

بررسی رفتار، حرکات و پدیده‌های خاص سکوه‌های شناور ستونی در میدان امواج

مهدی شفیعی فر، مهدی عجمی و تورول جاراند لارسون

چکیده: سکوه‌های فراساحل ستونی یا SPAR ها از جمله سکوه‌های رایج در صنعت استخراج و فرآوری نفت و گاز می‌باشند. امروزه و بدلیل فنی و اقتصادی، این سکوها از پرکاربردترین سکوه‌های فراساحل در محدوده آبهای عمیق و بیشتر از ۵۰۰ متر بوده و روشهای تحلیل و طراحی به سرعت در حال تحول هستند. در این راستا تحقیق حاضر با تکیه بر قابلیت‌های فوق العاده تحلیلی نرم افزار MOSES، مروری جامع بر مفاهیم خاص و چگونگی رفتار حرکتی سکوه‌های ستونی تحت تاثیر امواج خواهد داشت. MOSES یک ابزار قوی محاسباتی برای هر سازه‌ای است که در محیط آب قرار می‌گیرد و توانایی انجام انواع تحلیل‌های حوزه فرکانس و زمان، تحلیل‌های همبسته را با دقت و سرعت بالا دارد. در این تحقیق پدیده ناخواسته ناپایداری دینامیکی برای سکوه‌های نیمه‌شناور ستونی به مدد نرم افزار MOSES برای نخستین بار مورد بررسی و علت جویی قرار گرفته است. همچنین اشکال مختلف و بهبود یافته فرم هندسی بدنه سکو (نسبت به فرم کلاسیک) برای دستیابی به بهترین رفتار حرکتی (خصوصاً در درجه آزادی حرکت عمودی یا Heave) و مقابله با پدیده ناپایداری دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پاسخ حرکتی سکو به دو روش تحلیل در حوزه زمان و حوزه فرکانس انجام شده و توافق نتایج مشاهده گردیده است. با مدلسازی همزمان بدنه سکو، سیستم مهاربندی و رایزرها و تحلیل همبسته آنها، مقادیر پاسخهای برآورد شده برای سکو بواسطه تاثیر مثبت میرایی اضافی ناشی از این مدلسازی، کاهش قابل توجهی داشته‌اند.

کلید واژه‌ها: پاسخ حرکتی، سکوی نیمه‌شناور ستونی، تحلیل‌های همبسته، تحلیل در حوزه زمان، تحلیل در حوزه فرکانس.

۱. مقدمه

صنعت استخراج نفت و گاز از دریا در دهه سوم قرن گذشته (یعنی حدود سالهای ۱۹۳۰)، با حفاری در فاصله چند متری ساحل توسط حفارهایی با پایه‌های چوبی و به صورت کاملاً ابتدایی و سنتی آغاز شد. در فاصله زمانی حدود ۸ دهه این صنعت چنان پیشرفت و توسعه یافت که بزرگترین، پیچیده‌ترین و حجیم‌ترین سازه‌ها و

تأسیسات محصول دست بشر تا به امروز (از لحاظ طراحی و ساخت و جایابی و نصب) در این قلمرو قرار گرفت [۱]. در این عرصه سیستم‌ها، ادوات، تجهیزات و سازه‌های مختلف و فراوانی طراحی و ساخته شده‌اند که همگی آنها توسط دو عامل عمق آب محیط کاربری و شرایط جوی حاکم بر محیط کاربری کنترل و مقید شده‌اند شکل ۱. تحقیق حاضر بررسی رفتار نوع خاصی از این سکوها تحت عنوان سکوه‌های ستونی کلاسیک یا Classical SPARs می‌باشد.

بدنه اصلی سکوی SPAR از یک استوانه قطور و بلند با آب‌خور زیاد تشکیل شده است، این فیزیک ظاهری و آب‌خور زیاد باعث کاهش قابل توجه حرکات آن بخصوص در جهت عمودی (درجه آزادی Heave) می‌شود.

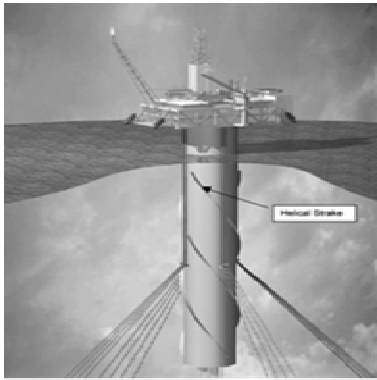
بدین ترتیب امکان اتصال مجاری انتقال مواد استخراجی (Risers) در انتهای پایینی آن و با امکان خرابی کم فراهم می‌آید.

مقاله در تاریخ ۸۲/۱۲/۱۷ دریافت شده و در تاریخ ۸۵/۳/۳۰ به تصویب نهایی رسیده است.

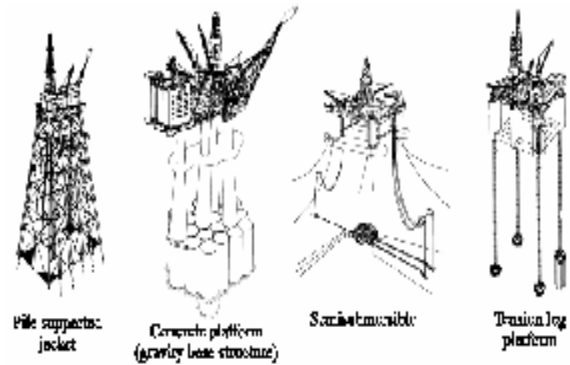
دکتر مهدی شفیعی فر، بخش عمران، گروه سازه‌های دریایی و هیدرولیکی، دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس تهران، Shafiee@Modares.ac.ir

مهدی عجمی، دانشجوی دوره دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، Adjami@Modares.ac.ir

Torull Larsen, M.Sc in Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, NUST, Truls_Larsen@ntnu.marin.no



شکل ۲. شکل ظاهری سکوی ستونی (Classic SPAR)



شکل ۱. نمونه‌ای از سکوهای فراساحل متداول

تحلیل سکو در دامنه زمان نیز برای مقایسه نتایج و اطمینان از صحت و دقت پاسخهای بدست‌آمده در تحلیل حوزه فرکانس انجام می‌شود. در شرایط حدی، سکو در معرض یک طوفان ۳ ساعته (با $T_p=14$ ثانیه و ارتفاع ماکزیمم متغیر) تحلیل شده است؛ در این شرایط (همانطور که در ادامه خواهیم دید) حرکت عمودی بیشینه‌ای برابر ۴/۵ متر بدست‌آمده است.

گزینه‌هایی با فرمهای هندسی مختلف بدنه سکو برای دستیابی به حداکثر میرایی (استهلاک رفتاری) و در نتیجه حداقل جابجایی ممکن در درجه آزادی انتقالی (Heave) و دورانی (Pitch) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

ناپایداری دینامیکی و مفاهیم و مباحث مربوط به آن نیز برای سکوهای SPAR توسط نرم‌افزار MOSES بررسی شده است. نتایج مطلوب بدست‌آمده از تحلیل همبسته سکو، سیستم مهاربندی و مجاری انتقال مواد، مؤید تاثیر بسزای این عوامل در بالا بردن میزان استهلاک سیستم در درجات آزادی مختلف می‌باشد. در این تحلیل مقادیر تکانها و حرکات سکو بالاخص در درجه آزادی حرکت عمودی (Heave) به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

در سکوهای SPAR موجود و معمول، براساس تجربه، جهت کاهش نیروهای وارده به سکو و کاهش حرکت و تکان سکو بویژه در جهت عمودی، طراحی با آبخور زیاد انجام می‌شود.

مزید بر اینکه تا بحال در مورد سکوهای طراحی و اجرا شده بدلیل نبود امکانات نرم افزاری و سخت افزاری دقیق و پیشرفته، تاثیر استهلاک و میرایی سیستم مهاربندی و رایزرها در تحلیل و طراحی نادیده گرفته شده است.

اما امروزه به مدد توسعه و بهبود ابزارها و روشهای تحلیل و طراحی، لحاظ نمودن طیف وسیعتری از عوامل و پارامترهای دخیل و مؤثر، ممکن گردیده و امکان طراحی سکوهایی با آبخور کمتر و اقتصادی‌تر وجود دارد.

۲. مروری بر نرم افزار MOSES

در این قسمت توضیحاتی در مورد مبانی و قابلیت‌های MOSES در رابطه با مدلسازی و تحلیل سکوهای SPAR ارائه می‌شود. MOSES

به لحاظ دارا بودن مخازن ذخیره و انجام عملیات سر چاهی بصورت همزمان، این سکو ترکیبی از بهترین مشخصات سکوهای نیمه شناور پایه کششی (TLP) و مخازن ذخیره سازی سطحی بزرگ (FPSO) را در میادین نفت و گاز که امکان دسترسی به منبع زیرزمینی از طریق یک چاه حفاری فراهم است داراست [۲].

