



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



ICOPMAS

آنالیز هیدرودینامیک سکوی پایه کششی در آب های کم عمق

محمد جواد کتابداری
استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

کیوان صادقی
استادیار، دانشگاه هرمزگان

امیرزاکری
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه هرمزگان

katabdar@cic.aut.ac.ir

s.keyvan@gmail.com

amirzakeri62@gmail.com

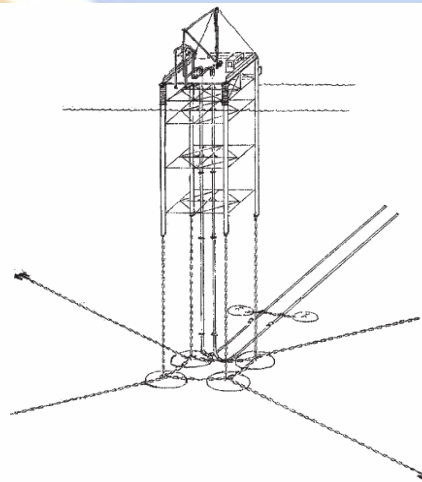
چکیده

سکوی پایه کششی (Tension Leg Platform, TLP) نوعی سکوی تطبیقی است که معمولاً به منظور استخراج نفت در آب های بسیار عمیق مورد استفاده قرار می گیرد. ولی اخیراً استفاده از این سکو به عنوان سکوی تخلیه بار در آب های کم عمق نیز مورد توجه محققین واقع شده است. با توجه به عمق کم آب در خلیج فارس لزوم تحقیق و بررسی بیشتر در مورد این سکو جهت کاربرد در آب های این منطقه ضروری به نظر می رسد. هدف از این تحقیق آنالیز طیفی نوعی از این سکو به عنوان سکوی تخلیه بار در آب های کم عمق می باشد. نیروی هیدرودینامیکی ناشی از موج با استفاده از معادله مورپسن محاسبه شده و پاسخ سکو به دو روش موج تکی (Single Wave Prediction) و آنالیز طیفی (Spectral Analysis) با استفاده از طیف پیشنهادی برای خلیج فارس بدست آمده اند.

کلمات کلیدی: سکوی پایه کششی، آب کم عمق، معادله مورپسن، آنالیز طیفی، روش موج تکی

مقدمه

تحقیق و بررسی در مورد سکوهای نفتی با توجه به ارزش روز افزون فراورده های نفتی و مرز طولانی کشور ما با دریا در شمال و جنوب امری ضروری می باشد. با توجه به عمق زیاد آب در دریای خزر و کم عمق بودن خلیج فارس می توان از سکو های تطبیقی که توانایی کاربرد در اعماق مختلف را داشته باشند استفاده کرد. یکی از سکوهای تطبیقی سکوی پایه کششی (Tension Leg Platform, TLP) است که تا کنون به عنوان سکوی استخراج نفت در آب های بسیار عمیق مورد استفاده قرار گرفته است. این نوع سکو اخیراً به عنوان سکوی تخلیه بار در آب های کم عمق نیز مورد استفاده قرار گرفته است. TLP یک سازه دوگانه بوده که در حرکات افقی همانند یک شناور عمل می کند اما در حرکت قائم دارای سختی زیاد می باشد. شکل ۱ نمای TLP و اجزای اصلی آن را نشان می دهد. در این نوع سکو با توجه به بیشتر بودن نیروی بویانسی از وزن سکو، تاندون ها همواره در کشش می باشند.



