الزامات مدلسازی آزمایشگاهی سکوی پایه کششی چهار ستونه در آب عمیق

محمد سعید سیف[۱]، محمدرضا تابش‌پور[۲]، محمدرضا فتحی کازرونی[۳]

[۱]استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu
[۲]استادیار، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛tabesh_mreza@yahoo.com
[۳] دانشجوی دکتری، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ mrfathi.k@gmail.com

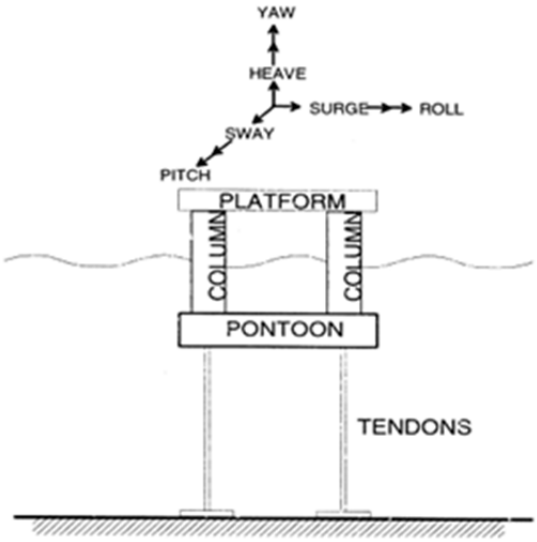
چکیده

سکوهای شناور از نوع پایه کششی یک نوع سکوی تطبیقی است که دارای سیتم مهار عمودی با نیروی شناوری اضافه می باشد. این نوع سکوها معمولا برای حفاری در آب عمیق مورد استفاده قرار می گیرد. می توان با اعمال کشش اولیه کافی در مهارها حرکات عمودی سازه را کاهش داد. این سکو شامل بخشهای پی، تاندونها، رایزرها، بدنه و عرشه می باشدکه در بین آنها بدنه از نظر نیروهای هیدرودینامیکی، وزن و هزینه بسیار پراهمیت است. از مهمترین خواص این سکوها می توان به استخراج نفت در حوزه های نفتی بزرگ اشاره کرد. در این مقاله به بررسی پارامترهای تاثیرگذار در مدلسازی آزمایشگاهی یک سکوی پایه کششی پرداخته خواهد شد. نحوه مدلسازی هندسه یک سکوی پایه کششی از نوع ISSC TLP بر اساس مقیاس مدلسازی آزمایشگاهی، با توجه به شرایط آزمایشگاهی حوضچه کشش آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه شریف و عمق آزمایشگاه جهت تامین شرایط آب عمیق بررسی و آنالیز شده و در نهایت مدل این سکو همراه با تاندون نصب و به آب انداخته شده است. این مدل ISSC TLP در نهایت تحت امواج منظم در آزمایشگاه بررسی و نتایج دریامانی آن استخراج شده است.

کلمات کلیدی: سکوی پایه کششی، امواج منظم، تست مدل، تنش خطوط مهار

مقدمه

سکوهای نفتی ساختارهای غول پیکری از جنس فولاد یا بتن بوده که وظیفه اصلی آنها را می توان اکتشاف و استخراج نفت و گاز از پوسته زمین برشمرد. این سکوها را می توان در دریا ، دریاچه ها و خلیج ها نصب کرد که در بعضی موارد کیلومترها تا خط ساحلی فاصله دارد. با افزایش عمق آب، هزینه سکوهای ثابت بسیار افزایش می یابد، در نتیجه از سکوهای تطبیقی در دریا های عمیق استفاده می شود. ایده کلیدی در سازه های تطبیقی، کمینه کردن مقاومت سازه در برابر بارهای محیطی، از طریق انعطاف پذیر کردن سازه می باشد. سازه های تطبیقی باید به صورت دینامیکی طراحی شوند. نکته مهم آن است که در اینگونه سازه ها اثرات غیر خطی شدیدی وجود دارد. با توجه به توضیحات فوق و از آنجا که نقاط محتمل برای وجود ذخائر نفتی در دریای خزردارای عمق زیاد می باشند، انجام مطالعاتی در مورد انواع سکوهای مناسب برای دریاهای عمیق ضروری می باشد مطالعات مقدماتی و مقایسه ای نشان می دهد که سکوی دارای پایه کششی، نوعی مناسب از سازه های تطبیقی برای آبهای عمیق می باشد.



