

آنالیز دینامیکی سکوه‌های برجی مهار شده تحت اثر امواج نامنظم

محمدجواد کتابداری^۱، امیر یزدان پور^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریائی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۲- کارشناس ارشد سازه های دریایی، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان

چکیده

سکوی برجی مهار شده نوعی سکوی تطبیقی فراساحلی است که جهت حفاری و استخراج نفت در آب‌های عمیق استفاده می‌گردد. این سکو دارای پایه‌ای انعطاف پذیر می‌باشد که استفاده از سیستم مهاری مناسب جهت کنترل حرکات عرشه را الزامی می‌نماید. در این تحقیق این نوع سکو تحت اثر امواج نامنظم تصادفی در حوزه فرکانس مورد آنالیز قرار گرفته است. نیروی تحریک از طیف پیرسون مسکوویچ و به کمک رابطه مورین بدست می‌آید. مدلسازی رفتار کابل‌های مهاری بدلیل سختی متغیر و اندرکنش غیر خطی آنها با سازه اصلی پیچیده است. بدین منظور با استفاده از داده‌های آنالیز استاتیکی ابتدا نمودار نیرو - مکان کابل رسم شده و بر یک معادله درجه پنج انطباق داده شده است. سپس با استفاده از این معادله نیروهای فتری کابلها خطی سازی گردید. همچنین نیروی درگ خطی سازی گردیده و در معادله دینامیکی قرار گرفتند. نتایج آنالیز نشان داد که خطای ناشی از خطی سازی معادلات دینامیکی در جوابهای نهایی نسبتا کم می‌باشد. از نتایج این تحقیق می‌توان جهت طرح بهینه سکوه‌های برجی مهار شده در آبهای عمیق بخصوص بررسی امکان کاربرد آن در دریای خزر استفاده نمود.

کلمات کلیدی: سکوی برجی مهار شده، آنالیز دینامیکی، بازه فرکانسی، امواج نامنظم

Dynamic Analysis of Guyed Towers Due to Irregular Waves

Mohammad javad Ketabdari¹, Amir yazdanpour²

1- Assistant Professor, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology

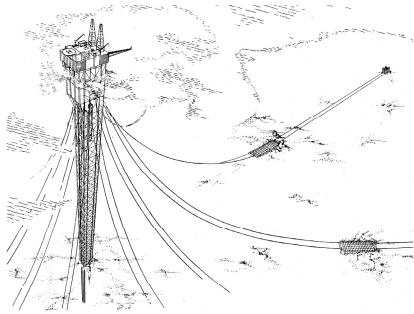
2- M.Sc. graduated in Marine Structures, Civil Eng. Group, Hormozgan University

Abstract

Guyed tower is a compliant offshore platform used for drilling and extraction of oil in deep water. This platform has a flexible body and needs proper mooring system to control the deck movements. In present study this platform is analyzed in frequency domain due to irregular waves. The exiting force extracted from Pierson Moskovi's spectrum using Morrison Equation. Modeling of moorings is difficult due to their variable stiffness and non linear interaction with main structure. Therefore first using static analysis data the diagram for mooring force-excursion was obtained and fitted to a polynomial of order 5. Then using this equation the spring force of moorings was linearized. Furthermore the drag term was linearized and both of these two linearized terms used in dynamic equation of motion. The results of analysis showed that errors due to these linearization on final results is negligible. Results of this research can be used for optimum design of guyed towers in deep water and its special application in Caspian Sea can be considered.

Keywords: Guyed Tower, Dynamic analysis, Frequency Domain, Irregular Waves

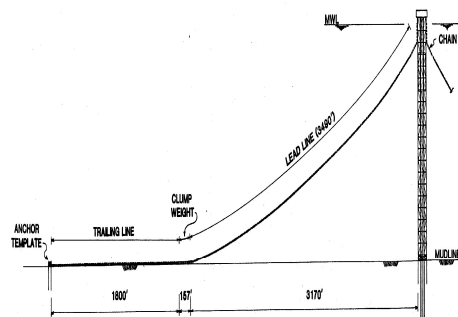
۱- مقدمه



شکل ۱ - نمایی از یک سکوی برجی مهار شده

فونداسیونها دشواری نصب آن، نشست به مرور زمان آن، چرخش پیچشی سازه و همچنین امکان پدیده خزش در بستر دریا می‌باشد. فونداسیون‌های شمعی بصورت ضربه‌ای نصب می‌گردند. این شمعها معمولاً در نزدیک مرکز برج نصب شده و در تمام طول برج امتداد می‌یابند. گیرداری فونداسیون با تغییر فاصله بین شمع‌ها تنظیم می‌گردد. چنین سیستمی یک پایه ثابت را ایجاد می‌کند که با توجه به طول زیاد و انعطاف پذیری مناسب شمعها به عرشه سکو اجازه جابجایی جانبی را می‌دهد.