شکل ۱: نمای TLP و اجزای اصلی آن

پیشینه تحقیق

سکوهای پایه کششی را می توان نسل جدیدی از سکوهای تطبیقی دانست که سابقه تحقیق و ساخت آنها جهت عملیات دور از ساحل کمتر از دو دهه می باشد. Paik et al. در سال ۱۹۹۶ پاسخ های یک TLP را با استفاده از تابع انتقال مرتبه دو (Quadratic transfer function) بدست آوردند و نتایج را با یافته های حاصل از تابع انتقال خطی مقایسه کردند. جنبه های مختلف

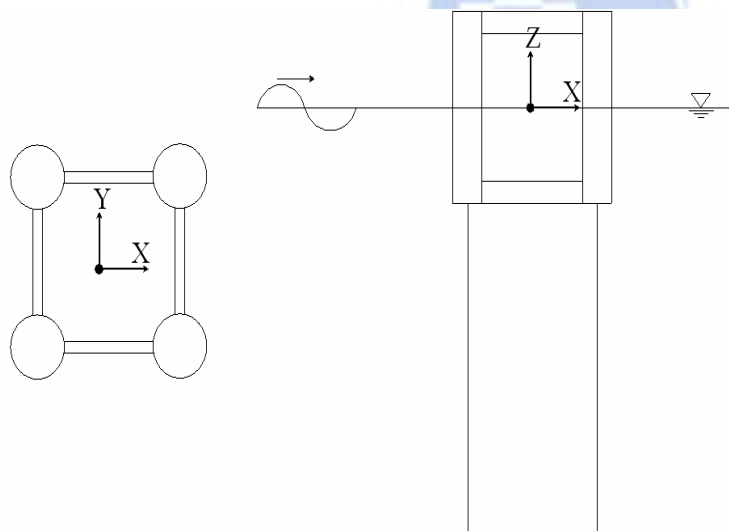
مطالعاتی در زمینه TLP توسط Adrezin در سال ۱۹۹۶ مورد بررسی قرار گرفت. Jain در سال ۱۹۹۷ با در نظر گرفتن ۶ درجه آزادی برای سکوی TLP و لحاظ کردن وابستگی بین درجات آزادی (Coupled) به تحلیل دینامیکی غیر خطی این نوع سکو پرداخت. Lee et al. در سال ۱۹۹۹ به مطالعه خصوصیات مصالح مورد استفاده در تاندون ها و اثر آنها در حرکت Surge سازه پرداختند. در این تحقیق در ابتدا ماتریس جرم و جرم اضافه و سختی سازه محاسبه شده و فرکانس طبیعی سازه در درجات آزادی مختلف بدست می آید. سپس با استفاده از تئوری خطی و معادله مورپسن نیروی ناشی از موج وارد بر سازه محاسبه خواهد شد. در نهایت پاسخ های Surge و Heave سازه به دو روش موج تکی و آنالیز طیفی بدست خواهد آمد و نتایج با نتایج سایر محققین مقایسه می شود.

هیدرودینامیک سکو

جهت تحلیل سازه در این تحقیق سیستم مختصات به گونه ای تعریف شده است که محور های X و Y در سطح آزاد دریا قرار گرفته و محور Z عمود بر سطح آزاد و رو به بالا می باشد. بدین ترتیب سه درجه آزادی خطی Surge, Sway و Heave و سه درجه آزادی دورانی Roll, Yaw و Pitch به ترتیب متناظر محورهای X, Y, Z خواهد بود. معادله حرکت سکوی TLP تحت بارگذاری موج به صورت زیر می باشد:

$$[M + m]\{\ddot{\eta}\} + [c]\{\dot{\eta}\}\{\dot{\eta}\} + [k]\{\eta\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

که در آن M جرم و m جرم اضافه سازه، c ضریب میرایی و k ضریب سختی ناشی از شکل هندسی سازه و تاندون ها می باشد. در ماتریس ضرائب و بردارها، اندیس های 1,2,3,4,5,6 به ترتیب بیانگر yaw, pitch, roll, surge, sway, heave می باشد. برای TLP مربعی نشان داد شده در شکل ۲، دو صفحه XZ و YZ تقارن هستند.



