



بررسی میزان تاثیر مشخصات هندسه سکوهای نیمه شناور در رفتار حرکتی آنها

حمید گل پور^۱، مهدی شفیعی فر^۲

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی عمران، گروه سازه های دریایی

h_golpour@modares.ac.ir

خلاصه

سکوهای شناور در مقایسه با سکوهای ثابت تاثیرپذیری بیشتری از نیروهای محیطی دریا دارند به نحوی که اجرای کلیه عملیات اکتشاف، حفاری، استخراج و ... از روی این سکوها، متاثر از حرکت های سازه در درجات آزادی آن است. لذا شناخت و انتخاب پارامترهای مناسب در طراحی این سکوها می تواند به کم تر شدن پاسخ های دینامیکی به تحریکات هیدرو دینامیکی محیطی کمک کند. در این مقاله سعی شده ضمن بهره گرفتن از توانایی های بسته نرم افزاری SESAM محصول DNV، به بررسی پارامترهای هندسی مختلف سکوهای نیمه شناور و میزان و چگونگی تاثیر آنها در پاسخ های حرکتی سکو پرداخته شود تا معیارهای هندسی مناسبی برای طراحی سکو با هدف کاهش پاسخ های حرکتی بدست آید.

کلمات کلیدی: سکوی نیمه شناور (نیمه مستغرق)، پاسخ های هیدرو دینامیکی، رفتار حرکتی، مشخصات هندسی

مقدمه

از آنجا که جستجوی منابع نفت و گاز به سوی آب های عمیق (بیش از ۶۰۰ متر) پیش رفته است، استفاده از سکوهای ثابت عملاً غیرممکن می شود. معمولاً استفاده از سکوهای ثابت به دلیل تحمیل هزینه های سنگین ساخت و نصب، حداکثر به اعماق حدود ۳۶۰ تا ۴۵۰ متر (۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ فوت) محدود می شود. از این رو است که ایده استفاده از سکوهای شناور جدید مانند سکوهای پایه کششی (TLP)، سکوهای نیمه شناور (Semi-Submersible)، سکوهای Spar و ... که قابلیت های استفاده در آب های عمیق را دارا هستند، روز به روز بیش تر می شود. به ویژه از اواسط دهه ۹۰ که میدان های نفتی آب های خیلی عمیق (۹۰۰ تا ۳۰۰۰ متر) مورد توجه جدی قرار گرفته، کاربرد انواع جدید سکوهای متناسب با این اعماق افزایش چشم گیری یافته است. از آنجایی که در طراحی این سازه ها، برای مقید کردن سکو عموماً از سیستم های مهاربندی استفاده می شود، سکو در مقایسه با سازه های فراساحلی ثابت امکان حرکت در برابر نیروهای ناشی از باد، موج و جریان را دارد و لذا گاهی به آنها سکوهای تطبیق پذیر گفته می شود. (۱)

نخستین گام در فرایند طراحی سازه های شناور، تحلیل و بررسی رفتار حرکتی سکو در برابر شرایط محیطی است و طراحی زمانی موفق است که با انتخاب پارامترها و مشخصات هندسی مناسب، سعی شود پاسخ دینامیکی سکو به تحریکات هیدرو دینامیکی حاصل از شرایط محیطی به کمترین مقدار مناسب برسد تا فعالیت های تعریف شده برای سکو با مخاطره روبرو نگردد. این امر نیازمند درک عمومی از بارگذاری شرایط محیطی به ویژه موج و اندرکنش آن با هندسه سازه است.

در پژوهش حاضر سعی شده با استفاده از امکانات مدل سازی و تحلیل هیدرو دینامیکی بسته نرم افزاری SESAM نگارش ۲۰۰۲ از محصولات DNV، به مطالعه رفتار سکوی نیمه شناور و میزان حساسیت پاسخ های سکو به مشخصات مختلف هندسی سازه پرداخته شود. در ادامه، ضمن مرور تئوری مورد استفاده در محاسبه نیروهای ناشی از امواج، شرح مختصری از تحلیل هیدرو دینامیکی سکو و حرکات و پاسخ های آن نیز ارائه می شود. سپس علاوه بر شرح نحوه مدل سازی و تحلیل سکوها توسط نرم افزار SESAM به معرفی این بسته نرم افزاری نیز پرداخته می شود. در انتها نتایج مورد نظر و حاصل از تحلیل پاسخ های سکوهای مختلف ارائه می گردد.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی عمران
^۲ دانشیار گروه سازه های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی عمران