سکوهای ستونی شکل ۲ بدلیل نوظهور بودنشان نسبت به سایر انواع سکوهای فراساحل شکل ۱ دارای پیشینه طولانی در ادبیات فنی نبوده و شاید به دلیل شکل ظاهری ساده خود (استوانه یا Cylinder) کمتر مورد توجه خاص و دقیق قرار گرفته‌اند، حال آنکه واقعیت غیر از این بوده و در پس این فرم ساده، مسائل و مفاهیم مهم، خاص و بعضاً پیچیده هیدرو دینامیکی نهفته است [۳] (نتایج این تحقیق نیز خصوصاً در بخش بررسی پدیده ناپایداری دینامیکی مؤید این نظر است).

در یک جمع بندی مفید و برای جلوگیری از طولانی شدن بحث میتوان اشاره داشت که: حدوداً از دهه ۸۰ میلادی کارهای جدی اولیه در زمینه بررسی مفاهیم، مسائل و تحلیلهای استاتیکی، دینامیکی و هیدرو دینامیکی سکوهای SPAR توسط (Chou, 1977) [۴] آغاز گردید و طی سالهای بعد توسط (Akagi, 1984) [۵و۶]، (Statio, 1991) [۷]، (Kagemoto, 1992) [۸] و (Vasconcellos,) [۹] پیگیری شد.

از آخرین و کاملترین مطالعات انجام شده نیز در این زمینه می‌توان به کار تحلیلی-آزمایشگاهی (Truls Jarand Larsen, 2002-2004) در مرجع [۳] اشاره داشت که در تحقیق خود به تحلیل در دامنه زمان سکوهای ستونی، بهینه سازی فرم هندسی بدنه آنها به روش Nonlinear Programing و معرفی فرمهای جدید این سکوها پرداخته است. پاسخ سکو به امواج دریا توسط عملگرهای دامنه پاسخ* بیان می‌شود [۱].

برای محاسبه RAO ابتدا باید مدل سکو ساخته شود. جهت صحت و دقت بیشتر جوابها، سیستم مهاربندی و مجاری انتقال مواد نیز مدل می‌شوند، مهارها با سختی‌ای بیش از حد واقعی خود مدل می‌شوند تا تاثیرشان در پاسخ سکو مشهود باشد.

* RAO: Response Amplitude Operator

با انتگرال‌گیری از توزیع فشار روی کل سطح خیس بدنه (قسمتهای مغروق)، نیروهای هیدرودینامیکی بدست می‌آیند، در همین مرحله ضرایب و پارامترهای هیدرودینامیکی لازم دیگر از قبیل جرم اضافی، میرایی و ... محاسبه می‌شوند.

۳. بر اساس نیروهای هیدرودینامیکی بدست آمده، حرکات خطی در ۶ درجه آزادی به صورت RAO سکو بدست می‌آیند. این مقادیر با حل معادله حرکت با شناوری آزاد و نامقید سکو به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \ddot{x}_k + B_{jk} \dot{x}_k + C_{jk} x_k] = F_j(t) \quad (2)$$

که: M_{jk} جرم بدنه سکو، A_{jk} جرم هیدرودینامیکی (اضافی)، B_{jk} ضریب میرایی، C_{jk} ضریب نیروهای بازگرداننده، h مقدار جابجایی یا حرکت سکو و F_j نیروی محرک خارجی می‌باشند. در هر درجه آزادی، ضرایب معادله حرکت در پیوندهای مختلف محاسبه شده، سپس معادله در هر درجه آزادی و برای پیوندهای مختلف حل می‌شود.

بدین صورت برای هر درجه آزادی جداول یا منحنی‌های RAO (مقادیر حرکت نسبت به ارتفاع موج محرک (محور y) در برابر مقادیر پیروید یا فرکانس (محور x)) بدست می‌آیند. RAOها به عنوان توابع انتقال در محاسبه مقادیر صریح پاسخ حرکتی سکو از روی طیف امواج محیطی (در تحلیل حوزه فرکانس) بکار می‌روند.

$$S_s(w) = RAO^2 S_x(w) = |H_{sx}(w)|^2 S_x(w) \quad (3)$$

که: $S_s(w)$ طیف پاسخ سکو و $S_x(w)$ طیف امواج محیطی هستند. مزیت عمده این نوع تحلیل (تحلیل حوزه فرکانس) و بهره‌گیری از RAO آنست که پاسخ بدست آمده خاص یک حالت یا واقعه محیطی با یک H_s و T_p معلوم و یکتاست.

۴. مرحله بعد انجام تحلیلهای هیدرودینامیکی در حوزه زمان به منظور بدست آوردن مقدار حرکات سکو است. معادلات اساسی حرکت، دیفرانسیلی-انتگرالی هستند.

برنامه MOSES در این نوع تحلیل طی یک فرایند تکراری بطور مرتب مقادیر و مشخصات هیدرواستاتیکی (مرکز شناوری سطح مقطع در تماس با آب و...) و هیدرودینامیکی (ضرایب و پارامترهای هیدرودینامیکی معادله حرکت) را (مادامیکه سکو حرکت کرده و سطح و فرم قسمت مستغرق بدنه تغییر می‌کند) محاسبه و تجدید می‌کند؛ پس در هر موقعیت زمانی و مکانی نیروهای هیدرودینامیکی محاسبه شده، در عین حال اثر تغییرات سطح مقطع در تماس با آب در هر زمان و موقعیت لحاظ می‌شود.

البته در این نوع تحلیل، حرکات و تکانهای سکو ناشی از امواج غیر خطی نیز محاسبه می‌شود.

۵. در تحلیل حوزه زمان از یک تابع بزرگنما (Scale function) برای بزرگنمایی نیروهای محرک خارجی استفاده می‌شود تا اندرکنش

برنامه‌ای جامع برای مدلسازی و تحلیل هر شیئی قابل تعبیه در محیط سیال (صورت شناور، نیمه‌شناور، مغروق و ...) می‌باشد [۱۰]. امکان کار با انواع نظریه‌های امواج، تئوری‌های هیدرودینامیکی، روشهای مختلف تحلیل و طراحی، محاسبه مقادیری چون نیروها، حرکات، کرنش‌ها، حتی طراحی جزئی سازه‌ای و ... از قابلیت‌های این نرم‌افزار است.

تئوری هیدرودینامیکی مورد استفاده این نرم افزار، براساس استفاده از تئوری پتانسیل وحل معادله کامل (غیرخطی) لاپلاس در میدان موج و جریان است که از بیان این تئوری در اینجا خودداری شده و خواننده محترم شرح جزئی تئوری مذکور را می‌تواند در مراجع [۱] و [۱۱] مطالعه نماید.

حل عددی معادلات میدان و مرزهای آن و گسسته سازی آنها به روش المان مرزی (BEM: Boundary Element Method) انجام می‌پذیرد که روشی شناخته شده و قابل قبول برای حل مسائل اندرکنش سیال و سازه است که در اینجا چون مجال و نیازی به بیان جزئیات ریاضی حل مساله حاضر به این روش در نرم افزار MOSES نیست (از قبیل مفاهیم: نحوه حل تکین معادله لاپلاس، تشکیل معادلات گرین و گسسته سازی مرزها خصوصا در نقاط تکین و...) خوانندگان علاقمند را به مرجع [۱۲] و سایر کتب BEM راهنما می‌شویم. در نتیجه و با فرض داشتن آگاهی و دانش کافی در زمینه تئوری حل نرم افزار MOSES در این بخش به بیان مراحل کاری در یک فرایند تحلیل با MOSES با اشاره مختصر به تئوری هر مرحله، خواهیم پرداخت [۱۱و۱۲]:

۱. گام اول مدلسازی هندسی بدنه سکو و ملحقات لازم می‌باشد که توسط تعریف نقاط مرزی و سپس تعریف مقاطع و پانلها (شبه‌ها) بین نقاط مرزی انجام می‌شود.

بدین ترتیب شکل عمومی شبکه بندی شده بدنه سکو ساخته شده و سپس مشخصات فیزیکی به فایل مدل و تحلیل اضافه می‌شوند، از جمله: خصوصیات توزیع جرم (مرکز ثقل، بارهای موضعی و ...)، مشخصات مصالح کاربردی، مشخصات سیال و ... در مرحله بعد سیستم مهاربندی و رایزرها به منظور لحاظ کردن اثرات مثبت سختی آنها در میرایی کل سیستم، به مدل اضافه خواهند شد. نهایتا سکو با دستور Instate در حالت تعادلی مناسب با آب‌خور مورد نظر قرار داده شده، شرایط برای انجام تحلیل هیدرواستاتیکی مهیا می‌گردد.