شکل ۲: سکوی پایه کششی با هندسه مربعی

با در نظر گرفتن اینکه دستگاه مختصات متصل به سکو و منطبق بر مرکز ثقل سکو باشد ضرائب غیر قطری ماتریس جرم صفر می باشد. بنابراین ماتریس جرم و جرم اضافه سازه برای TLP مربعی شکل با دو صفحه تقارن به صورت زیر تعریف می شود (sadeghi 2001):

$$\begin{bmatrix} m + m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{15} & 0 \\ 0 & m + m_{22} & 0 & m_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m + m_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{24} & 0 & I_{11} + m_{44} & 0 & 0 \\ m_{15} & 0 & 0 & 0 & I_{22} + m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{33} + m_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

با توجه به اینکه در درجات آزادی Surge, Sway, Yaw هیچگونه نیروی بازدارندگی ایجاد نمی شود بنابراین سطرها و ستون های اول دوم و ششم ماتریس سختی ناشی از ضرائب هیدرواستاتیک برابر صفر می باشد. بنابراین ماتریس سختی به صورت زیر در می آید:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

با توجه به کوچک بودن قطر اعضای سکوی TLP ماتریس میرایی ناشی از تشعشع قابل صرفنظر می باشد. با اعمال چندین مرحله جابجایی سطر و ستون های ماتریس های ضرائب براحتی می توان اثبات کرد که درجات آزادی Surge, Heave Pitch مستقل (Uncouple) از درجات آزادی Sway, Yaw, Roll می باشند. همچنین درجه آزادی Heave با Pitch و Surge و درجه آزادی Sway از Yaw و Roll غیر درگیر می باشند. فرکانس طبیعی و پریود سازه از روابط زیر بدست می آیند:

$$w_{ni} = \sqrt{\frac{k_i}{M_i + m_i}}, \quad T_{ni} = \frac{2\pi}{w_i} \quad (4)$$

که k_i سختی سازه و $M_i + m_i$ مجموع جرم و جرم اضافه سازه در جهت i می باشد. در این روابط $i=x$ جهت surge, $i=z$ جهت heave و $i=y$ جهت sway را نشان می دهند. سختی جهت Surge با استفاده از رابطه $k_x = n \left(\frac{T_0}{l} \right)$ بدست می آید که در آن n تعداد تاندون ها، T_0 کشش اولیه و l طول تاندون ها می باشد. سختی جهت Heave با استفاده از رابطه $k_y = n(\rho g \pi R^2 + A_c E / l)$ بدست می آید که در آن شعاع ستون ها، E مدول یانگ و A_c سطح مقطع تاندون ها می باشد. مجموع جرم و جرم اضافه ستون ها و پانتون ها در جهت Surge به ترتیب با استفاده از روابط زیر بدست می آید:

$$A_x = n \rho (\pi R^2 L + \pi R^2 L) \quad (5)$$

$$A_x = n \rho \left[\frac{\pi d^2}{4} l' + \frac{\pi d^2}{4} l' \right]$$

که در آن n تعداد ستون ها، L طول آبخور سازه و l' طول پانتون ها می باشد. مجموع جرم و جرم اضافه ستون ها و پانتون ها در جهت Heave به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه می شود:

$$A_z = n \rho (\pi R^2 L + \frac{4}{3} R^3) \quad (6)$$

$$A_z = n \rho \left[\frac{\pi d^2}{4} l' + \frac{\pi d^2}{4} l' \right]$$

با توجه به اینکه سازه از اعضای استوانه ای لاغر تشکیل شده استفاده از معادله مورپسن برای محاسبه نیروهای وارد بر سکو مناسب می باشد. ضرائب جرم اضافه (C_m) و درگ (C_d) ثابت و به ترتیب $1/5$ و $1/6$ در نظر گرفته می شود. (Sarpkaya et al., 1981). با استفاده از تئوری خطی، تابع پتانسیل سرعت به صورت زیر بدست می آید:

$$\varphi = \frac{ga}{w} \times \frac{\cos[k(y+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - wt) \quad (7)$$