نیروی ناشی از موج

امواج دریایی که ماهیتی اتفاقی دارند و به صورت تناوبی و تکرار پذیر هستند، باعث ایجاد نیروهای بزرگی بر سازه‌های دریایی می‌شوند. اتفاقی بودن، تناوبی بودن و جهت‌های مختلف و انرژی‌های متفاوت امواج همگی سبب می‌شود تا برای امواج و اثرات آن بر روی سازه پیچیدگی‌های منحصر به فردی داشته باشد. همین امر و نیز تنوع ابعاد سازه‌های دریایی سبب شده است تا تئوری‌های مختلفی برای محاسبه نیروهای حاصل از امواج ارائه شود. از آنجا که در آبهای عمیق سازه‌های شناور بزرگ و با حجم جابجایی زیاد استفاده می‌شود، تئوری تفرق-انتشار^۱ برای محاسبه این نیروها بکار می‌رود. بنابراین در این بخش به صورت خلاصه، اصول و مبانی حاکم بر تئوری تفرق مرور می‌شود. البته از آنجا که این سازه‌ها دارای اعضای لاغر نیز هستند، معادله موریسون نیز در تحلیل هیدرودینامیکی این اعضای سکوها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هنگامی که ابعاد سازه و اجزای آن در مقایسه با طول موج قابل ملاحظه و بزرگ باشد ($D/L > 1$) انتظار می‌رود که حضور سازه در میدان موج اطراف آن تغییرات و تلاطم‌های اضافی ایجاد کند و لذا موج بعد از برخورد به سازه دچار تفرق و شکست خواهد شد و باید این پدیده در محاسبه نیروی امواج مدنظر قرار گیرد به همین دلیل معادله موریسون اعتبار خود را از دست می‌دهد.

با فرض حرکت غیرچرخشی، سیال پیوسته و تراکم ناپذیر، می‌توان سرعت سیال را به صورت تابع پتانسیل بیان کرد. به علت ابعاد بزرگ سازه، پتانسیل سرعت کل از سه بخش پتانسیل امواج برخوردی^۲ (Φ_i)، پتانسیل امواج متفرق شده^۳ (Φ_D) و پتانسیل امواج منتشر شده^۴ (Φ_R) تشکیل شده است. پتانسیل امواج متفرق شده (Φ_D) بیانگر امواج متفرق شده به سبب حضور جسم در میدان موج است و با فرض ساکن و ثابت بودن جسم در سیال دست می‌آید. پتانسیل امواج منتشر شده (Φ_R) که بیانگر امواج تولید شده به سبب حرکت جسم در آب ساکن است باعث افزایش در نیروی جرم‌افزوده و نیروی میرایی می‌شود. تابع پتانسیل، معادله لاپلاس جریان را با شرایط مرزی مناسب ارضا می‌کند:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

شرایط مرزی مناسب برای ارضای معادله لاپلاس شامل شرط مرزی بستر، شرط مرزی سینماتیکی در سطح آزاد، شرط مرزی دینامیکی در سطح آزاد، شرط مرزی سطح جسم، شرط مرزی دور دست است.

به سبب بزرگی ابعاد جسم در مقایسه با دامنه حرکت موج، نیروی لزجت قابل چشم‌پوشی است و لذا می‌توان با انتگرال‌گیری از فشار روی سطح خیس نیروی موج را بدست آورد.

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi)^2 \quad (2)$$

با معلوم بودن فشار روی بدنه شناور، نیروی وارد بر سازه نیز با انتگرال‌گیری فشار روی سطح شناور بدست می‌آید:

$$F_{nj} = \varepsilon^n \iint_S p_n n_j ds \quad (3)$$

که در این رابطه S سطح خیس، ε تیزی موج و F_{nj} نیروی مرتبه n م در جهت j است. (برای مطالعه بیشتر در زمینه تئوری‌های موجود به مرجع ۱ و ۲ مراجعه شود.)

