحت طیف موج *Jonswap* با $H_s = 3\text{cm}$ و آب‌خور ۱۹ سانتیمتر.



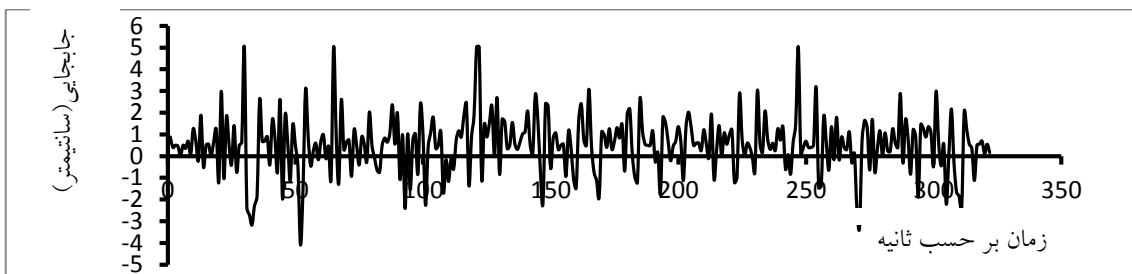
شکل (۱۴) نمودار حرکت *heave* سکوی شناور بر حسب سانتی متر تحت طیف موج *Jonswap* با ارتفاع موج و آب‌خور ۳ و ۷ سانتیمتر.



شکل (۱۵) نمودار حرکت *heave* سکوی شناور بر حسب سانتیمتر تحت طیف موج *Jonswap* با ارتفاع موج و آب‌خور ۳ و ۷ سانتیمتر.



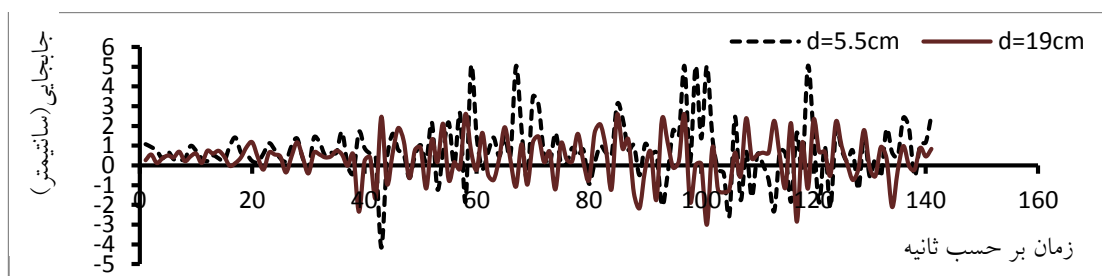
شکل (۱۶) نمودار حرکت *sway* سکوی شناور بر حسب سانتیمتر تحت طیف موج *Jonswap* با ارتفاع موج و آبخور ۳ و ۷ سانتیمتر.



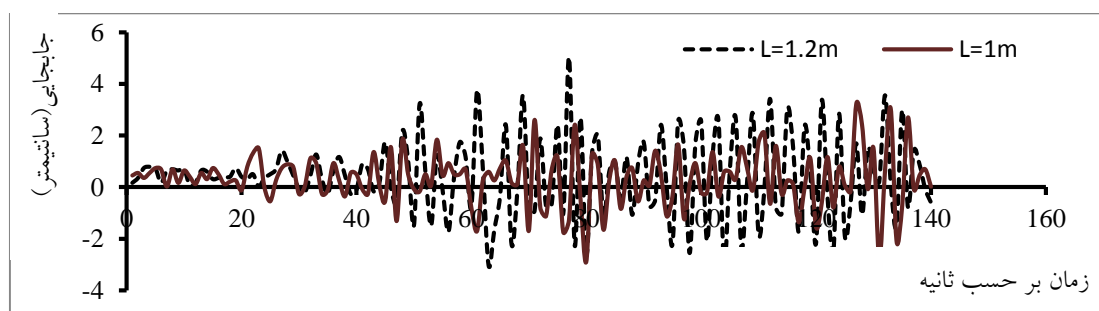
شکل (۱۷) نمودار حرکت *heave* سکوی شناور بر حسب سانتیمتر تحت طیف موج *Jonswap* با ارتفاع موج و آبخور ۳ و ۷ سانتیمتر.

بوده بقسمی که باعث جدا شدن کابل از محل اتصال آن در کف فلوم گردید. در اشکال (۱۹) و (۲۰)، جابجایی مدل تحت امواج با طول موج‌های ۱ و ۱/۲ متر در جهت *sway* و *heave* بررسی شد. حرکات راستای قائم در طول موج بلندتر بزرگتر و دارای نظم بیشتری است. در شکل (۲۰) این تفاوت‌ها کمتر شده و می‌توان گفت افزایش طول موج بر شکل حرکت *sway* اثر محسوسی نداشته است.