که در آن a دامنه موج، w فرکانس زاویه ای، k عدد موج و h عمق آب می باشد. مجموع نیروی surge و heave وارد بر کل سازه با جمع بستن نیروی وارد بر تک تک اعضا بدست می آید. مجموع نیروی heave وارد بر سازه پس از انجام محاسبات به صورت زیر بدست می آید:

$$F_z = A \sin wt + B \cos wt \quad (8)$$

$$A = 0, B = n(A_{pz} + A_{az}) \cos(kx_c / 2)$$

که در آن n تعداد ستون ها و A_{pz} مجموع نیروی فشار و A_{az} مجموع نیروی ناشی از شتاب بر کل سازه به صورت زیر می باشد:

$$A_{pz} = \left[\rho g a \frac{\cosh[k(h-l)]}{\cosh kh} \pi R^2 \right] + \left[\rho a w^2 l' \frac{\sinh[k(h-l)]}{\sinh kh} \pi r^2 \right] \quad (9)$$

$$A_{az} = \left[4/3 \rho R^3 (-a w^2 \frac{\sinh[k(h-l)]}{\sinh kh}) \right] + \left[\rho a w^2 l' \frac{\sinh[k(h-l)]}{\sinh kh} \pi r^2 \right] \quad (10)$$

که در آن شعاع پانتون ها و l' طول پانتون ها می باشد. در روابط بالا عبارت اول نیروی وارد بر ستون ها و عبارت دوم نیروی وارد بر پانتون ها می باشد. کل نیروی Surge وارد بر سازه به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$F_x = C \sin wt + E \cos wt \quad (11)$$

$$C = -n[A_{px} \cos(kx_c / 2)], E = n[A_{dx} \cos(kx_c / 2)]$$

که در آن A_{px}, A_{dx} به ترتیب ترم درگ و اینرسی معادله مورپسن بوده و از روابط زیر محاسبه می گردند:

$$A_{px} = \rho g a C_m \pi R^2 \frac{\sinh(kh) - \sinh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} + .5 * \rho g a C_m \pi R^2 \frac{\sinh(kh) - \sinh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} \quad (12)$$

$$A_{dx} = \frac{1}{2} \rho C_d D \left(\frac{aw}{\sinh(kh)} \right)^2 * \frac{8}{3\pi} * \frac{1}{2} \left[L + \frac{\sinh(2kh) - \sinh[2k(h-l)]}{2k} \right]$$

پاسخ Heave غیر وابسته با دیگر درجات آزادی با حل رابطه زیر در حوزه فرکانس بدست می آید:

$$(m + M)_z \ddot{z} + c_z \dot{z} + k_z z = F_z \quad (13)$$

که در آن c_z ضریب میرایی ویسکوزیته بوده و k_z ضریب سختی یا بازگرداندگی می باشد. ضریب غیر خطی میرایی را می توان با برابر قرار دادن انرژی مستهلک شده در اثر میرایی خطی و غیر خطی در حالت تشدید به روش زیر خطی کرد: (S.K., 1987) (Chakrabarti,

$$\dot{z} |\dot{z}| \approx \frac{8}{3\pi} (w z_{est}) \dot{z} \quad (14)$$

$$C_{lz} \approx \frac{8}{3\pi} (w z_{est}) C_z \quad (15)$$

$$C_z = n[.5 \rho C_d \pi R^2]$$

که در آن C_{lz} ضریب دمپینگ خطی شده می باشد. در نتیجه معادله حرکت سازه به صورت زیر در می آید:

$$(m_z + M_z) \ddot{z} + c_{lz} \dot{z} + k_z z = F_z \quad (16)$$

معادله حرکت سازه در جهت surge همانند جهت heave می باشد با این تفاوت که سختی فقط ناشی از تاندون ها است و ضریب میرایی ناشی از نیروی درگ از رابطه زیر بدست می آید:

$$C_x = n[.5 \rho C_d L D] \quad (17)$$

در این رابطه L طول آبخور ستون ها و D قطر ستون ها می باشد.