۲. براساس فرم هندسی بدنه در زیر آب، توزیع پتانسیل فشار روی تک تک پانلها (شبه‌ها) با استفاده از معادله خطی برنولی مطابق زیر محاسبه می‌شود:

$$p = -r(gz + \frac{df}{dt}) \quad (1)$$

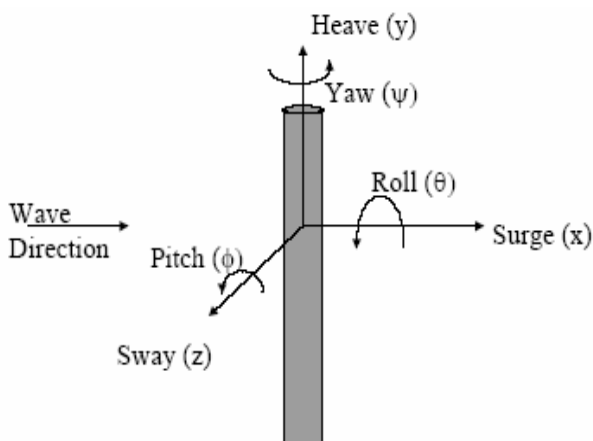
که r چگالی سیال، g شتاب ثقل، z عمق آب و f پتانسیل سرعت می‌باشد.

برای درشت کردن شبکه بندی نبوده و می توان آنرا به صورت ریز مدل کرد [۱۱].

ملاک انتخاب ابعاد سکو، مقادیر متوسطی در حدود ابعاد سکوهایی معمول بوده تا نتایج جنبه کاربردی داشته و صرفاً جنبه تئوریک نداشته باشند؛ ضمن اینکه تعادل و پایداری استاتیکی و مشخصات هیدرواستاتیک طرح ارائه شده، صحیح و منطقی باشند. برای مثال اگر ابعاد و شرایط سکو طوری باشد که در تحلیل هیدرواستاتیکی GM (ارتفاع متاسنتریک) منفی شود باید با مدل سازی و تعبیه تعداد بیشتری مخازن شناوری در مقاطع و قسمت های بالا، مرکز شناوری را بالا برد تا مقدار GM مثبت شود؛ بدین ترتیب در فرآیند تحلیل های پیوسته دستی یا تحلیل های بهینه یابی خودکار، قیود مختلف (که از لحاظ تحلیلی قیود هیدرو استاتیکی در راس آنها قرار دارند) باید دائماً کنترل شده و گزینه های نادرست از همان ابتدا از گردونه تحلیل حذف شوند [۱۰]. در جدول ۱ مشخصات عمومی - هندسی سکوی مورد بررسی نشان داده شده است.

۴. تکانها و حرکات SPAR

در محاسبات مربوط به سازه ها و سکوهایی شناور لازم است تا با درجات آزادی آنها آشنایی داشته باشیم، چراکه اکثر تلاش ها و هدف اصلی تحلیل ها کاهش میزان حرکت سکو در هر کدام از درجات آزادی (سته به نوع سکو، کاربری آن، عمق محل و شرایط محیطی) می باشد. این درجات آزادی به طور خلاصه در شکل ۳ آمده اند.



شکل ۳. درجات آزادی سکوی ستونی در میدان امواج

یکی از حرکات مهم سکوهایی شناور، حرکات در فرکانسهای کوتاه (Slow drift motions) منتج از اثرات غیرخطی امواج، باد و جریان بوده و بواسطه نوسانات تشدید شده درجات آزادی Surge, Sway, Yaw سکوی مهاربندی شده بوجود می آیند. حرکات دیگری که سکو در طول عمر کاربری خود آنها را تجربه می کند عبارتند از:

ناشی از نیروی موج برخوردی محرک روی مدل سکو، مشخص و معین شود. (برای مثال: در نظر گرفتن مقدار صفر برای تابع بزرگنما که منجر به عدم اعمال مستقیم نیروی موج بر سکو می شود). با استفاده از این مفهوم می توان رفتار سکو در فرکانسهای کوتاه (Low Frequency Behavior) را به طور دقیق بررسی کرد.

۶. امکان مدل سازی کامل سکو (شامل سیستم مهاری، ریزرها، اجزا و ادوات داخلی سکو) وجود دارد.

سکو را می توان با فرمهای مختلف بدنه مدل کرد، برای مثال توصیه می شود قسمت انتهایی پایین سکو را به وسیله یک صفحه دایره ای بصورت بسته مدل کرد، این فرض بواسطه کوچک بودن مقدار بازشوهای واقعی در بدنه سکو بین ریزرها و محفظه های شناوری صحیح بوده و بازشوها در مدل سازی قابل اغماض هستند.

۷. طیف های انرژی امواج دریا بعنوان ورودیهای مساله در دو غالب استاندارد ISSC و JONSWAP که مورد قبول اکثر آیین نامه های دریایی هستند، بصورت پیش فرض در MOSES تعریف شده و روابط و ضرایب آنها (بصورت کلی و پارامتریک) در متن برنامه وارد شده است و می توان با تغییر و ترکیب ضرایب این دو طیف، سایر طیف های استاندارد دیگر مانند P.M. و ... را نیز ساخته و بکار برد. تعریف طیف به فرم کامل آن یعنی طیف جهت دار نیز ممکن است. در MOSES امواج به صورت کسینوسی تعریف می شوند:

$$x = x_a \cos(\omega t + kx \cos b + ky \sin b) \quad (۴)$$

که: b جهت موج، $R = |RAO| \cdot \cos(\omega t + j)$ ، j زاویه فاز و ξ تراز لحظه های سطح آزاد آب می باشند. ما به مراحل و قسمتهایی از نرم افزار اشاره داشتیم که برای تحلیل سکوی SPAR کافی است و برای سکوهایی دیگری نظیر TLP که مسائلی چون اندرکنش سازه و سیال با خاک نیز مطرح می شود باید از دیگر قابلیت های MOSES هم استفاده کرد [۱۰].

۳. مدل سازی سکوی ستونی (SPAR)

در هنگام مدل سازی باید دقت کرد که بدنه سکو بمقدار منطقی و مناسب شبکه بندی شود، بکارگیری شبکه بندی خیلی ریز (fine) یا خیلی درشت (rough) به ترتیب باعث صرف زمان و فضای حافظه خیلی زیاد بدون ارائه دقت بیشتر در جوابها و نتایج و یا تولید پاسخ های با حاشیه اطمینان بسیار کم و حتی اشتباه می شود (تحلیل های هیدرودینامیکی شامل محاسبه فشار، نیروها و ضرایب و ... برای هر پانل یا شبکه به صورت جداگانه، بنا بر موقعیت و مشخصات آن انجام می گردد).

البته تاکید بر شبکه بندی درشتتر، خاص تحلیل حوزه فرکانس است که در آن برای طیف وسیعی از فرکانسها (پریودها) محاسبات تکرار می شود، حال آنکه در تحلیل غیر خطی (دامنه زمان) اجبار و لزومی

۵. روشهای تحلیل

هر دو روش تحلیل در حوزه زمان و حوزه فرکانس پاسخ ها و نتایج موافق و قابل قبولی می‌دهند، اما روش تحلیل در حوزه زمان به لحاظ کار با جملات غیرخطی در عین جامع‌تر و کامل‌تر بودن، زمان و حجم محاسبات بسیار بیشتری را در مقایسه با تحلیل در دامنه فرکانس می‌طلبد.

۵-۱. تحلیل در حوزه فرکانس

در این تحلیل، رفتار سکو بوسیله منحنی‌های RAO بیان می‌شوند. نمونه ای از این منحنی ها در شکل‌های ۴ الی ۷ برای درجات آزادی مختلف آورده شده‌اند.

همانطور که ملاحظه می‌شود برای هر درجه آزادی، محاسبات یک بار با لحاظ کردن اثرات سیستم مهاربندی و رایزرها و بار دیگر بدون آنها انجام شده است.

جهت بالا بردن میزان تاثیر در پاسخ سکو، خطوط مهاری هنگام مدلسازی سخت‌تر از مقدار واقعی مدل می‌شوند. محاسبات در عمق ۱۰۰۰ متری انجام می‌شود، در این عمق تاثیر وجود مهارها و مجاری انتقال مواد در مقدار پاسخ سیستم (کاهش آن، خصوصا در درجه آزادی Heave) مشهود است؛ البته در چنین اعماق بالایی، میرایی ناشی از لزجت، جرم اضافی، ممان اینرسی اضافی، نیروی ناشی از جریان و اثرات نیروهای بازگرداننده باید خیلی دقیق مورد بررسی قرار گیرند تا پاسخ بدست آمده برای سکو، هر چه بیشتر به مقادیر واقعی نزدیک باشد.

۱- حرکات هم‌فرکانس امواج (Wave frequency motions) و ۲- حرکات در فرکانسهای بالا (High frequency motions یا Mean drift)، ناشی از نوسانات تشدید شده در درجات آزادی خاصی از سکو. یکی از نیروهای وارد بر سکو نیروی وارد از طرف رایزرها (ناشی از اصطکاک موجود در محل اتصال آنها به سکو) می‌باشد.

این نیرو به صورت عمودی بر سکو وارد شده و در هنگام جابجایی افقی سکو (Sway و Surge) یا دوران آن حول محورهای افقی (Roll و Pitch) بر مقدار آن افزوده می‌شود.

در این حالت اگر Heave در نظر گرفته‌شود، اصطکاک استاتیکی در محل اتصال رایزرها عامل بازدارنده از جابجایی بیشتر است.