سیستم مهاری از کابل‌هایی که در تراز میانی آب به سازه متصل شده و به صورت شعاعی در گرداگرد برج چیده می‌شوند، تشکیل شده است. کابل‌های مهاری از برج به وزنه‌های تعادل در کف دریا امتداد یافته است. در شرایط عادی وزنه‌های فوق‌الذکر در بستر دریا باقی مانده و حرکت جانبی سکو را محدود می‌کند. در هنگام طوفان شدید این وزنه‌ها از کف دریا بلند می‌شوند در نتیجه سکو می‌تواند بارهای محیطی را با حرکت جانبی به جلو و عقب تحمل کند بدون اینکه از ظرفیت باربری کابل‌ها تجاوز شود [۳]. شکل ۲ سیستم مهاری شماتیک این نوع سکوها را نشان می‌دهد.



شکل ۲ - قسمتهای سیستم مهاری سکوی برجی مهار شده

گسترش اکتشاف و استخراج نفت به سوی نقاط عمیق در دریاها توجه به نسلی دیگر از سکوها به صورت برجی مهار شده را به خود جلب نموده است که از یک سو مانند سکوهای آب کم عمق به بستر دریا متصل هستند و از سوی دیگر مانند سکوهای متحرک آب عمیق به صورت شناور عمل می‌نمایند [۱].

سکوهای برجی مهاری شامل چهار مؤلفه اصلی عرشه، برج، فونداسیون و سیستم‌های مهاری هستند. برج به خریای سکوها ثابت شابلونی شباهت دارد ولی عموماً دارای مقطع ثابت بوده و عرشه روی آن سوار است. بنابراین اصول طراحی این سکوها مشابه سکوها شابلونی ثابت در آب عمیق است. اغلب در قسمت بالایی برج برای کاهش بارهای قائم وارد بر فونداسیون تانکرهای شناور بزرگ دائمی نصب می‌گردد. علاوه بر این مخازن شناور نیروهایی بر سازه وارد می‌کنند که باعث برگشتن سازه به حالت اولیه می‌گردد. اگر این مخازن پایین تر از محدوده اثر موج قرار گیرند نیروهای وارده ناشی از موج به حداقل خواهد رسید. برای حداقل نمودن پاسخ پیچشی برج باید تا آنجا که ممکن است مخازن را کنار یکدیگر قرار داد تا ممان اینرسی قائم حداقل گردد. همچنین در هنگام آب اندازی سازه مخازن شناور باعث می‌شوند بالای برج به صورت شناور در نزدیکی تراز آب باقی بماند و در هنگام اتصال کابل‌های مهاری، تعادل خود را حفظ کند. بکار گرفتن شناورها مانند نیروهای تعادلی است که سیستم کابل‌های مهاری را یاری می‌دهد. شکل ۱ نمای کلی سکوی برجی مهار شده را نشان می‌دهد. جهت اتصال برج این نوع سکوها به بستر دریا معمولاً دو نوع فونداسیون مفصلی و شمعی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

فونداسیونهای مفصلی بر پایه سیستم خریاهای مسلح شده با پوسته‌های سخت می‌باشد. رفتار این فونداسیونها بدین گونه است که بر روی خاک بصورت شناور عمل می‌کنند و خاک در مقابل چرخش پایه نیروی ناچیزی به سازه وارد می‌کند و سازه به راحتی بر روی پاشنه خود می‌چرخد. مشکل عمده این نوع

۲- مدل سازی برج

همچنین در این مدل از اینرسی دورانی جرم‌های تشکیل شده صرف نظر می‌شود و ماتریس سختی برج شامل سختی هندسی ناشی از اثر وزنی سازه می‌باشد [۴]. در این مدل سیستم کابل‌های مهاری در آنالیز دینامیکی بصورت بی‌وزن در نظر گرفته شده که بصورت فنر غیرخطی در نقاط اتصال به سازه نیرو وارد می‌کنند. نیروهای برگشتی کابل‌های مهاری بر پایه آنالیز استاتیکی کابل‌ها محاسبه می‌شوند. از اثر دینامیکی وزنه‌های تعادل نیز صرف نظر شده است. جهت اتصال سازه به بستر دریا از شمعهایی که در وسط برج قرار داده شده‌اند استفاده گردیده است. از این رو عکس‌العمل شمع‌ها بصورت فنر چرخشی مدل شده که سختی آن بسیار کم است [۵]. برای نمایش طیفی موج، از طیف پیرسون موسکوویچ استفاده گردیده است و از اثر نیروی باد و جریان‌های دریایی بر سازه صرف نظر گردیده است.