پاسخ‌های حرکتی سکوی شناور

تحلیل پاسخ سکوی شناور شامل حل معادله دیفرانسیل حرکت در ۶ درجه آزادی به سبب نیروهای محیطی موج، جریان و باد است. این شش درجه شامل سه درجه انتقالی $heave, surge, sway$ و سه درجه غلتشی $roll, pitch, yaw$ است. میزان حرکات سازه در این درجات آزادی به عوامل مختلفی از جمله سختی مهارها، بارهای محیطی، هندسه سازه، میزان میرایی و ... بستگی دارد (۲). سیستم‌های مهار سکوی نیمه‌شناور سبب ایجاد نیروهای بازگرداننده در صفحه افقی می‌شوند و لذا حرکت در درجات آزادی $Surge, sway, yaw$ را کنترل می‌کنند (۳). در عین حال نیروهای بازگرداننده قائم بستگی زیادی به شناوری هیدرواستاتیکی سکو دارند. بر طبق قانون ارشمیدس بر مرکز شناوری یک جسم شناور، نیرویی برابر وزن هم حجم سیال جابجا شده وارد می‌شود. این نیرو سبب ایجاد نیروهای بازگرداننده در صحنه قائم شده و لذا حرکت‌های درجات آزادی $heave, pitch, roll$ تاثیر زیادی از نیروها می‌گیرند. بنابراین هندسه سازه تاثیر بسزایی در پاسخ‌های این درجات آزادی دارد (۴).

¹ Diffraction-Radiation Theory

² Incident Wave Potential

³ Diffraction Wave Potential

⁴ Radiation Wave Potential

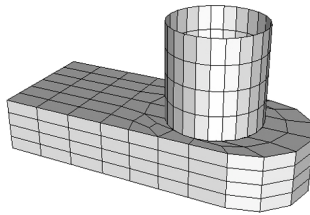


مدل سازی و تحلیل سکو با استفاده از SESAM

به منظور مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی سکوه‌های نیمه شناور از بسته نرم افزاری SESAM محصول شرکت DNV نروژ نگارش ۲۰۰۲ استفاده شده است. SESAM یک بسته نرم افزاری جامع و یکپارچه برای تحلیل‌های هیدرودینامیکی و سازه‌ای است، و در برگیرنده نرم افزارهای گوناگونی برای مدل سازی، تحلیل‌های هیدرودینامیکی و سازه‌ای و پردازش نتایج است که هر یک برای انواع مختلفی از سازه‌های دریایی بکار می‌رود. مدیریت و کلیه کنترل‌های یک پروژه در SESAM، توسط یک رابط کاربر ساده به نام Manager که در واقع یک نوار منو است انجام می‌شود. این رابط کاربر، علاوه بر سهولت در اجرای نرم افزارهای مختلف و ایجاد تنظیمات و پیش‌فرضها و نیز مدیریت فایل‌های گوناگون و متنوع تولید شده توسط نرم افزارها، به کاربر کمک می‌کند تا درک مستقیم و راحتی تری نسبت به بخش‌های گوناگون نرم افزار پیدا کند. (۵) به طور کلی می توان نرم افزارهای مختلف SESAM را اینگونه طبقه بندی کرد:

- ۱- نرم افزارهای مدل سازی: شامل مدل سازه‌های قابی (مانند Jacket) و مدل سازه‌های سازه‌های با شکل عمومی
 - ۲- نرم افزارهای بارگذاری و تحلیل دینامیکی: برای سازه‌های با شکل عمومی، سازه‌های قابی و کشتی‌ها
 - ۳- نرم افزارهای تحلیل‌های سازه‌ای: شامل تحلیل‌های خطی، غیرخطی، تحلیل‌های خستگی، اندرکنش خاک-شمع-سازه، سیستم‌های مهاربندی و ...
 - ۴- نرم افزارهای پردازش و استخراج نتایج: که بسته به نوع تحلیل‌های صورت گرفته نوع آن متفاوت خواهد بود.
- در ادامه، ضمن ارائه روش کار در مدل سازی و تحلیل سکوی نیمه شناور، برای آشنایی با ویژگی‌ها و توانمندی‌های بسته نرم افزاری SESAM بخش‌های مختلف آن به صورت اجمالی معرفی می‌شود.
- الف- مدل سازی سکوی نیمه شناور

برای ساخت مدل سکوه‌های نیمه شناور باید از مدل دوگانه^۱ استفاده شود. (۶) مدل دوگانه در واقع شامل دو مدل جداگانه از سکو است که برای اهدافی متفاوت ساخته شده‌اند: مدل پنل^۲ و مدل موريسون^۳. مدل پنل در واقع یک مدل المان محدود سه بعدی است که توسط نرم افزار PREFEM ساخته می‌شود و برای محاسبات هیدرودینامیکی با استفاده از تئوری تفرق-انکسار استفاده می‌گردد. PREFEM در واقع نرم افزاری برای ساخت مدل‌های المان محدود برای استفاده در تحلیل‌های هیدرودینامیکی (با نام مدل پنل) و تحلیل‌های سازه‌ای (با نام مدل FE) است (۷). در هنگام مدل سازی می توان از تقارن در صورت وجود استفاده کرد و تنها بخشی از مدل متقارن را ساخت. (شکل ۱)



شکل ۱- مدل پنل سکوی نیمه شناور GVA 4000 (به علت متقارن بودن، تنها یک چهارم آن مدل شده است).