یعنی به طور ضمنی میرایی سیستم افزایش می‌یابد و مقدار حرکت را کاهش می‌دهد.

پس مدلسازی و تحلیل همبسته و همزمان سکو، رایزرها و مهارها در محاسبه تکانها در درجات آزادی مختلف آن تاثیری مفید و مثبت دارد [۱۳].

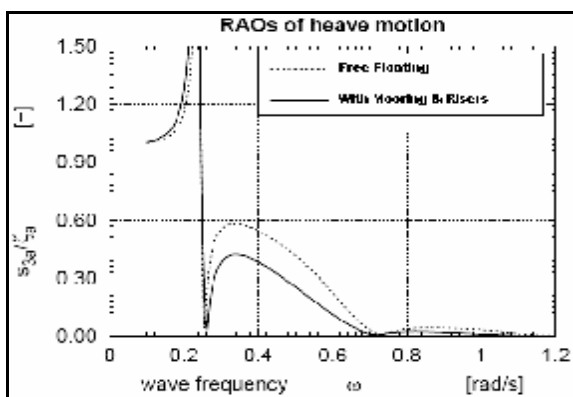
نیروی بازگرداننده یا بازدارنده نام برده در رابطه با سیستم مهاربندی نیز هنگامی بوجود می‌آید که سکو در حرکت انتقالی افقی یا دورانی حول محورهای افقی، از حالت تعادل متوسط خود خارج می‌شود (به جهت کشش اضافی ایجاد شده در مهارها در اثر این حرکات).

حرکت سکو در هر جهت باعث ایجاد نیروی درگ اضافی روی مهارها می‌شود و این عامل ایجاد میرایی اضافی در سیستم است.

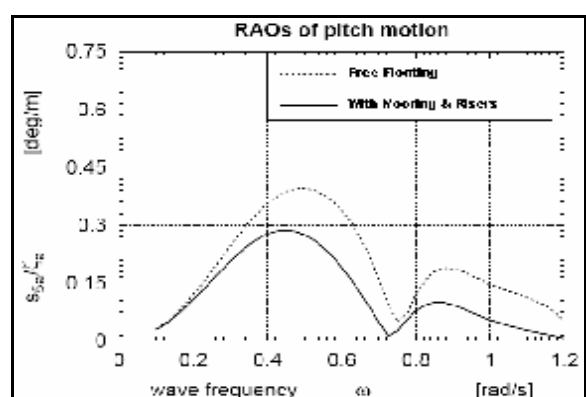
میرایی نامبرده در اثر خطوط مهاری بر خلاف میرایی ناشی از رایزرها که تاثیر آن روی درجات آزادی Surge, Sway, Pitch, Roll بود، بیشترین تاثیر خود را در درجه آزادی Heave نشان می‌دهد.

جدول ۱. ابعاد سکوی شناور ستونی مورد استفاده در تحلیل‌ها

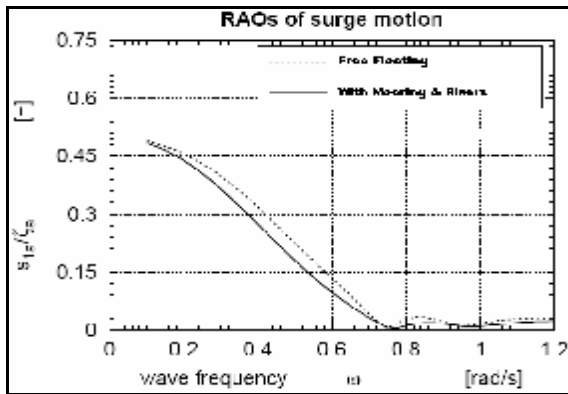
آبخور کل (d) = ۲۰۲/۵ متر	ارتفاع متانسنتریک (GM) = ۳/۱۱ متر	پیش تنیدگی رایزرها، هر کدام = ۱۰۰ KN
قطر بدنه (D) = ۳۶/۴ متر	پریود طبیعی در Heave, $T_{N,3} = ۳۱/۳^{\text{sec}}$	۱۶ عدد مهار هر کدام به قطر = ۱۰۰ mm
شعاع‌های ژیراسیون = ۸۰، ۸۰، ۳۶/۵	پریود طبیعی در Pitch, $T_{N,5} = ۹۵/۹^{\text{sec}}$	پیش تنیدگی مهارها، هر کدام = ۴۰۰ KN
مرکز ثقل (KG) = ۱۳۲/۲۵ متر	۱۶ عدد رایزر هر کدام به قطر = ۳۴۶ mm	



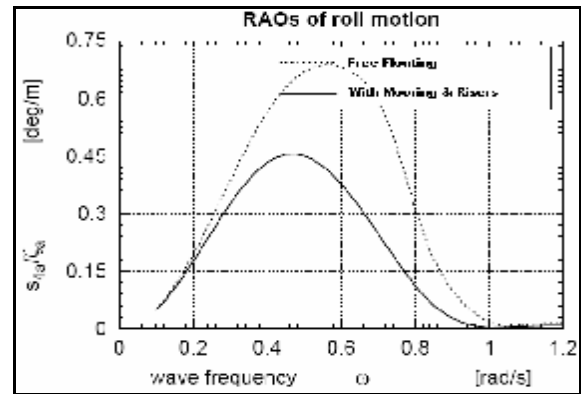
شکل ۵. منحنی RAO در جهت Heave



شکل ۴. منحنی RAO در جهت Pitch

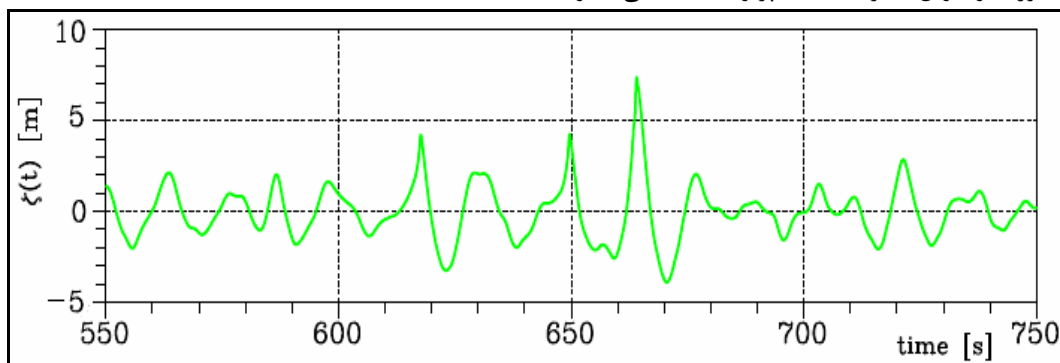


شکل ۷. منحنی RAO در جهت Surge



شکل ۶. منحنی RAO در جهت Roll

در درجات آزادی افقی بسیار بزرگتر از فرکانس امواج برخوردی هستند. بنابراین تکانها و حرکات افقی در فرکانس های پایین و کوتاه، عموماً بزرگتر از حرکات هم‌فرکانس امواج می‌باشند، علیرغم اینکه نیروهای عامل آنها (Second order difference frequency) عموماً از مرتبه‌ای پایینتر از نیروهای ناشی از موج خطی هستند. حقیقت بیان شده عامل مهمی در طراحی سیستم مهاربندی می‌باشد. همانطور که بیان شد فلسفه عام در طراحی SPARها، آبخور بزرگ و زیاد برای کاهش میزان حرکت عمودی سکو بوده‌است. پریودهای طبیعی سکو در درجات آزادی Roll، Pitch و Heave به میزان قابل توجهی بزرگتر از پریود امواجی هستند که بیشترین انرژی را به سکو وارد می‌کنند. بنابراین نیروهای محرک مرتبه دو عامل اصلی پاسخ و حرکت سکو در درجات آزادی عمودی آن می‌باشند. این حقیقت در طراحی ملحقات سکو از جمله رایزرها و سیستم اتصال آنها و انجام عملیات حفاری به صورت ایمن و صحیح باید به دقت مورد توجه قرارگیرد. شکل ۹ منحنی پاسخ حرکت سکو در جهت Surge و Heave و منحنی تغییرات Airgap (فاصله ایمن بین کف زیرین عرشه تا سطح آب) می‌باشد. با توجه به بحث انجام شده، تعیین پاسخ دقیق و واقعی سکو در درجات آزادی Surge، Pitch و Heave بدلیل وجود اندرکنش غیرخطی بین حرکات هم‌فرکانس موج و حرکات با فرکانس‌های کوتاه، مشکل و پیچیده می‌باشد.