۳- تعیین ضرایب هیدرودینامیکی

با استفاده از روش سختی مستقیم^۱ ماتریس سختی تیر معادل به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (4+a)EI^*/\ell & (2-a)EI^*/\ell & 6EI^*/\ell^2 & -6EI^*/\ell^2 \\ & (4+a)EI^*/\ell & 6EI^*/\ell^2 & -6EI^*/\ell^2 \\ & & 12EI^*/\ell^3 & -12EI^*/\ell^3 \\ & & & 12EI^*/\ell^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

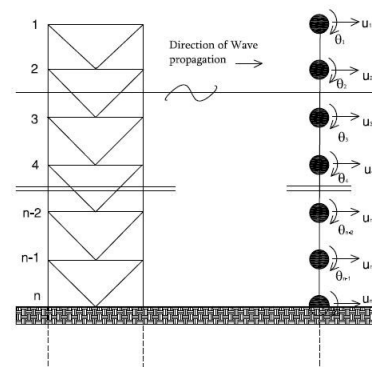
sym

که در آن a عرض دهانه، ℓ ارتفاع پانل، E مدول یانگ فولاد و I^* ممان اینرسی معادل می‌باشد. از اسمبل کردن ماتریس‌های سختی المان‌های تیرهای معادل، ماتریس سختی کل بدست می‌آید. شکل ماتریسی معادله حرکت سازه را می‌توان بصورت زیر نمایش داد:

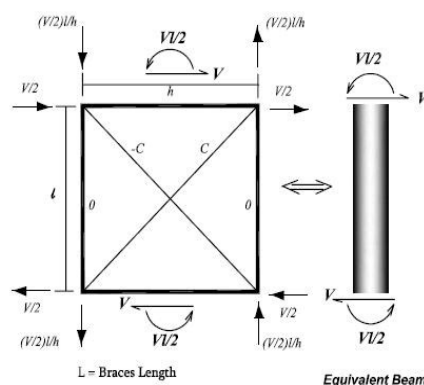
$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + \{\ell g\} R(xg) = \{F_W\} \quad (2)$$

¹ Direct Stiffness Method

در مدلسازی دینامیکی سازه از روش جرم متمرکز استفاده می‌شود (شکل ۳). در این روش جرم اعضای مختلف سازه در گره‌های مربوط متمرکز شده و نیروهای افقی موج بر این اجسام متمرکز محاسبه می‌شوند. در این روند سازه بصورت خرپا در نظر گرفته می‌شود و فرض بر این است که مقاومت در مقابل چرخش ناچیز می‌باشد. به منظور محاسبه خصوصیات سازه قاب سازه با یک تیر معادل مدل می‌شود که در این صورت سازه دو بعدی خواهد بود. سختی‌های مدل تیر معادل با سازه با استفاده از اصل نیروی مجازی بدست می‌آیند که برای حالت دو بعدی برای هر پانل از سازه، چهار درجه آزادی در نظر گرفته شده است. در این مدل دو بعدی بین هر دو جرم متمرکز تیر معادلی در نظر گرفته می‌شود که طول آن با فاصله دو جرم متمرکز برابر است و دارای سختی‌های خمشی و برشی ثابت می‌باشد. شکل ۴ نحوه مدلسازی بادبند X را نشان می‌دهد.



شکل ۳ - سازه حقیقی و مدل تیر معادل آن



شکل ۴ - سیستم نیروی برشی برای مهار بندی X شکل

نیست. نیروی امواج از معادله مورینسن به شرح ذیل حاصل می‌گردد:

$$\{F_w\} = \left[\frac{1}{2} \rho C_d A \right] \{ (v_w - \dot{x}) | v_w - \dot{x} | \} + [\rho C_m \nabla] \{ \dot{v}_w \} - [\rho (C_m - 1) \nabla] \{ \ddot{x} \} \quad (6)$$

که در آن $\{v_w\}$ و $\{\dot{v}_w\}$ سرعت و شتاب ذره موج است. C_d ضریب هیدرودینامیکی درگ و C_m ضریب اینرسی است. $[A]$ ماتریس نشاندهنده سطح تحت تأثیر نیرو در گره مورد نظر و $[\nabla]$ ماتریس جابجایی حجمی سازه است.

همانطور که در معادله (۶) مشاهده می‌شود نیروی هیدرودینامیکی به دلیل وجود ترم درگ که دارای توان دوم سرعت می باشد، غیرخطی بوده و به منظور کاربری در آنالیز حوزه فرکانس باید آن را خطی نمود. این کار با استفاده از روش گوس به صورت زیر صورت می‌گیرد:

$$\left[\frac{1}{2} \rho C_d A \right] \{ (v_w - \dot{x}) | v_w - \dot{x} | \} = [a] \{ v_w - \dot{x} \} \quad (7)$$

در واقع عبارتی غیرخطی برحسب سرعت با حاصلضرب مقداری خطی در یک عامل دارای توزیع احتمالی جایگزین می‌شود. در این روش با استفاده از کمینه مربعات میانگین احتمال خطای حاصله به حداقل می‌رسد. با استفاده از روش‌های آماری و با فرض توزیع احتمالی گوسی برای سینماتیک ذرات آب مقدار $[a]$ برابر خواهد بود با:

$$[a] = \left[\frac{1}{2} \rho C_d A \right] \left[\sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{\dot{x}_i} \right] \quad (8)$$