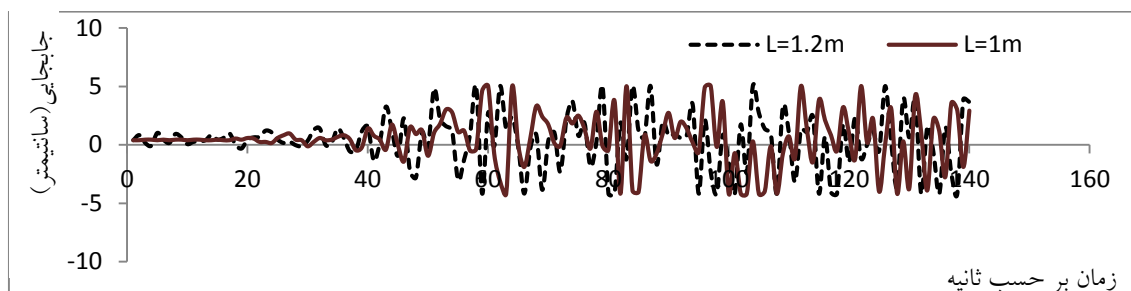
مقایسه رفتار مدل تحت آزمایشات متفاوت انجام شده ناشی از تغییر پارامترهای موثر، در شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) نشان داده شده است. در این شکل‌ها هدف مقایسه لحظه به لحظه جابجایی‌ها نیست بلکه مشخصات کلی حرکت در هر حالت مد نظر قرار گرفته است. در شکل (۱۸) حرکات سازه در آبخور ۵ سانتیمتر نامنظم‌تر و دارای حداکثر جابجایی‌های بزرگتری است. مهم‌تر اینکه دامنه‌های حداکثر، با ضربه همراه



شکل (۱۸) نمودار حرکت *heave* موج سینوسی با ارتفاع ۶ سانتیمتر، طول موج ۱ متر و با آبخور ۷ و ۱۹ سانتیمتر.



شکل (۱۹) نمودار حرکت *heave* موج سینوسی با ارتفاع ۴ سانتیمتر، آبخور ۷ سانتیمتر و با طول موج ۱ و ۱/۲ متر در جهت قائم.



شکل (۲۰) نمودار حرکت sway سینوسی با ارتفاع ۶ سانتیمتر، آبخور ۷ سانتیمتر و با طول موج ۱ و ۱/۲ متر.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، مدل سکوی نیمه‌مستغرق با مقیاس یک‌صدویستم ساخته شد. برای انجام آزمایشات می‌بایست ابتدا ضعف مدل‌سازی طول کابل در آزمایشگاه برطرف می‌شد. در این راستا، با فرمولبندی ریاضی دو طیف حرکت مدل و پروتوتیپ (نظیر به نظیر) و کمینه‌سازی اختلاف طیف‌های مذکور پارامترهای بهینه‌ای برای کابل در آزمایشگاه بدست آمد (جدول ۵). این مقادیر ضعف در مدل‌سازی مشخصات کابل را مرتفع ساخت. پس از اتمام مدل‌سازی مدل در آزمایشگاه امواج سینوسی با طول موج‌های ۱/۲، ۱ و ۰/۸ متر و ارتفاع ۴ و ۶ سانتیمتر، ساخته شد. سپس اثرات این امواج، بر حرکت مدل در دو آبخور ۵ و ۱۹ سانتیمتر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

۱- با افزایش عمق آبخور مقدار جابجایی سازه کمتر و حرکات سازه منظم‌تر می‌شود.
 ۲- با افزایش طول موج برخوردی، جابجایی heave سازه بیشتر می‌شود. پاسخ سازه در طول موج بزرگتر مقداری منظم‌تر از طول موج کوتاه‌تر است. این موارد با توجه به نمودار رفتار هیدرودینامیکی مدل در شکل (۱۱)، قابل فهم است. در درجه آزادی sway پاسخ سکو بصورت متقارن‌تر از heave بوده و تقریباً به صورت مساوی در دو سمت محور افق توزیع شده است. افزایش طول موج باعث افزایش دامنه حرکتی در این درجه آزادی نیز می‌شود همچنین افزایش طول موج بر شکل حرکت sway اثر محسوس‌ی نداشته است.

۳- با افزایش فرکانس موج تابشی، از نظم حرکت heave مدل کاسته شده و تعداد نقاط ماکزیمم جابجایی نیز دچار کاهش می‌شود. همچنین در فرکانس پایین‌تر میزان

حداکثر تغییر مکان‌ها افزایش یافته است. از طرفی در فرکانس بالاتر تمایل سازه شناور به کاهش آبخور در حین حرکت بیشتر بوده بقسمی که معمولاً اکثر فواصل طی شده در مقادیر مثبت محور قائم قرار می‌گیرد (مطابق اشکال (۱۰) و (۱۱)).