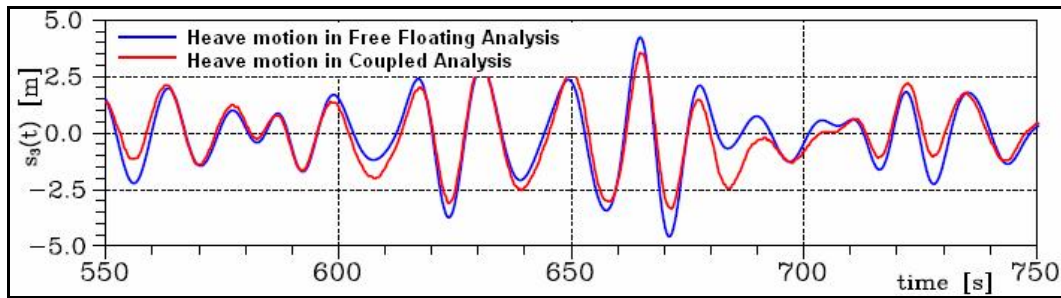
شکل ۸. سری زمانی وضعیت سطح آزاد آب (امواج ورودی) برای تحلیل دامنه زمان

۲-۵. تحلیل در حوزه زمان

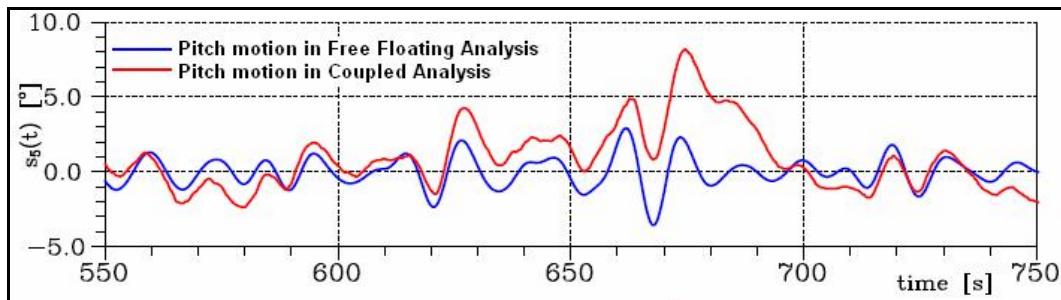
محاسبات در این روش بسیار پیچیده و زمان‌بر بوده و استخراج سریهای زمانی پاسخ سکو کاری سخت است خصوصاً وقتی میرایی سیستم کم باشد که در آن صورت رسیدن به حالت پایدار و مانا در پاسخ سکو بسیار به طول می‌انجامد. در این تحقیق برای رسیدن به حالت پایدار اکثر تحلیلها در زمانی حداقل حدود 500^{sec} و بیشتر (تا 12000 ثانیه) انجام شده‌اند. تحلیل در حوزه زمان در MOSES خیلی دشوار نیست. مهم این است که سکوی مدل شده کاملاً پایدار و متعادل باشد. با فقط یک بار انجام تحلیل در حوزه زمان (البته برای هر سکو در یک شرایط خاص) می‌توان هر نوع نتیجه مرتبط با تحلیل‌های حوزه زمان را دوباره بدست آورد. توضیحات کامل در مورد چگونگی انجام این نوع تحلیل در مرجع [۱۴ و ۱۵] آمده‌است.

۲-۶. پاسخ‌ها و رفتار سکو در فرکانس‌های کوتاه

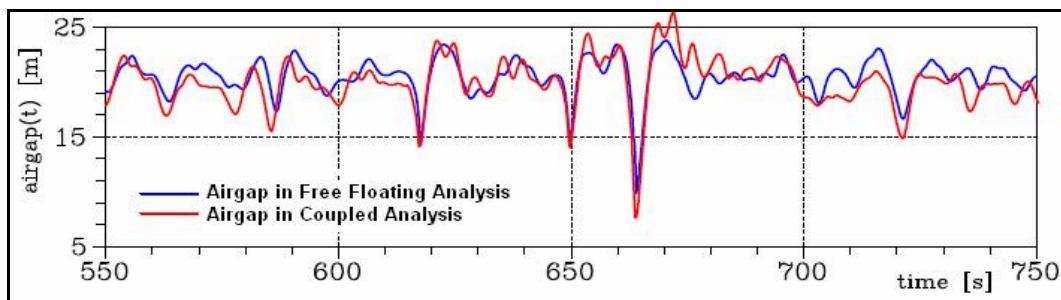
این گونه حرکات برای یک سکوی SPAR مهاربندی شده در درجات آزادی Surge، Sway و Yaw محتمل بوده و ناشی از نوسانهای تشدید شده در اندرکنش غیرخطی مرتبه دوم (یعنی حل مساله اندرکنش سازه و سیال با بکارگیری روابط حاصل از حل perturbation میدان امواج تا مرتبه ۲)، بین امواج و سکو هستند [۱۴]. برای سکوهایی مهاربندی شده بزرگ و طویل نظیر SPARها پریودهای طبیعی سکو



شکل ۹- الف. پاسخ حرکت سکو با فرکانس کوتاه در درجه آزادی Heave با آب‌خور ۲۰۲/۵ متر



شکل ۹- ب. پاسخ حرکت سکو با فرکانس کوتاه در درجه آزادی Surge با آب‌خور ۲۰۲/۵ متر



شکل ۹- ج. منحنی تغییرات Airgap سکو با آب‌خور ۲۰۲/۵ متر

$$d = d(1 - g/2b), \quad e = (1 - g/b), \quad f = g/bd$$

چگونگی ادامه حل مسأله و نحوه برخورد با معادلات فوق در مرجع [۴] به تفصیل آمده است.

در مسأله میرایی، پارامترهای قابل تغییر g و b (پارامترهای نیومارک) هستند.

برای مثال در رابطه با مفهوم ناپایداری دینامیکی مقادیر ۰/۲۵ و ۰/۵ انتخاب شده‌اند. تعیین این مقادیر برای هر نوع مسأله و حتی برای هر درجه آزادی بصورت تجربی و با سعی و خطا صورت می‌گیرد.

در بررسی‌های ما، چگونگی تأثیر مقادیر فوق در مقدار پاسخ عمودی Heave در محاسبات مد نظر بوده که بعنوان نمونه نتایج شکل ۱۰ برای آب‌خور ۲۰۲/۵ متر با و تحت اثر امواج منظم با $H_s=5^m$ و $T_p=10^{sec}$ بدست آمده‌اند.

۷. میرایی

در معادلات حرکت با فرض معلوم بودن جواب معادله حرکت در زمان t_1 ، می‌توان حل معادله را در زمان t_2 برآورد کرد [۳]. بدین ترتیب و بعد از طی چند مرحله و گام محاسباتی، معادله حرکت بصورت زیر خواهد بود:

$$S[q(t_2) - q(t_1)] = \bar{s} \tag{۵}$$

که:

$$\bar{s} = s - [aI + dC]q(t_1) - [bI + eC]q(t_1)$$

$$S = cI + fC + K$$

و:

$$a = 1 - 1/2b, \quad b = -(1/bd), \quad c = 1/bd^2$$

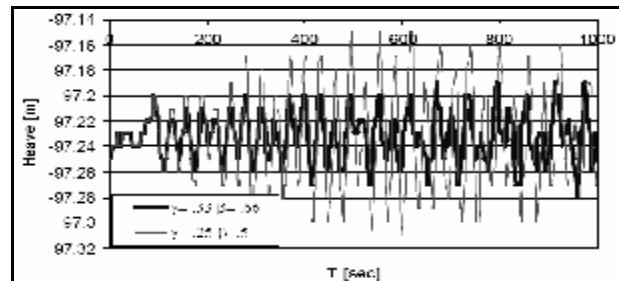
در مقابل حرکات خطی تولید شده، حرکات مرتبه دو هم که در خلال تحلیل حوزه زمانی تولید می‌شوند، ناشی از نیروهای بازگردانندهٔ مهارها هستند. در شکل ۱۲ نیز آهنگ افزایش پاسخ بیشینه درجه آزادی Heave و Pitch با افزایش ارتفاع امواج کاملاً مشهود است. در این شکل نقاط مشخص شده با علامت *، بر پایه نتایج تست مدل انجام شده در مرجع [۳] بوده‌اند که برای صحت سنجی محاسبات تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند و توافق خوبی نیز مشاهده شده است.

۹. پدیده خاص سکوه‌های ستونی: "ناپایداری دینامیکی"

در شرایط خاص، سکوه‌های ستونی در معرض حرکات و تکان‌های پیش‌بینی نشده قرار می‌گیرند، این پدیده را می‌توان با بیان مفهوم ناپایداری دینامیکی مورد بررسی قرار داد (نامی که در مرجع [۳] آقای Larsen برای آن انتخاب کرده و ما نیز برای حفظ امانت آنرا به عاریه گرفته‌ایم). آقای Larsen در تحقیق خود و در حین انجام آزمایش‌های مدل با این تغییر رفتار خاص و دور از انتظار سکوی ستونی روبرو شدند و نام آنرا Dynamic Instability نهاده و در پی علت یابی آن قرار نگرفته و تنها تغییر مقطع ناگهانی در نزدیکی سطح آزاد آب را به عنوان دلیلی بر توجیه آن ارائه نمودند.