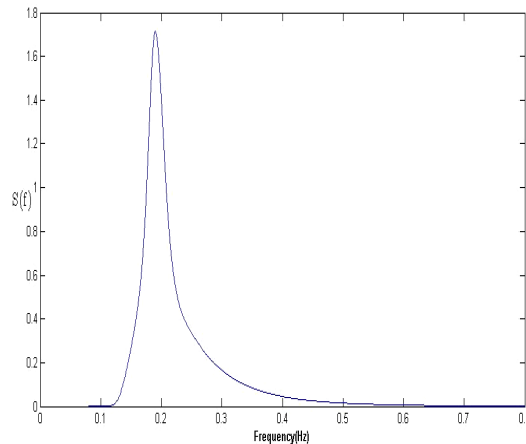
آنالیز طیفی

در این تحقیق برای بدست آوردن پاسخ های سکو روش آنالیز طیفی بکار گرفته شده است. طیف مورد استفاده، طیف اصلاح شده Jonswap با فرکانس پیک $f_p = 0.19$ و $\gamma = 2.68$ که دارای مشخصات مناسب برای آب های خلیج فارس است می باشد (Shafifar and Hamedi, 2002). شکل ۳ این طیف را نشان می دهد. پاسخ مشخصه سازه با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$S_s = 2 \sqrt{\int_0^\infty S_x(f) df} \quad (18)$$

$$S_x = R A O^2 * S_\eta$$

که در آن S_x, S_η به ترتیب طیف موج و طیف پاسخ می باشند.



شکل ۳: طیف اصلاح شده JONSWAP

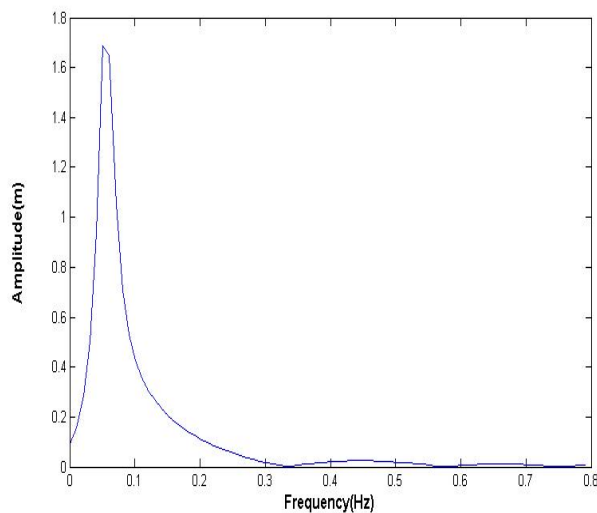
مطالعه موردی

سکوی مورد مطالعه در این تحقیق یک سکوی پایه کششی دارای پلان مربع و ۴ ستون به فواصل ۶ متر، قطر ۱/۰۱۶ و ارتفاع ۲۰ متر با پانتون های به قطر ۱۷/ متر می باشد که برای آب های دریای شمال طراحی شده است و پاسخ های هیدرودینامیک آن بررسی شده است (Soylemez & Yilmaz 2003). تاندون ها از نوع زنجیری بوده و دارای قطر ۰/۰۶ متر و طول ۲۰ متر و کشش اولیه ۷۱ کیلو نیوتن می باشند. عمق آب در محل سکو عمق متوسط آب در خلیج فارس که حدود ۴۰ متر می باشد انتخاب گردید. در شرایط عمومی خلیج فارس دارای امواج به ارتفاع ۱ متر و پریود ۳ ثانیه و در شرایط طوفانی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، ارتفاع موج ۵/۵ متر و پریود ۸ ثانیه می باشد (Golshani & Chegini 2006). در این تحقیق پاسخ های surge و heave غیر وابسته سکو به دو روش موج تکی و آنالیز طیفی به دست آمده اند. نتایج در اشکال ۴ تا ۷ آمده است. شکل ۴ پاسخ surge سکو را در شرایط عمومی دریا نشان می دهد. بر اساس این شکل دامنه پاسخ برای فرکانسهای بالاتر از ۰/۳ هرتز به سمت صفر میل می کند. شکل ۵ پاسخ heave سکو را در شرایط عمومی دریا نشان می دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می گردد فرکانس پیک این حرکت در حدود ۰/۷ هرتز اتفاق می افتد. شکل ۶ پاسخ surge سکو را در شرایط طوفانی دریا نشان می دهد. در این حالت فرکانس پیک حرکت حدود ۰/۲ هرتز است. شکل ۷ پاسخ heave سکو را در شرایط طوفانی دریا نشان می دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می گردد فرکانس پیک این حرکت در حدود ۰/۱۵ هرتز اتفاق می افتد.