که در آن $\sigma_{\dot{x}_i}$ انحراف استاندارد سرعت اربیتالی موج به سازه است ($\dot{x}_i = v_w - \dot{x}$). اکنون مقادیر زیر تعریف می‌گردند:

$$M_{a_i} = \rho (C_{m_i} - 1) \nabla \quad (9)$$

در رابطه فوق $\{x\}$ و $\{\dot{x}\}$ و $\{\ddot{x}\}$ بردارهای افقی جابجایی، سرعت و شتاب برج و Xg جابجایی افقی گره اتصال کابل مهاری به برج است. $[M]$ و $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریسهای جرم سازه، میرایی و سختی برج می باشند. $R(xg)$ نیروهای برگشتی ناشی از سیستم مهاری است. $\{lg\}$ بردار ثابت المان‌هاست که برای المان وابسته به حرکت گره‌های متصل به کابل مهاری مقدار ۱ و برای مابقی المان‌ها مقدار صفر دارد. $\{F_w\}$ بردار نیروی موج بر سازه می‌باشد. در این معادله ماتریس جرم $[M]$ با فرض متمرکز بودن جرم‌ها بصورت قطری در می‌آید و با صرفنظر از اینرسی دورانی، تمام اعضای این ماتریس بجز اعضای قطری، صفر خواهد بود. اگر $\hat{K}$ ترکیبی از سختی الاستیک و میرایی تعریف گردد داریم:

$$\hat{K} = K (1 + i \zeta) \quad (3)$$

اگر β نسبت فرکانس بارگذاری به فرکانس نوسانات سازه و ξ نسبت میرایی باشد داریم:

$$\zeta = 2 \xi \beta \quad (4)$$

در این حالت مقدار انرژی در هر سیکل در دامنه ثابت، دقیقاً همانند حالت میرایی لزج به فرکانس تحریک بستگی دارد. این وابستگی فرکانس را با استقلال فرکانس ضریب میرایی هیسترتیک ζ می‌توان از میان برد. بدین منظور معادله (۳) برای حالت تشدید که $\beta = 1$ است به صورت زیر تبدیل می‌گردد:

$$\hat{K} = K [1 + i 2 \xi] \quad (5)$$

بدلیل رفتار مستقل فرکانسی برای این نوع سختی (مخلط) در بیشتر تحلیل‌های کلی واکنش هارمونیک توصیه شده است. قسمت حقیقی $\hat{K}$ سختی سازه و قسمت موهومی آن جمله استهلاک سازه‌ای می‌باشد. با استفاده از این روش در عمل ماتریس میرایی در معادله (۲) در ماتریس سختی ادغام شده و دیگر نیازی به در نظر گرفتن ماتریس میرایی به صورت مستقل

رابطه ضرایب K_{eq} و R_o به صورت زیر حاصل می گردند [۶].

$$K_{eq} = \frac{E\{X_g R(xg)\} - E\{X_g\} E\{R(X_g)\}}{E\{X_g^2\} - E^2\{X_g\}} \quad (14)$$

$$R_o = \frac{E\{X_g^2\} E\{R(X_g)\} - E\{X_g\} E\{X_g R(X_g)\}}{E\{X_g^2\} - E^2\{X_g\}} \quad (15)$$

که در آن E تابع امید ریاضی است. به منظور ساده سازی محاسبات در معادلات (۱۴) و (۱۵) سختی نیروهای برگشتی نسبت به جابجایی X_g با یک چند جمله ای درجه پنج به صورت زیر بیان می گردد [۶]:

$$R(X_g) = k_o X_g + d_1 X_g^3 + d_2 X_g^5 \quad (16)$$

که در آن مقادیر k_o و d_1 و d_2 از کمینه سازی مربعات محاسبه می گردند. با استفاده از روش گوس برای X_g ضریب خطی شده در معادلات (۱۴) و (۱۵) برابر است با [۶]:

$$K_{eq} = K_o + 3d_1 (\bar{X}_g^2 + \sigma_{X_g^2}) + 5d_2 (\bar{X}_g^4 + 6\bar{X}_g^2 \sigma_{X_g^2} + 3\sigma_{X_g^4}) \quad (17)$$

$$R_o = -2d_1 \bar{X}_g^3 - 4d_2 (\bar{X}_g^5 + 5\bar{X}_g^3 \sigma_{X_g^2}) \quad (18)$$

که $\bar{X}_g$ متوسط X_g و σ_{X_g} انحراف معیار X_g می باشد.

۴-۲. روش سختی متوسط

در این روش سختی خطی شده مانند متوسط مقدار محدوده نوسان گره های اتصال کابل از متوسط

$$C_{d_i} = \frac{1}{2} \rho C_{D_i} A \left(\frac{8}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \sigma_{\dot{x}_i} \quad (10)$$

با توجه به تعاریف فوق خواهیم داشت:

$$F_{w_i}(t) = \rho \nabla C_{m_i} \dot{V}_{w_i} + a_i V_{w_i} - M_{a_i} \ddot{x}_i - C_{d_i} \dot{x}_i = F_{w_i}^* - M_{a_i} \ddot{x}_i - C_{d_i} \dot{x}_i \quad (11)$$

$$F_{w_i}^* = \rho \nabla C_{m_i} \dot{V}_{w_i} + a_i V_{w_i}$$

که در آن جمله های M_{a_i} و C_{d_i} به ترتیب جرم اضافه و ضریب هیدرودینامیکی درگ بوده و ماتریس های $[M_{a_i}]$ و $[C_{d_i}]$ ماتریس های قطری هستند. تمام اعضای این دو ماتریس به جز همان اعضای که در مورد ماتریس جرم ذکر شد، صفر می باشند. لذا برای معادله حرکت داریم شد:

$$[M + M_a]\{\ddot{x}\} + [C_d]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + \{\ell g\} R(xg) = \{F_w\} \quad (12)$$