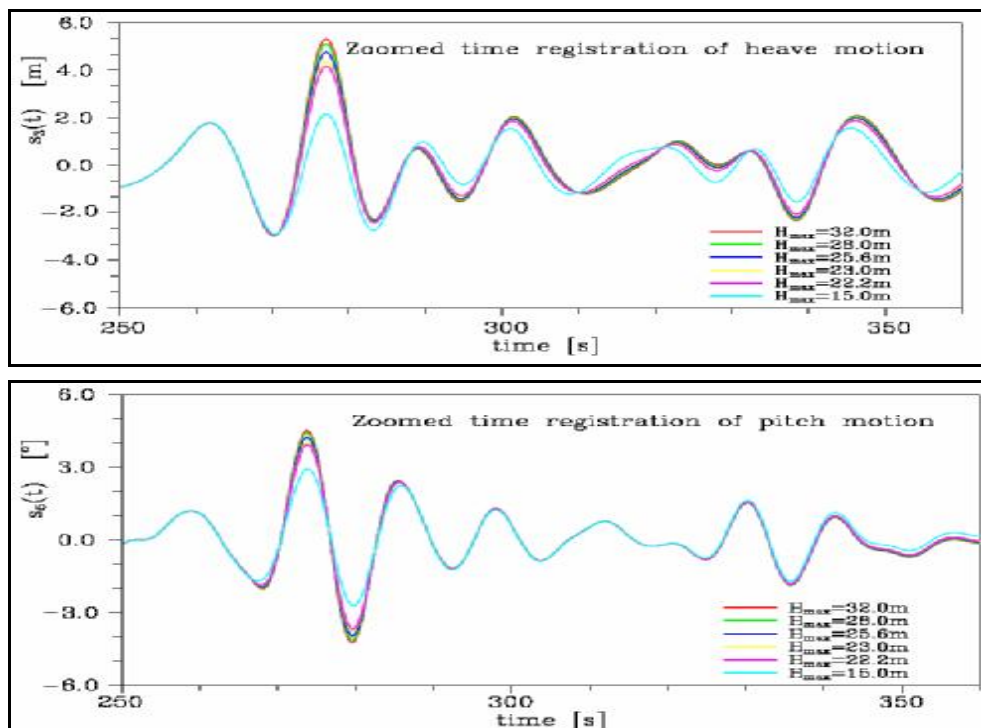
۸. تحلیل در حالت دریای طوفانی

محاسبات باید به اندازه‌ای به طول بیانجامد تا پاسخ به حالت پایدار خود برسد. شکل ۱۱ نتایج تحلیل سکو برای یک طوفان ۳ ساعته (با پریود ۱۴ ثانیه و ارتفاع ماکزیمم متغیر) بر اساس طیف ISSC است و محاسبات جهت رسیدن به پاسخ پایدار در حدود ۱۲۰۰۰ ثانیه ادامه یافته است.



شکل ۱۰. تاثیر پارامترهای نیومارک در پاسخ حرکت عمودی

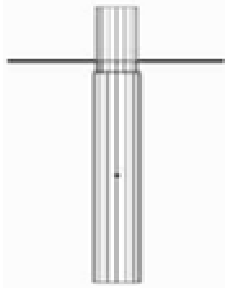
علی‌رغم وجود شرایط شدید محیطی، پاسخ حداکثر حرکت عمودی سکو در حدود ۴/۵ متر مشاهده می‌شود. آبخور زیاد، نیروهای بازگرداننده و عوامل میراگر ناشی از مدلسازی همزمان سیستم مهاربندی، بی‌شک تاثیری مثبت در این زمینه دارند.



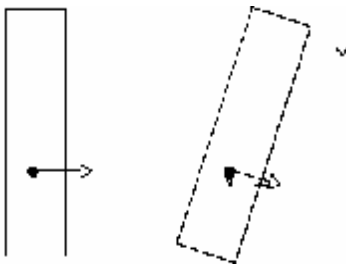
شکل ۱۱. نتایج تحلیل در حالت دریای طوفانی در درجه آزادی Pitch و Heave

۱. وجود تغییر ناگهانی در سطح مقطع در تماس با آب که باعث ایجاد تغییر در مقدار نیروی بازگرداننده در درجه آزادی Heave خواهد شد و هنگامی رخ می‌دهد که در بدنهٔ سکو تغییر مقطع ناگهانی وجود داشته باشد شکل ۱۳.

اما محققین این نوشتار با انجام تست‌های تحلیلی بسیار در حالات و شرایط مختلف به وسیله نرم افزار MOSES و تفسیر و مقایسه نتایج پاسخ آنها، دلایل پدیده فوق و زمان و چگونگی وقوع آنرا مطابق زیر فرموله نموده‌اند. دو دلیل عمده این پدیده عبارتند از:



شکل ۱۳. فرم خاص بدنه سکو، عامل ناپایداری دینامیکی



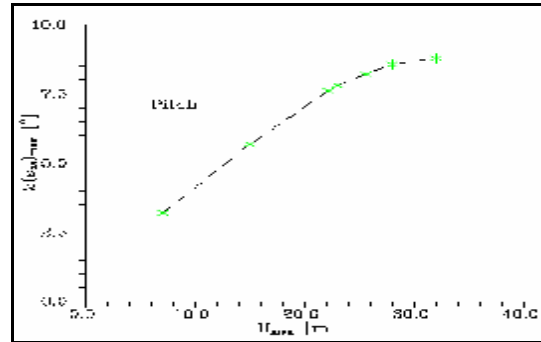
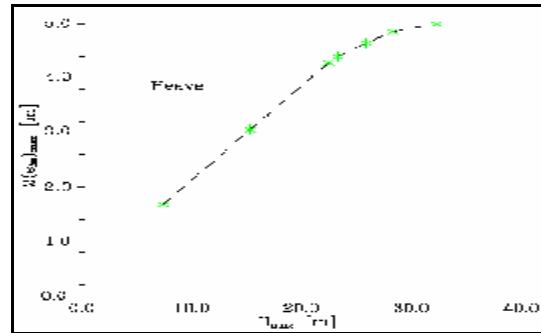
شکل ۱۴. انحراف سکو در اثر نیروی Heave مرتبه دو

$$T_{wave} = \frac{1}{\frac{1}{T_{N,5}} + \frac{1}{T_{N,3}}}, T_{N,3} = \text{heave natural period}, T_{N,5} = \text{pitch natural period}$$

هنگامی که سکو در معرض موجی با این پریود قرار می‌گیرد نوسان تقویت شده سکو در درجه آزادی Heave در هر دو فرکانس طبیعی سکو در Heave و فرکانس موج اتفاق می‌افتد.

البته این مقدار (T_{Wave}) را می‌توان به روش دیگری هم بدست آورد: ابتدا پاسخ سکو به دو روش تحلیل دامنه زمان و فرکانس در درجات آزادی Pitch و Heave محاسبه می‌شود، پریود موج بحرانی هنگامی است که نتایج دو روش ناموافق گردند.

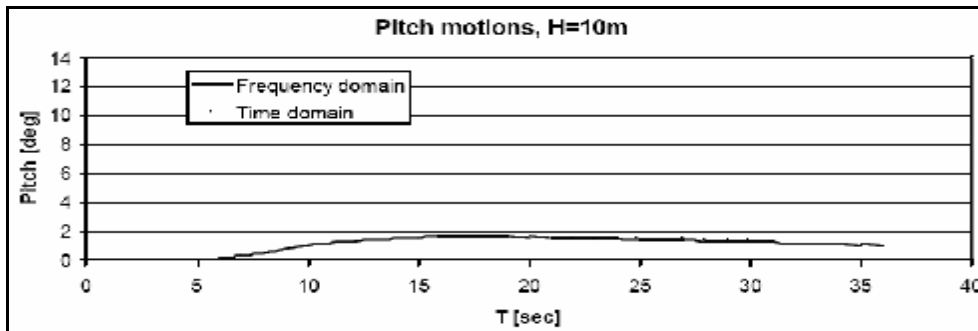
برای مثال در اشکال ۱۵ و ۱۶ در تمامی نقاط توافق کامل بین نتایج بدست آمده در دو روش وجود دارد بجز حدود پریود بحرانی که مقدار آن از روی نمودارها ۲۵/۵ ثانیه مشاهده شده است. (با استفاده از فرمول یاد شده هم حدود همین مقدار بدست خواهد آمد).