مدل موريسون برای بهره‌گیری از معادله موريسون در محاسبات هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توسط نرم افزار PREFRAME ساخته می‌شود. PREFRAME نرم افزاری برای ساخت مدل‌های قابی با المان Beam است که در محاسبه نیروهای موريسون، نیروهای ناشی از درگ، نیروهای ناشی از لزجت و نیز در محاسبه و توزیع جرم سازه‌ای به منظور محاسبات استفاده می‌شود (۸). شکل ۲ مدل موريسون سکوی نیمه شناور مورد استفاده در تحلیل را نشان می‌دهد.

ب- تحلیل هیدرودینامیکی سکو

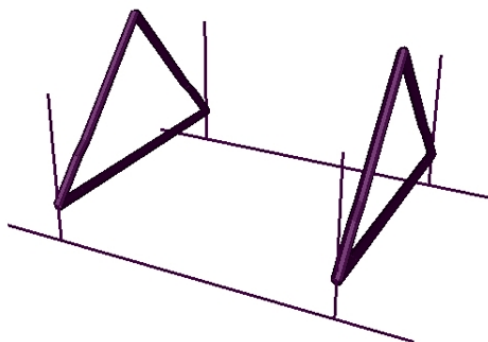
برای تحلیل هیدرودینامیکی سکوها نرم افزار WADAM^۴ استفاده می‌شود. برنامه WADAM برای تحلیل هیدرودینامیکی برای محاسبه اندرکنش موج-سازه در سازه‌های ثابت و شناوری همچون نیمه شناورها، کشتی‌سان‌ها، سکوه‌های پایه کششی، و سکوه‌های وزنی است. در سازه‌هایی که شامل اعضای حجیم و لاغر است (سازه‌هایی که باید به صورت دوگانه مدل شود)، WADAM به صورت خودکار و با توجه به نسبت ابعاد به طول موج روش مناسب تحلیل- استفاده از تئوری تفرق یا معادله موريسون- را بکار می‌گیرد و در نهایت می‌تواند نتایج را به صورت متعین و در دامنه زمان یا به صورت توابع انتقال مختلط ارائه دهد.

¹ Dual Model

² Panel Model

³ Morison Model

⁴ Wave Analysis by Diffraction And Morison theory



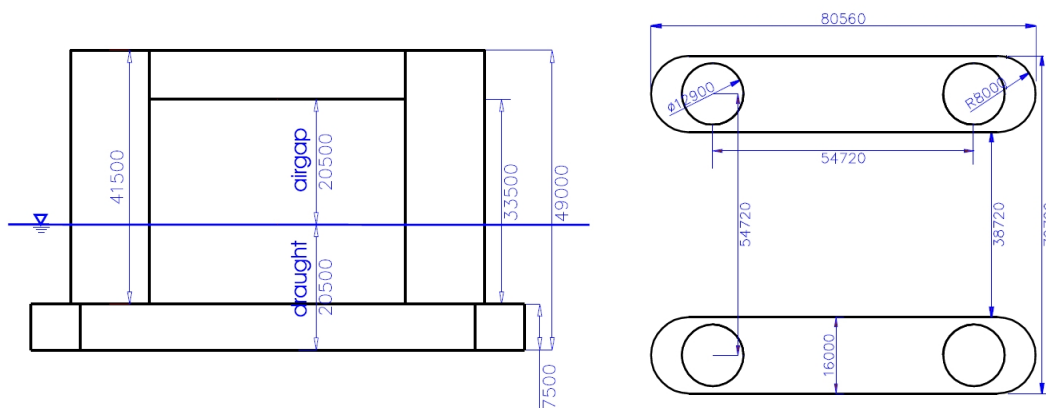
شکل ۲- مدل پنل سکوی نیمه‌شناور

ج- پردازش نتایج

همان گونه که اشاره شد، WADAM نتایج حاصل از تحلیل را به صورت متعین و یا به صورت توابع انتقال مختلط ارائه می‌دهد. به منظور استخراج و نیز پردازش نتایج حاصل از تحلیل از نرم‌افزار Postresp استفاده می‌شود. Postresp علاوه بر ارائه مقادیر پاسخ‌های حرکتی، می‌تواند با دریافت آمارهای کوتاه مدت و بلند مدت موج و انواع طیف‌های مختلف موج و ... نتایج گوناگون و متنوع حاصل از اندرکنش موج-سازه را ارائه دهد.