۴- خطی سازی معادلات

به منظور بکارگیری آنالیز حوزه فرکانس بخش های غیرخطی معادله حاکم خطی گردیده است. با توجه به اینکه کابل های مهاری سکو بصورت فنر غیرخطی بر سازه نیرو وارد می کنند به دو روش میتوان این نیروها را خطی سازی نمود:

۱- روش خطی معادل

۲- روش سختی متوسط

۴-۱. روش خطی سازی معادل

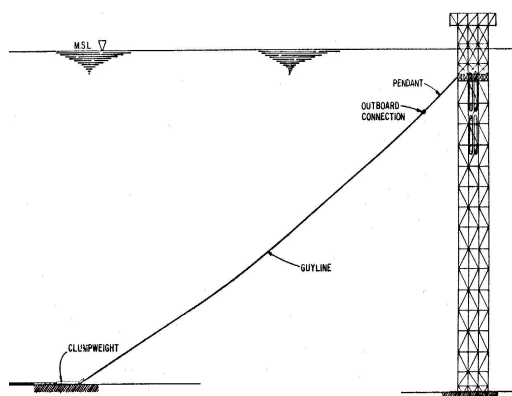
در این روش نیروی غیرخطی $R(xg)$ بصورت زیر خطی می گردد:

$$R(xg) \cong K_{eq} X_g + R_o \quad (13)$$

که ضرایب خطی شده در معادله (۱۳) با فرض کوچک بودن توان دوم خطاها در نظر گرفته شده است، در این

نامنظم صورت گرفته است. مدل آنالیز در شکل ۵ نشان داده شده است. این مدل مشابه مدل آنالیز شده در مراجع [۶] و [۷] می‌باشد. مشخصات سازه به شرح ذیل است:

- ابعاد عرشه سازه ۱۵۶*۱۵۶ فوت و وزن آن ۳۵۰۰ تن و تراز نهایی عرشه ۱۱۵+ فوت
 - مقطع سازه ۱۲۰*۱۲۰ فوت شامل ۱۶ پایه به قطر ۵۴ اینچ
 - ارتفاع برج سازه ۱۰۷۹ فوت، وزن برج ۲۱۰۰۰ تن، وزن کل سازه و عرشه و شمعهها و فونداسیون ۴۳۰۰۰ تن
 - فونداسیون شامل ۶ عدد شمع پیچشی^۱ هر یک به قطر ۷۲ اینچ و عمق نفوذ ۱۰۰ فوت با وزن کل ۵۰۰ تن، ۸ عدد شمع اصلی^۲ هر یک به قطر ۵۴ اینچ و عمق نفوذ ۵۶۰ فوت و وزن کل ۶۰۰۰ تن
 - تعداد ۳۰ عدد کابل مهاری در تراز ۸۵- فوتی منشعب شده که هر یک طول ۴۰۰ فوت و وزن ۱۰ تن (وزن کل ۳۰۰ تن) دارند.
- نیروهای برگشتی کابل‌های مهاری حاصل از آنالیز استاتیکی در شکل ۶ نمایش داده شده است. با انطباق داده‌های آنالیز استاتیکی بر معادله درجه ۵ نیروی کابل خطی گردیده است. سختی پیچشی فونداسیونهای شمع $1/1 \times 10^9 \text{ KN.m/rad}$ فرض شده است.



شکل ۵ - برج مهاری نمونه در عمق ۱۰۰۰ فوتی

X_{gs} ناشی از مؤلفه‌های نیروی یکنواخت به شرح ذیل حاصل می‌شود:

$$R(X_g) \cong R(X_{gs}) + K_{av}(X_g - X_{gs}) \quad (19)$$

$$K_{av} = \frac{1}{2\alpha\sigma_{X_g}} \int_{X_{gs}-\alpha\sigma_{X_g}}^{X_{gs}+\alpha\sigma_{X_g}} K_T(X_g) dX_g \quad (20)$$

در این روابط $K_T(X_g)$ سختی مماس $R(X_g)$ و α برابر یک فرض شده است.