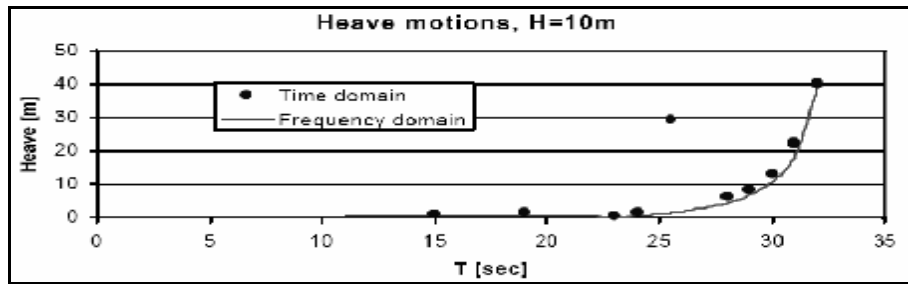
شکل ۱۲. آهنگ افزایش پاسخ بیشینه درجه آزادی Heave و Pitch با افزایش ارتفاع امواج

در چنین حالتی تحلیل‌های حوزه زمان و حوزه فرکانس انجام شده است. پریود موج ناپایدار یکی از مقادیر [1/2 T_N, T_N, 3/2 T_N, ...] می‌باشد، T_N پریود طبیعی در درجه آزادی Heave، وابسته به میرایی سیستم می‌باشد. با محاسبه پاسخ سکو به دو روش حوزه زمان و حوزه فرکانس باید انتظار یک عدم توافق را در حدود پریود موج بحرانی داشت، این اختلاف هنگامی محسوس است که میرایی ناشی از لزجت سیال، خطوط مهاری و رایزرها در نظر گرفته شوند (پریود موج بحرانی حدود T_{cr}=16.5sec خواهد بود).

۲. عامل دیگر ناپایداری دینامیکی، اندرکنش حرکات و تکانهای تقویت شده Pitch و Heave می‌باشد و ارتباطی به یکنواخت بودن یا عدم یکنواختی در سطح مقطع بدنه سکو نداشته و حتی در حالتی که بدنه سکو یک استوانه با سطح مقطع ثابت باشد نیز رخ خواهد داد. این ناپایداری در پریود خاصی از امواج (تابعی از پریودهای طبیعی سکو در حرکات pitch و Heave) رخ می‌دهد:



شکل ۱۵. پدیده ناپایداری دینامیکی در pitch، قابل مشاهده در اختلاف موجود در نتایج تحلیل‌های حوزه زمان و فرکانس



شکل ۱۶. پدیده ناپایداری دینامیکی در Heave، قابل مشاهده در اختلاف موجود در نتایج تحلیلهای حوزه زمان و فرکانس

برای انجام تحلیل‌های همبسته و مدلسازی و تحلیل همزمان و همبسته سکو، سیستم مهاری و رایزرها، یکی از بهترین گزینه‌ها، نرم‌افزار MOSES می‌باشد که بخوبی قابلیت انجام اینگونه تحلیل‌ها را برای شناورهای چون SPAR و نیمه شناور (SEMI-SUBMERSIBLE) دارا می‌باشد.

۱۱. بررسی گزینه‌هایی با فرمهای هندسی متفاوت

به دلیل وجود میرایی کم در حرکات تشدید شده و نیز پریودهای طبیعی کم در درجه آزادی Heave، سکوهایی معمول و کلاسیک SPAR (گزینه اول شکل ۱۸) دچار تکانها و حرکات شدید (بالاخص در جهت حرکت عمودی) خواهند شد [۱۳]، بنابراین لازم است تا تمهیداتی اندیشیده شود و مقادیر پاسخ کاسته شده، در محدوده مجاز قرار گیرد جدول ۲، تعدادی از راهکارهای ممکن که در این تحقیق مد نظر بوده و بررسی شده اند، به شرح زیر هستند:

- ۱- افزایش میرایی در درجه آزادی Heave.
 - ۲- افزایش پریود طبیعی سکو در درجه آزادی Heave به حدی فراتر و خارج از ناحیه انرژی موج برخوردی.
 - ۳- کاهش میزان نیروهای محرک خطی در درجه آزادی Heave.
- شکل ۱۸ نمایشگر ۳ گزینه پیشنهادی برای فرم هندسی بدنه سکو است که هر کدام تا حدی و بنحوی سه هدف بالا را بر آورده می‌سازند.

گزینه دوم با افزودن یک صفحه اضافی با قطر بزرگتر به انتهای بدنه بدست آمده است. اما مقایسه پاسخ سکو در حرکت Heave بروش تحلیل حوزه زمان برای گزینه‌های ۱ و ۲، اختلاف و انحراف نسبی کوچکی را نشان می‌دهد.

این اختلاف ناچیز با محاسبه RAOی دو گزینه در حوزه فرکانس نیز قابل ملاحظه است. گزینه سوم دارای تفاوت‌های قابل توجه در محل مرکز ثقل، ارتفاع متاسنتریک و ... در مقایسه با دو گزینه قبل است.

برای بررسی نحوه ارضای راهکارهای مطلوب یادشده در ابتدای این بخش، شکل ۱۹ برای مقایسه ضرایب میرایی هر ۳ گزینه ارائه شده است، مطابق این شکل میرایی گزینه سوم حدوداً ۱۰ برابر میرایی گزینه‌های اول و دوم است.

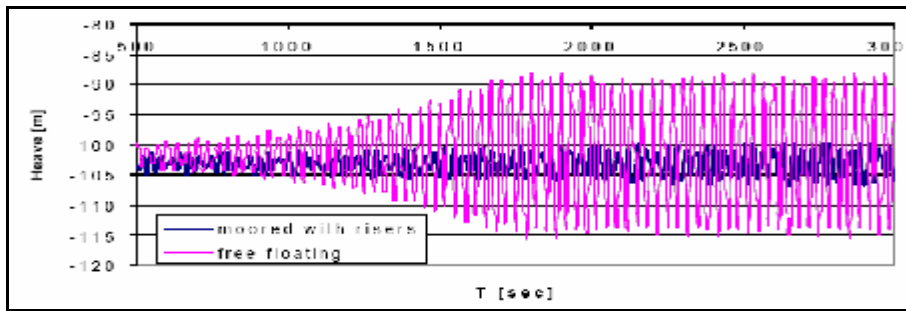
البته جهت امکان مقایسه جوابهای دو تحلیل، ابتدا مقادیر بدست آمده در روش حوزه فرکانس (مقادیر RAO برای موج واحد) در ارتفاع موج واقعی ضرب می‌شوند ($\times H = 10^m$)، سپس پاسخ سکو از طیف امواج و RAO اصلاح شده بدست آمده در کنار پاسخ روش حوزه زمانی، جهت مقایسه قرار می‌گیرد. علاوه بر دو عامل یاد شده، تحریک غیرخطی در درجه آزادی Heave نیز می‌تواند باعث ناپایداری دینامیکی شود بشرط اینکه بجای مفهوم مکان یا موقعیت متوسط (Mean position) از مفهوم جابجایی آن (Displaced position) استفاده شود. مؤلفه عمودی نیروی مرتبه اول، هنگامیکه سکو در جهت Pitch منحرف شده، این اثر را بخوبی تبیین می‌کند شکل ۱۴.

۱۰. تحلیل‌های همزمان و همبسته

هنگام محاسبه مقادیر پاسخ، اثرات دینامیک سیستم مهاربندی و اصطکاک رایزرها بسیار مهم بوده و تاثیر آنها در افزودن میرایی سیستم می‌تواند بمیزان قابل توجهی پاسخ سیستم را کاهش دهد. یکی از شاخص‌های عمده برای طراحی سکوهای SPAR نوسانات دامنه کوتاه هستند که در فرکانس‌های تشدید رخ می‌دهند. مقدار میرایی در پریودهای تشدید کم می‌باشد، بنابراین تخمین دقیق از این میرایی در یافتن پاسخ حالات تشدید بسیار مهم است. در حالت شناوری آزاد و نامقید، هیچ میرایی و عامل استهلاک اضافی ناشی از مهارها و رایزرها در نظر گرفته نشده است.

ولی در حالت دوم خطوط مهاری و رایزرها با مشخصات یاد شده بکار رفته و مدل شده اند (تحلیل همبسته و همزمان). مدلسازی مهارها بصورت خطوط جداگانه و مطابق واقعیت خارجی انجام می‌شود. ولی به جای تمامی رایزرها یک رایزر معادل با پیش تنیدگی ای برابر مجموع پیش تنیدگی ۱۶ رایزر اصلی مدل می‌شود. البته در معادل سازی مقادیر وزن واحد طول، سختی و سیستم اتصال رایزر معادل به کف سکو و بستر دریا، باید دقت زیادی برای رسیدن به حالت معادل منطقی و واقعی انجام شود.

تحلیل‌های همبسته با در نظر گرفتن میرایی و استهلاک اضافی ناشی از همبستگی و همراهی مدل سکو با سیستم مهاری و رایزرها در اعماق بالاتر از اهمیت و تأثیر بیشتری برخوردار بوده و به صرفه بودن طرح از لحاظ اقتصادی و فنی را بیشتر نشان می‌دهد.