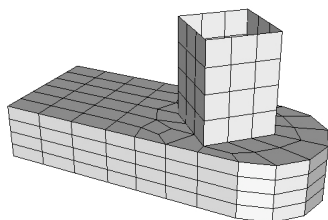
پاسخ‌های سکوه‌های نیمه‌شناور با هندسه مختلف

برای دستیابی به میزان تاثیر رفتار سکو، سازه‌هایی با هندسه مختلف مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. مبنای اولیه در ساخت هندسه مدل یک سکوی GVA 4000 (شکل ۱ و ۳) است. (۹) در این تحلیل‌ها عمق آب ۸۰۰ متر، چگالی آب ۱۰۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و برخورد موج در زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه مد نظر قرار گرفته‌اند. ضمن اینکه محدوده مناسبی از فرکانس‌های موج برای در نظر گرفتن کلیه امواج ممکن در پاسخ سازه استفاده شده است.

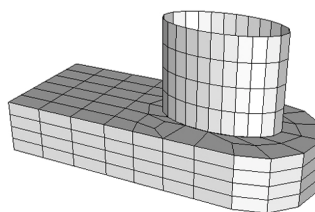


شکل ۳- ابعاد یک سکوی GVA 4000 (مدل شماره ۱)

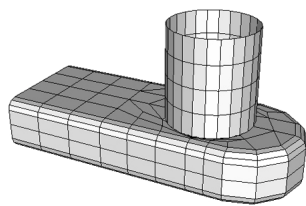
در یک طبقه‌بندی کلی می‌توان مدل‌های مختلف را به سه گروه تقسیم کرد. در بخش اول تغییرات هندسه ستون‌ها (شکل ۴ و ۵)، در بخش دوم تغییرات هندسه پانتون‌ها (شکل ۶ و ۷) و در بخش سوم تغییرات ابعاد کلی سکوها مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