در این تحقیق به منظور خطی‌سازی نیروی کابل‌ها از روش خطی‌سازی معادل استفاده شده است و در نهایت رابطه معادله حرکت (۱۲) به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$([M + M_a])\{\ddot{x}\} + [C_d]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + \{\ell g\}K_{eq}X_g + \{\ell g\}R_o = \{F_w\} \quad (21)$$

به منظور ساده‌سازی محاسبات و حذف عامل $\{\ell g\}R_o$ قسمت $\{X\}$ به دو مؤلفه دینامیکی و استاتیکی تفکیک می‌گردد:

$$\{x\} = \{x_d\} + \{x_s\} \quad (22)$$

$$[M + M_a]\{\ddot{x}_d\} + [C_d]\{\dot{x}_d\} + [k]\{x\} + \{\ell g\}k_{eq}X_g = \{F_w\} \quad (23)$$

$$[K]\{x_s\} + \{\ell g\}K_{eq}X_{gs} = \{\ell g\}R_o \quad (24)$$

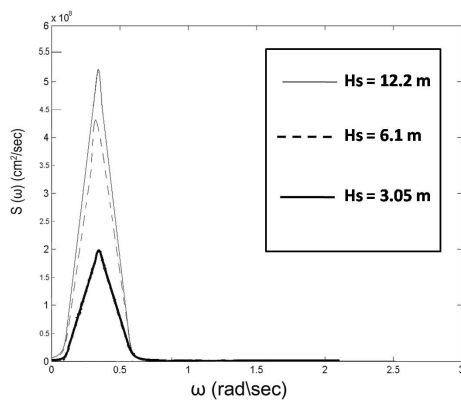
معادله (۲۳) یک معادله دیفرانسیل و معادله (۲۴) یک دستگاه معادله جبری معمولی است که مجهول آن X_{gs} خواهد بود.

۵- مشخصات سکوی نمونه

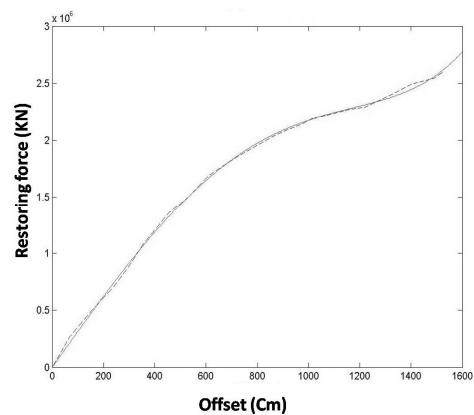
آنالیز یک نمونه برج مهاری با پایه خرابایی مقطع ثابت در دریایی به عمق ۱۰۰۰ فوت تحت اثر امواج

¹Torsion Pile

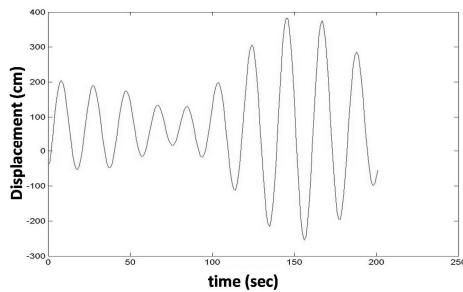
²Main Pile



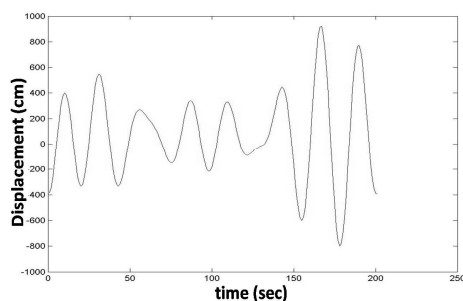
شکل ۸ - پاسخ سازه به نیروی اینرسی در امواج با ارتفاعات مختلف



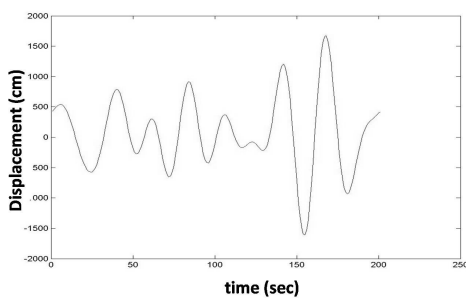
شکل ۶ - نمودار نیرو به تغییر مکان برای مجموع کابلهای مهاری



شکل ۹ - تاریخچه زمانی تغییر مکان عرشه در موج $H_s=3.05m$



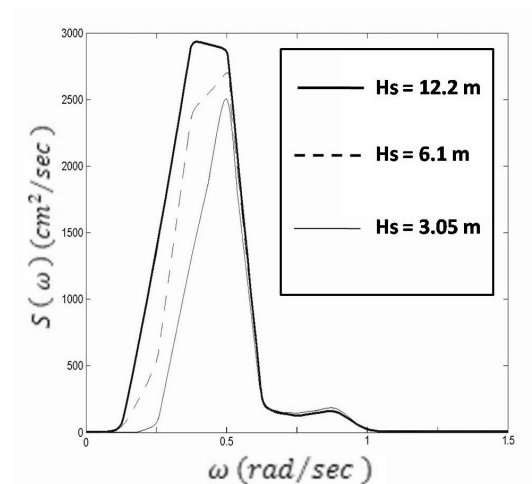
شکل ۱۰ - تاریخچه زمانی تغییر مکان عرشه در موج $H_s=6.1m$