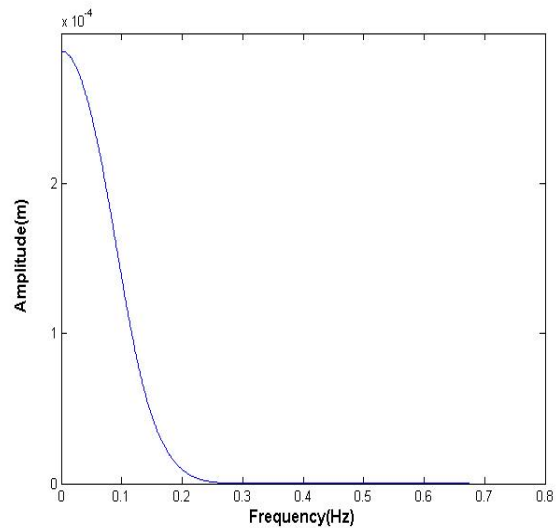
بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق پاسخ های surge و heave یک سکوی TLP برای کاربرد در آب های کم عمق مورد بررسی قرار گرفته اند. پاسخ سازه در شرایط عمومی دریا در جهت surge ۱۷/ متر بدست آمده است و در جهت heave با توجه به مدول الاستیسیته بالای کابل های زنجیری و سختی زیاد سازه بسیار کم و قابل چشم پوشی می باشد. پاسخ مشخصه سازه در جهت surge در شرایط طوفانی با استفاده از طیف پیشنهادی برای خلیج فارس ۳۷/ متر می باشد. پاسخ های سکو در مقایسه با سکوی مشابه در دریای شمال مقادیر کمتری را نشان می دهد. یکی از دلایل این اختلاف ویژگی های خاص آب های خلیج فارس می باشد که دریایی بسته بوده و در اکثر مواقع شرایط دریای کاملا توسعه یافته را ندارد. ناقص بودن اطلاعات آب های خلیج فارس نیز در نتایج طیف استفاده شده تاثیرگذار است. همچنین در نظر گرفتن اثر پانتون ها در این تحقیق یکی دیگر از دلایل این اختلاف می باشد.

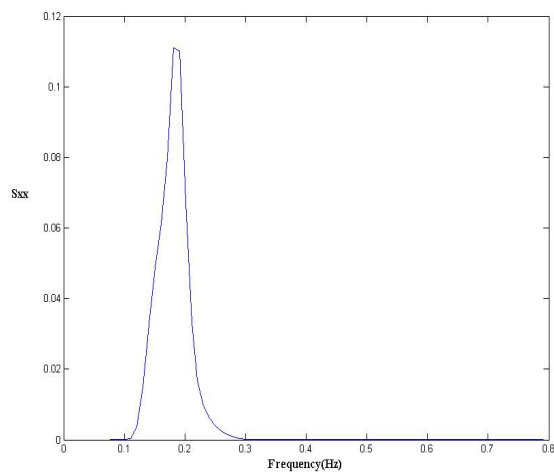
با توجه به فرکانس طبیعی سازه در جهت surge $w_{nx} = 0.33$ و فرکانس پیک طیف موج $w = 1.19$ امکان تشدید وجود نداشته و استفاده از سازه برای آب های خلیج فارس مناسب می باشد. با توجه به اینکه در طول عملیات تخلیه بار حرکت سکوی TLP در جهت heave بسیار کم بوده و در جهت sway و surge رفتار مناسبتری نسبت به سایر سکوها نشان می دهد و با لحاظ نمودن مسائل اقتصادی و جابجایی و حمل ساده، این سکو به سکوی ثابت ترجیح داده می شود.