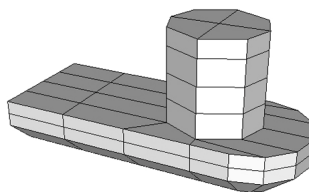
شکل ۵- مدل شماره ۳



شکل ۴- مدل شماره ۲

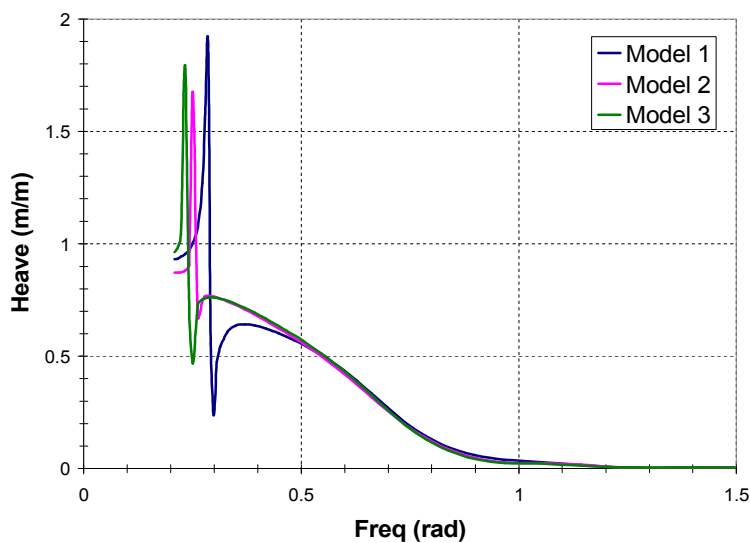


شکل ۷- مدل شماره ۷

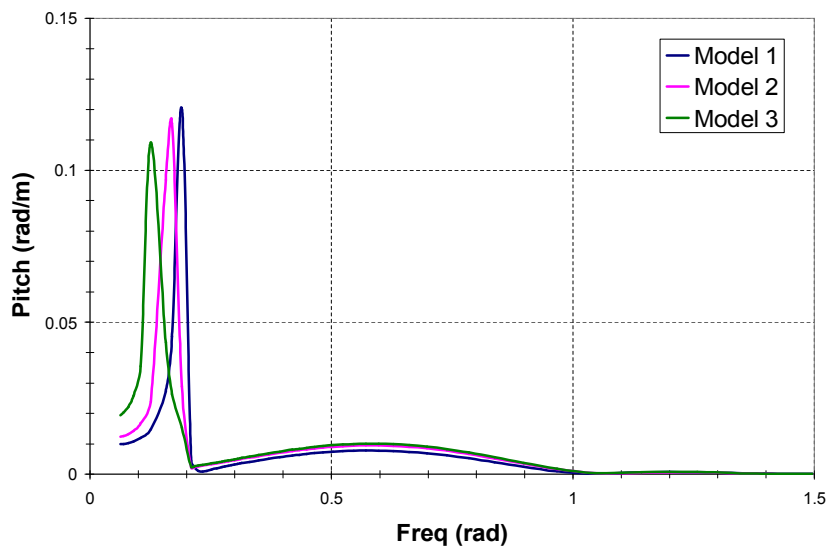


شکل ۶- مدل شماره ۶

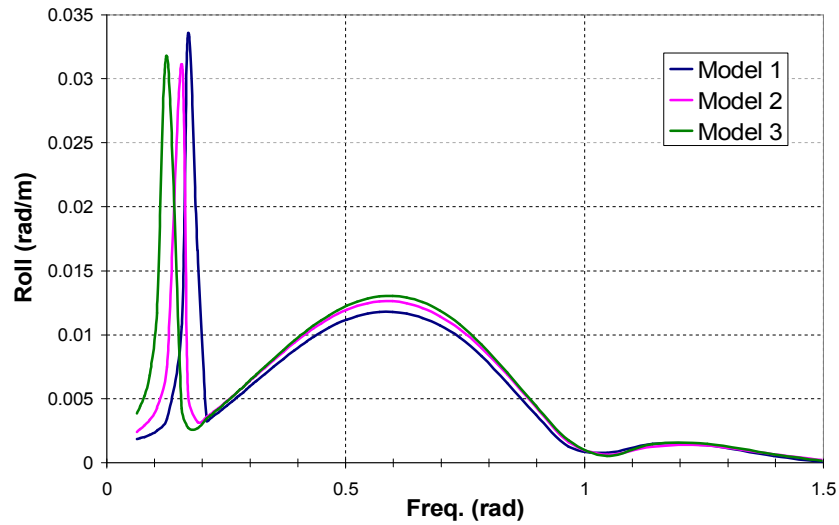
نمودارهای پاسخ heave و Pitch و roll مدل‌های ۱ و ۲ و ۳ که در واقع تغییرات پاسخ به سبب تغییر در مقطع ستون‌های سکو را نشان می‌دهد، در شکل‌های زیر ارائه شده‌اند.



شکل ۸- پاسخ heave سکوهایی مدل ۱ و ۲ و ۳ (زاویه برخورد موج ۱۸۰ درجه)

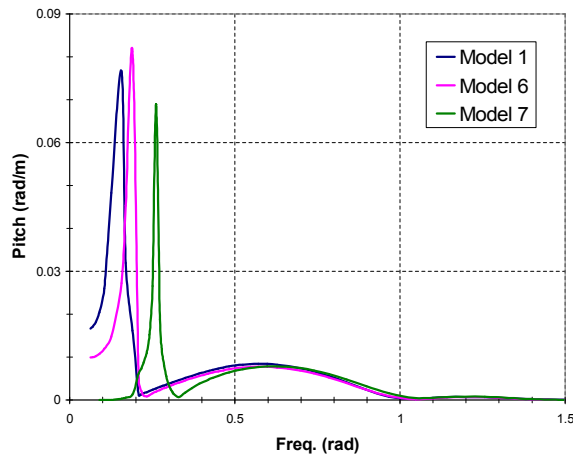


شکل ۹- پاسخ Pitch سکوهایی مدل ۱ و ۲ و ۳ (زاویه برخورد موج ۱۸۰ درجه)

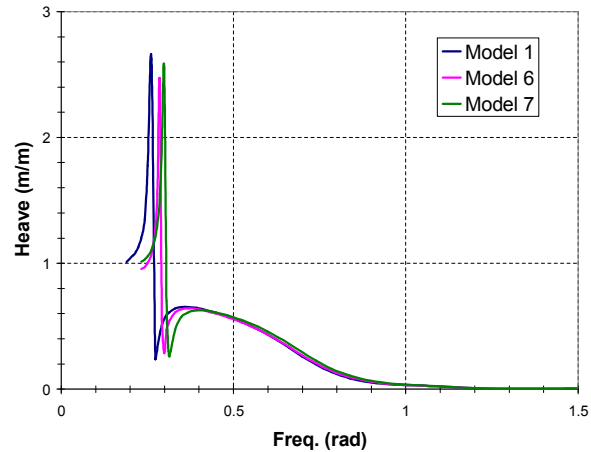


شکل ۱۰ - پاسخ Roll سکوهاي مدل ۱ و ۲ و ۳ (زاويه برخورد موج ۹۰ درجه)