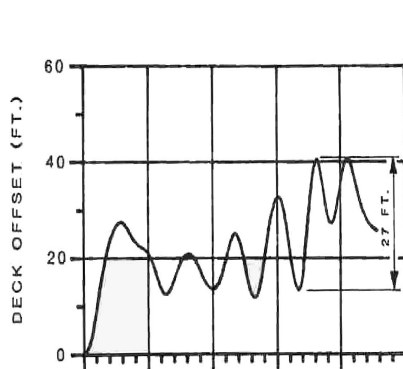
شکل ۱۱ - تاریخچه زمانی تغییر مکان عرشه در موج $H_s=12.2m$

۶- نتایج آنالیز سکوی نمونه

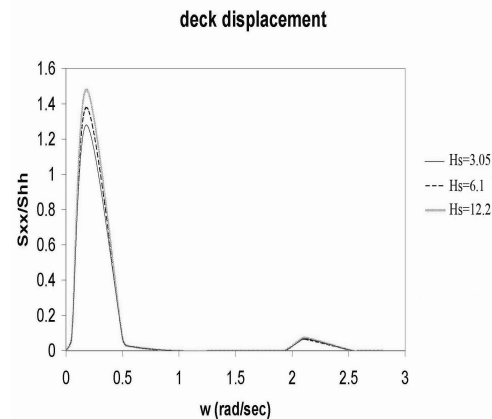
طیف پیرسون موسکویچ با موج مشخصه های ۱۰ و ۲۰ فوت (۳/۰۵، ۶/۱، ۱۲/۲ متر) به عنوان نیروی تحریک برای سکوی نمونه در نظر گرفته شده است. اشکال شماره ۷ و ۸ طیف پاسخ سازه را به تفکیک برای نیروهای درگ و اینرسی برای این امواج نشان می‌دهد. اشکال ۹ تا ۱۱ تاریخچه زمانی تغییر مکان عرشه و شکل ۱۲ RAO تغییر مکان عرشه را برای امواج ۱۲/۲، ۶/۱، ۳/۰۵ متری نشان می‌دهند:



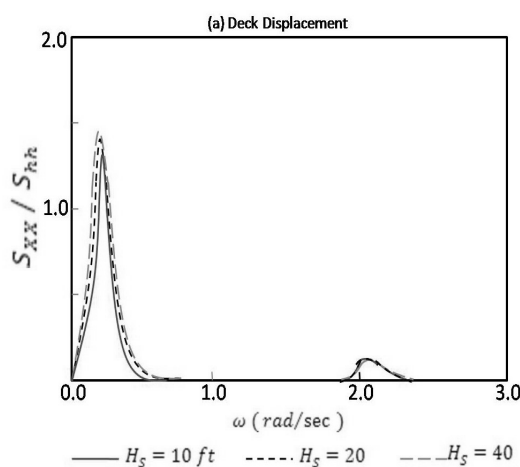
شکل ۷ - پاسخ سازه به نیروی درگ در امواج با ارتفاعات مختلف



شکل ۱۳ - تاریخچه زمانی تغییر مکان عرشه برای موج $H_s=15$ ft (مرجع [۷])



شکل ۱۲ - RAO پاسخ سازه به نیروی موج



شکل ۱۴ - RAO تغییر مکان عرشه برای امواج $H_s=10, 20, 40$ ft (مرجع [۶])

جدول حداکثر اختلافی برابر ۵/۶٪ بین RAO تغییر مکانها وجود دارد که در حد رضایت بخش است. اختلافاتی که بین نتایج مدل و مراجع وجود دارد ممکن است ناشی از اختلافات در ماتریس سختی تشکیل شده و روش خطی سازی معادلات باشد.

جدول ۱ - مقایسه مقدار RAO جابجایی عرشه در تحقیق انجام شده و مرجع

$H_s(m)$	۳/۰۵	۶/۱	۱۲/۲
RAO تحقیق انجام شده	۱/۲۸	۱/۳۵	۱/۵
RAO مرجع [۶]	۱,۲۵	۱,۳۴	۱,۴۲
درصد خطا	۲/۵	۰/۸	۵/۶

۷- بحث و نتیجه گیری

همانطور که عنوان گردید به منظور بررسی صحت و دقت عملکرد مدل و امکان مقایسه نتایج آن با مراجع [۶] و [۷] که در آنها آنالیز دینامیکی سکوهاى برجى مهارى صورت گرفته مشخصات مدل سکوى نمونه مشابه مدل سازه آن مراجع انتخاب گردیده است. شمع فونداسیون در این مراجع بصورت فنر مدل شده که سختی آن با ماتریس سختی سازه ترکیب گردیده است. کابلهای مهارى بصورت فنر با سختی متغیر مدل شده است و جابجایی آن از آنالیز استاتیکی حاصل شده است. شکل ۱۳ تاریخچه زمانی تغییر مکان عرشه برای موج به ارتفاع مشخصه ۱۵ فوت (مرجع [۷]) و شکل ۱۴ RAO عرشه را برای امواج با ارتفاع مشخصه ۱۰، ۲۰ و ۴۰ فوت (مرجع [۶]) نشان می دهد. بر اساس شکل ۱۳ ماکزیمم تغییر مکان عرشه برای موج مشخصه ۱۵ فوتی ۲۷ فوت می باشد. این عدد بیشتر از ۱۸ فوت و کمتر از ۴۸ فوت به ترتیب مربوط به تغییر مکانهای ماکزیمم عرشه در امواج مشخصه ۱۰ و ۲۰ فوتی ناشی از مدل تهیه شده (اشکال ۹ و ۱۰) می باشد. مقایسه اشکال شماره ۱۲ و ۱۴ نشان می دهد RAO حرکات عرشه در سکوى مورد مطالعه انطباق بسیار خوبی چه به لحاظ فرکانسهای ماکزیمم و چه مقادیر ماکزیمم با مرجع [۶] دارد. جدول ۱ RAO ماکزیمم تغییر مکان عرشه سکوى نمونه را تحت اثر امواج برخوردی با مرجع [۶] مقایسه می کند. بر اساس این