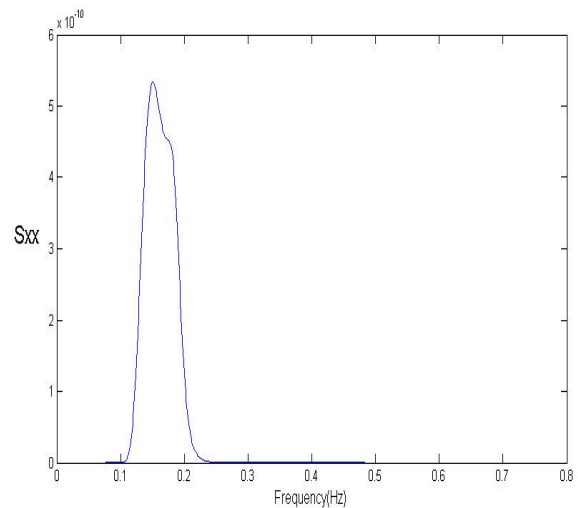
شکل ۴: پاسخ Surge (شرایط عمومی دریا)



شکل ۵: پاسخ Heave (شرایط عمومی دریا)



شکل ۶: طیف پاسخ Surge (شرایط طوفانی)



شکل ۷: طیف پاسخ Heave (شرایط طوفانی)

مراجع:

- Adrezin, R., Bar-Avi, P., Benaroya, H., 1996. Dynamic Response of compliant offshore structures-review.
- Chakrabarti, S.K., 1987. Hydrodynamics of offshore structures. Springer-Verlag, Berlin.
- Jain, A.K., 1997. Nonlinear coupled response of offshore tension leg platforms to regular wave forces. Ocean engineering 24 (7), 557-592
- Lee, H.H., Wang, P.-W., Lee, C.-P., 1999. Dragged surge motion of tension leg platforms and strained elastic tethers. Ocean Engineering 26 (6), 575-594.
- Paik, I., Roesset, J.M., 1996. Use of quadratic transfer functions to predict response of tension leg platforms. Journal of engineering Mechanics 122 (9), 882-889.
- Sadeghi, K., Incecik, A., 2005. Tensor properties of added mass and damping coefficients, Journal of Engineering Mathematics, 52(4), pp. 379-387.
- Sarpkaya, T., Issacson, M., 1981. Mechanics of Wave Forces on Offshore structures. Van Nostrand Rein hold, New york, NY.
- Soylmez, M., and Yilmaz., D., 2003. Hydrodynamic design of a TLP type offloading platform. Ocean Engineering 30. pp. 1269-1282
- Shafifar, M., Hamed, A. (2002), Presenting a modified spectrum for Persian Gulf using available data of north of the study area, Proceedings of 6th Icopmas, Ramsar, Iran.

Archive of SID

گلشنی، علی اصغر. چگینی، وحید. "مدلسازی و پیش یابی امواج درخلیج فارس و دریای عمان"، مجموعه خلاصه مقالات هفتمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، ۱۳۸۵



Hydrodynamic Analysis of Tension Leg Platform in Shallow Waters

A. Zakeri

K. Sadeghi

M. J. Ketabdari

Abstract

Study of oil platforms is increasingly vital for the purpose of boosting our national oil products. Tension Leg Platform is a sort of platform which is often used for the purpose of oil extraction in highly deep waters. However, this platform has recently started to be used for the purpose of unloading in low-depth waters which has drawn attention of authors. Because Persian Gulf water is shallow, assessing the aforesaid platform appears to be of vital importance. This article seeks to analyze a special sort of platform which is currently used for the purpose of unloading in shallow waters. To this end, hydrodynamic force caused by wave was calculated through Morison equation and then the platform response was estimated via two methods: single wave prediction and spectral analysis through the recommended spectrum for Persian Gulf.

Keywords: *oil platforms, Tension Leg Platform, Persian Gulf, spectrum*