۴- افزایش ارتفاع مشخصه موج در طیف نامنظم در حرکت heave و sway باعث افزایش جابجایی متوسط مدل شده و نقاط ماکزیمم تکین در دوره کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد. بنابراین اثر مخرب افزایش دامنه امواج برخوردی، بصورت نقاط شوک در نمودار حرکت بوده که با کاهش مقادیر دامنه نیز از بین می‌رود.

۵- مراجع

- [1] Stansberg, C., O. Qritsland, and G. Kleiven, "VERIDEEP: Reliable Methods for Laboratory Verification of Mooring and Station Keeping in Deep Water", in Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 2000.
- [2] Senra, S.F., et al., "Assessment and Calibration of Numerical Coupled Models of a Deep-Draft Semisubmersible Platform Based on Model Tests". in The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2010.
- [3] Cao, Y. and G. Tahchiev. "A Study on an Active Hybrid Decomposed Mooring System for Model Testing in Ocean Basin for Offshore Platforms". in ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [4] Winterstein, S.R. and B. Sweetman, "Air Gap Response of Floating Structures: Statistical Predictions Versus Observed Behavior". Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vol.123, No.3, pp.118-123, 2001.

- [18] Yilmaz, O. and A. Incecik, "Extreme Motion Response Analysis of Moored Semi-Submersibles". *Ocean Engineering*, Vol.23, No.6, pp.497-517, 1996.
- [19] Hussain, A., et al., "Motion Comparison Between a Conventional Deep Draft Semi-Submersible and a Dry Tree Semi-Submersible". in ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [20] Sorensen, R. M., "Basic Coastal Engineering". Vol. 10, Springer Science & Business Media, 2005.
- [21] Hughes, S. A., "Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering", Vol.7. World Scientific, 1993.
- [22] Stansberg, C.T., H. Ormberg, and O. Oritsland, "Challenges in Deep Water Experiments: Hybrid Approach". *Journal of Off shore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol.124, No.2, pp.90-96, 2002.
- [23] Molins, C., et al., "Design Optimization for a Truncated Catenary Mooring System for Scale Model Test". *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol.3, No.4, pp.1362-1381, 2015.
- [5] Shan, T. B., et al., "Experimental Investigation on Wave Run-up Characteristics Along Columns and Air Gap Response of Semi-Submersible Platform". *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B. Vol.23, No.5, pp.625-636, 2011.
- [6] Matos, V., A. Simos, and S. Sphaier, "Second-Order Resonant Heave, roll and Pitch Motions of a Deep-Draft Semi-Submersible: Theoretical and Experimental Results", *Ocean Engineering*. Vol.38, No.17, pp.2227-2243, 2011.
- [7] Goncalves, R.T., et al., "Experimental Study on Vortex-Induced Motions of a Semi-Submersible Platform with Four Square Columns, Part I: Effects of Current Incidence Angle and Hull Appendages". *Ocean Engineering*, Vol.54, pp.150-169, 2012.
- [8] Hooft, J. P., "Hydrodynamic Aspects of Semi-Submersible Platforms", 1972.
- [9] Akagi, S. and K. Ito, "Optimal design of Semisubmersible Form by Minimizing its Motion in Random Seas". *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*. Vol.106, No.1, pp.23-30, 1984.
- [10] Fylling, I. and H. Lie, "Mooring System Design Aspects of Environmental and Mooring System of Optimization Potential", 1986.
- [11] Birk, L. and G. Clauss., "Automated Hull Optimisation of Offshore Structures based on Rational Seakeeping Criteria", The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2001.
- [12] Ferrari Jr, J. and C. Morooka, "Optimization and Automation of the Semi-Submersible Platforms Mooring Design". American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States), 1994.
- [13] Li, J., Z. Wang, and S. Liu, "Experimental Study of Interactions Between Multi-Directional Focused Wave and Vertical Circular Cylinder, part II: Wave Force". *Coastal Engineering*. Vol.83, p.233-242, 2014.
- [14] Rudman, M. and P.W. Cleary, "Rogue Wave Impact on a Tension Leg Platform: the Effect of Wave Incidence Angle and Mooring Line Tension". *Ocean Engineering*, Vol.61, pp.123-138, 2013.
- [15] Söylemez, M., "Motion Tests of a Twin-Hulled Semi-Submersible". *Ocean Engineering*, Vol.22, No.6, pp.643-660, 1995.
- [16] Ng, C., V. Kurian, and M. Muhammad. "Experimental and Analytical Investigation for the Responses of Semi-Submersible Platform". in The Asia-Pacific Offshore Conference. Kuala Lumpur, 2010.
- [17] Sefat, S.M. and M. Ketabdari, "Estimation of Wave Forces on Large Compliant Platforms". *Journal of Ocean University of China*. Vol.8, No.2, pp.121-126, 2009.