خواهد داشت لذا آنالیز دینامیکی سازه بسیار ضروری می‌باشد.

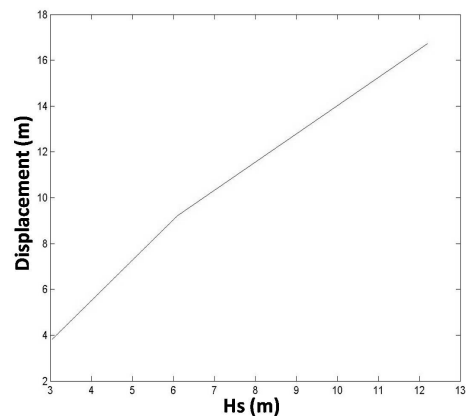
- بعلت استفاده سکوهای برجی مهارى در آب عمیق نیروی درگ نسبت به نیروی اینرسی تأثیر کمتری خواهد داشت.

- پاسخ سازه نسبت به تغییرات مشخصه تقریباً خطی می‌باشد.

۸- مراجع

- 1-Chakrabartia, S. , Halkyard, J. B. and Capanoglu, C. "Offshore Structure Analysis", Inc., Plainfield, IL, USA, 2005.
- 2-Audibert, J. M. E., "Geotechnical Engineering for Guyed Tower Offshore Structures", Proceedings, Civil Engineering in the Ocean, 1981.
- 3-Finn, L. D., "A New Deepwater Offshore Platform – The Guyed Tower" OTC 2688, Offshore Technology Conference, 1976.
- 4-Bar-Avi, P. and Benaroya, H., "Nonlinear Dynamic of Compliant Offshore Structures" Swets & Zeitlinger Pub. Co., 1997.
- 5-Bisht, R.S., Jain, A. K., " Second-order Drift Force Response of Offshore Guyed Towers", Ocean Engineering, Volume 22, Issue 3, pp. 251-270, 1995.
- 6-Ryu, J. S. and Yun, C. B., "Nonlinear Stochastic Analysis of Guyed Towers" Department of Civil Engineering Korea Advanced Institute of Science and Technology Seoul, Korea, 1986.
- 7-Glasscock, M. S. and Turner, J. W., "Design of Lena Guyed Tower" OTC 4650, Offshore Technology Conference, 1984.

نتایج پاسخ طیفی سازه در شکل ۱۲ حاکی از آن است که این سازه دارای فرکانس طبیعی نوسان نسبتاً کم (حدود $\omega = 0.2 \text{ rad/sec}$) می‌باشد. علت این امر ارتفاع زیاد و در نتیجه سختی کم آن در مقایسه با سکوهای ثابت می‌باشد. همچنین در نیروهای وارد بر سکو گرچه با افزایش ارتفاع موج مشخصه نیروی درگ افزایش می‌یابد (شکل ۷)، ولی در حالت کلی بعلت عمیق بودن آب نیروی درگ تأثیر زیادی بر سازه نخواهد داشت و عمده بار وارده ناشی از نیروی اینرسی بر سازه می‌باشد. مقایسه اشکال ۷ و ۸ برای موج ۱۲/۲ متری نشان می‌دهد که نیروی اینرسی حدود ۱۸۰۰۰ برابر نیروی درگ است. لذا می‌توان چنین استنتاج نمود که با توجه به اینکه آنالیز در حوزه فرکانس صورت گرفته و در آن نیروی درگ خطی شده است، خطاهای حاصل از خطی سازی بعلت اثر کمتر نیروی درگ نسبت به اینرسی تأثیر زیادی بر آنالیز کل سازه نخواهد داشت. شکل ۱۳ تغییر مکان عرشه را نسبت به ارتفاع موج مشخصه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که جابجایی سکو نسبت به تغییرات ارتفاع موج مشخصه تقریباً خطی است.



شکل ۱۳ - تغییر مکان عرشه نسبت به ارتفاع موج مشخصه

خلاصه نتایج حاصل از آنالیز را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- در سازه های برجی مهار شده بعلت کاهش سختی، جابجایی عرشه نسبت به سکوهای ثابت زیاد است. در این سازه ها اثر دینامیکی موج تأثیر زیادی بر سازه