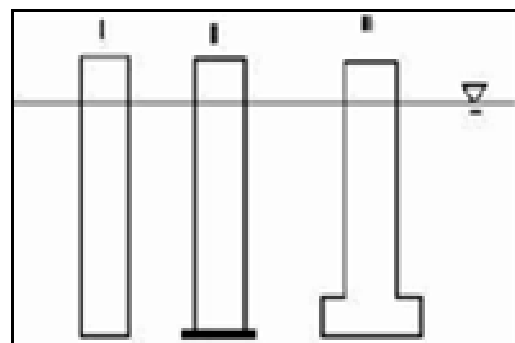


شکل ۱۷. مقایسه پاسخ Heave برای دو حالت: ۱- تحلیل در حالت شناوری آزاد و نامقید، ۲- شناوری مقید و تحلیل همبسته

جدول ۲. مقادیر مجاز آیین نامه API ([۱۲] و [۱۳]) برای میزان حرکات سکوی شناور ستونی در شرایط مختلف کاری

فعالیت	مدت زمان (%)	بیشینه مجاز دامنه حرکت انتقالی عمودی (متر)	بیشینه مجاز دامنه حرکات دورانی (درجه)	بیشینه مجاز حرکات انتقالی افقی (% عمق آب محل)
حفاری	۴۳/۴	۱/۱-۲/۵	۳-۷	۵
جایگذاری غلافها و لوله های انشال	۱۲/۵	۰/۸-۱	۳-۴	۳
دوغاب ریزی و آزمون چاه	۱۱	۰/۸-۱/۷	۵-۷	-
مواقع اضطراری و تعمیرات	۹/۹	۰/۴-۱	۱	۱

اضافه شده باید بسیار بزرگتر از قطر سکو (به حدی که این گزینه عملاً غیر واقعی و غیر اجرایی است) باشد و تنها در این صورت میزان نیروی محرک در درجه آزادی Heave کاسته می‌شود. گزینه سوم با دارا بودن میرایی و پریود طبیعی بیشتر، کمترین پاسخ حرکت عمودی را خواهد داشت؛ با افزایش آبخور در این گزینه می‌توان مقدار پاسخ Heave و نیروهای وارده را باز هم کاهش داد، که عملاً به دلیل قیود اقتصادی موجود این کار انجام نمی‌شود.



*گزینه اول یک سکوی معمولی با مشخصات یاد شده در بخش قبل است
*گزینه دوم سکویی با ابعاد و اندازه های گزینه اول ولی با یک صفحه دایره ای بزرگتر در انتها (قطر صفحه ۱/۳۲ برابر قطر بدنه سکو و ضخامت آن ۰/۲ متر است)
*گزینه سوم شامل دو استوانه اصلی که استوانه بالایی با ابعاد گزینه اول و استوانه پایینی با قطری ۲/۵۹ برابر قطر استوانه بالایی و ارتفاع ۳۰ متر می باشد

شکل ۱۸. نمایی ساده از گزینه‌های مورد بررسی

۱۲. بحث و پیشنهاد

در این تحقیق پاسخ حرکتی ناشی از تاثیر امواج بر سکوی SPAR مورد بررسی قرار گرفت.

کلیه محاسبات به دو روش تحلیل در حوزه زمان و فرکانس انجام شده‌اند تا مقایسه نتایج و اطمینان از صحت و دقت آنها ممکن باشد. تحلیل‌های پاسخ همبسته با مدلسازی همزمان سیستم مهاربندی، رایزرها و بدنه سکو صورت گرفته‌اند و مرور نتایج حاصل، نشانگر اهمیت و تاثیر مثبت و مفید اینگونه تحلیلها در طراحی صحیح‌تر، دقیقتر و حتی بهینه‌تر سکو می‌باشد.

همچنین اشکال مختلف و بهبود یافته فرم هندسی بدنه سکو (نسبت به فرم متداول و کلاسیک) نیز برای دستیابی به بهترین رفتار حرکتی (خصوصاً در درجه آزادی Heave) تحت بررسی قرار گرفته‌اند که بار دیگر نتایج جالب بدست آمده از تحلیل پاسخ سکوه‌های تغییر فرم یافته و پیچیده‌تر (برای مثال، گزینه سوم یاد شده در متن اصلی)، نشانگر اهمیت و لزوم ایجاد تغییرات مختلف، منطقی و بعضاً خلاقانه

نکته دیگر، افزایش پریود طبیعی سکو در درجه آزادی Heave است که با اضافه کردن یک صندوقه با قطر بزرگتر در انتهای پایینی سکو بدست آمده است؛ جرم اضافی یا جرم هیدرودینامیکی نیز به لحاظ تغییر فرم هندسی سکو افزوده شده و عاملی برای کاهش نیروی محرک در درجه آزادی Heave می‌باشد.

در مورد گزینه دوم بلحاظ تئوری، با افزودن یک صفحه دایره ای در انتهای پایینی سکو، مقدار جرم اضافه افزوده می‌شود ولی آزمایش های عملی مدل ([۱۳]) در کنار تحلیل‌های ما در این تحقیق نشان داده اند که برای قابل توجه بودن مقدار این افزایش، قطر صفحه

[4] Chou, F.S., "Introduction to an Analyzing Scheme for the Motions and Forces of an Ocean Platform in Random Seas" SNAME Transactions, Vol.15. No.4. 1977, 32–50.

[5] Akagi, S., and Ito, K., "Optimal Design of Floating Platforms Form by Minimizing its Motion in Random Seas", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Transactions of the ASME, Vol.10, No.6: March 1984, 23–30

[6] Akagi S., Ito K., and Yokoyama R., "Optimal Design of Semisubmersible's Form Based on Systems Analysis", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Transactions of the ASME, Vol.10, No.6, December 1984, 524–530.

[7] Saito, K., "A Calculation Method for the Motions and Forces of an Ocean Structure in Waves," Technical Report 91/3, Institute of Naval Architecture and Ocean Engineering, Technical University of Berlin., Berlin, Germany, February 1991.

[8] Kagemoto, H., "Minimization of Wave Forces on an Array of Floating Bodies", Applied Ocean Research, Vol.14. No.2: 1992. pp. 83–92.

[9] Vasconcellos, J.M., "One Approach to TLP Preliminary Design Using Advanced Techniques", in Proc. of Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE '96), Florence, vol. I, Italy, 1996, pp. 457–466.

[10] Ultramarine Inc., *MOSES Manual*, Offshore Engineering Software, 2002.

[11] *VAMIT Teorical Reference Manua*", M.I.T Press, 1987-1999, last edition.

[12] Adjami ,M., "Hydrodynamic Optimization of semisubmersibles Hull Form Using Genetic Algorithm", M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2003.

[13] *API Recommended Practice 2SK: Recommended Practice for Design and Analysis of Station keeping Systems for Floating Structures* ; Second Edition, December 1996; American Petroleum Institute.

[14] Red, R.I., "Analysis of Buoy Motions and their Effects", Teaching Lecture notes at Aberdeen University, Civil Engineering Department.

[15] Ultramarine Inc., *Vamit-Moses Comparison Study*, Offshore Engineering Software, 2000.

در فرم هندسی بدنه سکو برای دستیابی به رفتار حرکتی بهینه تر می باشد.

بدون شک، کسب نتایج بهتر و بهینه تر با انجام فعالیت های مختلف یاد شده در این تحقیق، بر پایه عوامل و دلایل منطقی و قابل بحث بوده که در متن اصلی در حد آگاهی و بضاعت نویسنده به آنها اشاره شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند (از جمله ایجاد میرایی اضافی و ...).

برای رسیدن به یک طرح بهتر و در نهایت یک طرح بهینه، زمینه های بحث و بررسی و تحقیق بسیاری وجود دارند؛ برخی از موارد قابل بررسی - در رابطه و در ادامه این تحقیق - عبارتند از:

۱- در نظر گرفتن اثرات باد و جریان و مدل کردن آنها در MOSES. این دو پدیده بیشترین تاثیر را بر حرکات در فرکانس کوتاه و پایین دارند.

۲- بررسی پدیده رایج و معروف Vortex Shedding در رابطه با سازه های استوانه ای شکل و نوسانات تشدید شده ناشی از آن. البته در عمل برای مقابله با اینگونه حرکات و تکانها از نقشینه و فرم ماریچ (Strakes Helical) در بدنه سکو استفاده می شود. این فرم و حالت ابتکاری برای بدنه سکو با ایجاد میرایی بیشتر در درجه آزادی pitch، مقدار دوران و نیز ناپایداری دینامیکی را در این درجه آزادی تقلیل می دهد.

۳- می توان با بررسی تعداد بیشتر و متنوع تری از گزینه های مختلف فرم هندسی بدنه، هر چه بیشتر و بهتر به سکویی با پاسخ حرکتی کمینه نزدیک شد؛ البته در حالت ایده آل و آرمانی می توان با استفاده از یک فرآیند بهینه ساز به بررسی جامع و نهایتا بهینه سازی هیدرو دینامیکی فرم هندسی بدنه سکو در یک یا چند درجه آزادی پرداخت. (مانند [۱۲]).

مراجع

[1] Chakrabarti, S.K., "Hydrodynamics of Offshore Structures", Computational Mechanics Publications, Springer Verlag, Berlin, 1978.

[2] API Recommended Practice 2FPS; "Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Floating Production Systems"; First Edition, March 2001; American Petroleum Institute.

[3] Larsen, T.J., "Modeling of Wave Induced Motions of a SPAR Buoy", M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2002.