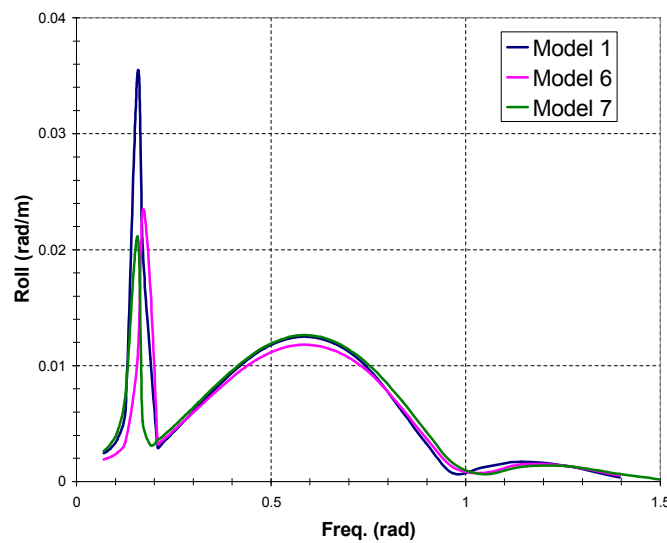
نمودارهای زیر نیز پاسخهای heave و Pitch و roll مدل های ۱ و ۶ و ۷ را - که دربرگیرنده تغییرات هندسه پانتون ها است - ارائه می دهد.



شکل ۱۲ - پاسخ Pitch مدل ۱ و ۶ و ۷ (زاويه برخورد موج ۱۸۰ درجه)

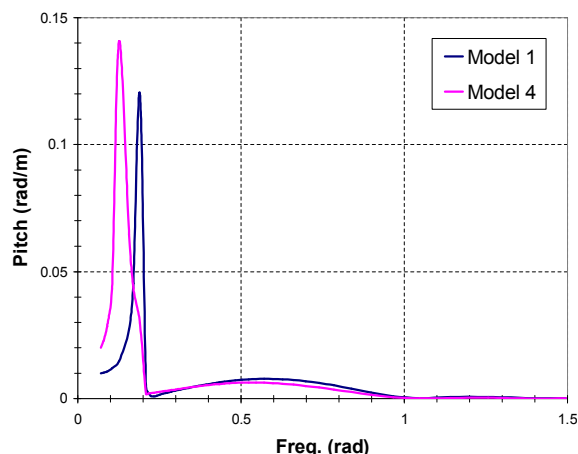


شکل ۱۱ - پاسخ heave مدل ۱ و ۶ و ۷ (زاويه برخورد موج ۱۸۰ درجه)

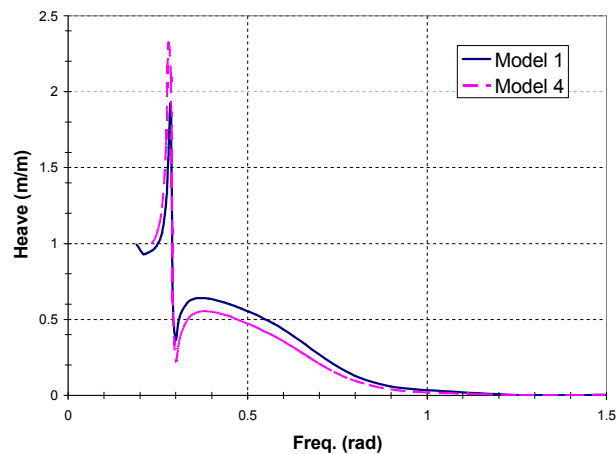


شکل ۱۳ - پاسخ Roll سکوهاي مدل ۱ و ۶ و ۷ (زاويه برخورد موج ۹۰ درجه)

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمودارهای heave و pitch دو نمونه سکوی ۱ و ۴ را که ارتفاع ستون‌های آنها متفاوت است، نشان می‌دهد، در مدل شماره چهار ارتفاع ستون ۲۰ متر می‌باشد که در نتیجه، میزان آبخور سکو به اندازه ۷ متر تغییر کرده است.



شکل ۱۵ - پاسخ Pitch سکوهای ۱ و ۴ (زاویه برخورد موج ۱۸۰ درجه)



شکل ۱۴ - پاسخ heave سکوهای ۱ و ۴ (زاویه برخورد موج ۱۸۰ درجه)

نتیجه‌گیری

نمودارهای ۸، ۹ و ۱۰ بیانگر آن است که تغییر مقطع ستون‌های سکوی نیمه‌شناور باعث تغییرات قابل توجهی در پاسخ‌های سازه می‌شود. به نحوی که دور شدن شکل مقطع از دایره سبب افزایش RAO ها در درجات آزادی heave، roll و pitch می‌شوند. البته این موضوع قابل پیش‌بینی است، چرا که ستون‌ها به علت نزدیکی به سطح آب بیشتر تحت تاثیر امواج بوده و لذا تغییر مشخصات ستون‌ها می‌تواند سبب تغییرهای در خور توجهی در پاسخ سازه شود. نکته قابل توجه دیگر با توجه به این نمودارها، افزایش پریود طبیعی سازه در درجات مذکور با دور شدن شکل مقطع از دایره است. این موضوع علاوه بر آنکه بیانگر میزان تاثیر میرایی ناشی از درگ در مقطع‌های مختلف است، می‌تواند ناشی از تغییر جرم‌افزوده هم باشد، زیرا جرم‌افزوده که ناشی از شتاب نسبی میان سیال و جسم است به ویژه در نزدیکی سطح آب - به علت بیشتر بودن تغییرات فشار - می‌تواند تاثیر بسزایی در میزان فرکانس سازه داشته باشد.

با توجه به شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ تغییر هندسه پانتون‌ها برخلاف ستون‌ها، تاثیر بسیار کمتری در پاسخ‌های سکو داشته‌اند و این موضوع از آنجا که پانتون‌ها در عمق زیادتری واقع شده‌اند و تاثیرپذیری کمتری از نوسانات سطح آب و در نتیجه تغییرات فشار دارند، امری طبیعی می‌نمایند. با این حال تغییرات هندسه پانتون‌ها، همچنان بر فرکانس طبیعی سازه تاثیرگذار بوده و علاوه بر آن بر میزان پاسخ سکو در فرکانس طبیعی نیز تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد.

همچنین، همانگونه که انتظار می‌رفت و از نمودارهای ۱۴ و ۱۵ قابل مشاهده است، افزایش ارتفاع ستون و در نتیجه افزایش میزان آبخور سکو سبب کاهش پاسخ در درجه آزادی heave شده و علاوه بر آن باعث کاهش فرکانس طبیعی سازه در حرکت pitch می‌گردد. نکته قابل توجه دیگر که لازم است قید شود، مطلوبیت نرم‌افزار SESAM به سبب توانایی‌های بالای آن در مدل‌سازی و تحلیل انواع سازه‌های دریایی و به ویژه سرعت آن در مقایسه با سایر نرم‌افزارهای موجود است. به نحوی که توسط یک پردازنده دوهسته‌ای با سرعت پردازش ۳٫۴ گیگاهرتز و حافظه یک گیگابایت، مدت زمان لازم برای تحلیل مدل‌های ساخته شده در این مقاله، با توجه به تعداد امواج برخوردی و ابعاد سکو در حدود ۶۰ الی ۱۲۰ ثانیه است.

مراجع

1. Barltrop, N.D.P. (1998) *Floating Structures: a guide for design and analysis*, Volume 1, Oilfield Publications Limited (OPL), Ledbury, England.
2. Chakrabarti, S.K. (1987) *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Springer Verlag, Southampton, Boston.
3. Barltrop, N.D.P. (1998) *Floating Structures: a guide for design and analysis*, Volume 2, Oilfield Publications Limited (OPL), Ledbury, England.
4. Otunola A. (2003) *Comparison of ASGARD B platform's field measurement and time domain numerical simulations*. Master's Thesis, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Sweden
5. DET NORSKE VERITAS, (2002) *SESAM user's manual, Manager*, (DNV)
6. DET NORSKE VERITAS, (2002) *SESAM user's manual, WADAM*, (DNV)
7. DET NORSKE VERITAS, (2002) *SESAM user's manual, PREFEM*, (DNV)



8. DET NORSKE VERITAS, (2002) *SESAM user's manual, PREFRAME*, (DNV)
9. Clauss G. F. and Schmittner C. E. and Stutz K. (2002) *Time-domain Investigation of a Semi-Submersible in rogue waves*. Proceedings of OMAE'02 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, Norway