شکل ۱: نمونه ای از سکوی پایه کششی چهار ستونه همراه با درجات آزادی آن

سکوهای شناور در مقایسه با سکوهای ثابت تاثیرپذیری بیشتری از نیروهای محیطی دریا دارند که اجرای کلیه عملیات اکتشاف، حفاری، استخراج متاثر از حرکات سازه در درجات آزادی آن است. مدلسازی آزمایشگاهی، روش مناسب و قابل اطمینان جهت بررسی عملکرد یک سکوی پایه کششی در امواج به منظور تعیین حداکثر جابجایی این سازه در ۶ درجه آزادی می باشد. شکل ۱ سکوی چهار ستونه همراه با درجات آزادی را نشان می دهد. تان و گای (۱۹۸۱) به بررسی مدل یک سکوی پایه کششی چهار ستونه ISSC TLP در عمق ۴۱۵ متر در امواج منظم و نامنظم پرداختند. هدف از این آزمایشات تصدیق نتایج محاسبات صورت گرفته برای سکوی پایه کششی با استفاده از تئوری پتانسیل سه بعدی بوده است. حل عددی این سکو بر پایه تئوری پتانسیل خطی صورت پذیرفته است. مقایسه بین تحلیل عددی و آزمایشگاهی در این مقاله منوط به حرکت نوسانی سکوی پایه کششی ناشی از فرکانس برخورد موج و نیروهای موجود در تاندون های مهار می باشد[1]. لیونز و همکاران (۱۹۸۳) مقایساتی بین نتایج حاصل از تحلیل های هیدرودینامیکی و دو مجموعه آزمایش با مقیاس بزرگ جهت تعیین پاسخ های هیدرودینامیکی TLP تحت تحریک موج انجام دادند. نتایج تحلیل و آزمایش برای حرکت طولی دارای انطباق خوبی بوده ولی در مورد کشش مهارها در فرکانس های معینی از امواج اختلافاتی وجود داشته است. تئوری موج خطی، مورد استفاده قرار گرفته و از تقابل بین اعضا صرف نظر شده است[2]. رویتمن و آندرید و باتیستا (۱۹۹۰) در ریو د جنیرو برزیل به آنالیز مدل سکوی پایه کششی چهار ستونه با مقیاس کوچک برای تعیین پاسخ دینامیکی سازه در امواج پرداختند. ضریب تشابه ابعادی در این آزمایشات برابر $\frac{1}{170}$ در مدلسازی آب عمیق برای این مدل کوچک در نظر گرفته شد. مقایسه حل عددی و آزمایشگاهی برای تست ضربه و موج، تعیین ضرایب درگ و اینرسی مناسب، از جمله اهداف این آزمایشات، بوده است[3]. نونگ سو کیم و چونگ مون کیم (۲۰۰۵) به آنالیز یک مدل آزمایشگاهی Mini-TlP پرداختند. در این مقاله به مقایسه بین روش گوسی وغیر گوسی برای تخمین تابع انتقال مرتبه ۲ داده های ثبت شده اشاره شده است. مقایسه بین این دو روش نسبت به طیف چگالی انرژی، تابع وابستگی و تاریخچه زمانی پاسخ صورت پذیرفته است[4]. حمید عالمی اردکانی (۲۰۰۷) به تحلیل آزمایشگاهی سکوی پایه کششی کوچک از نوع ستاره دریایی پرداخته است. استفاده از مدل تغییر یافته در آنالیز آزمایشگاهی با مقیاس $\frac{1}{100}$، ثبت پاسخ حرکت سرج و اسوی و پیچ و رول و حرکت دک در مدل در برابر جریان با زاویه حمله ۶۰ درجه ، ثبت پاسخ حرکات در ۶ درجه آزادی برای امواج منظم و نامنظم، تعیین RAO حرکات سرج و اسوی برای امواج منظم و نامنظم از جمله نتایج مد نظر قرار گرفته در این پروژه می باشد[5]. مورای، چان یانگ، وسوک یانگ (۲۰۰۸) به آزمایش مدل یک سکوی پایه کششی از نوع گسترش یافته و چهار ستونه با مقیاس $\frac{1}{100}$ جهت ارزیابی مدلسازی عددی این سکو متناسب با شرایط جوی خلیج مکزیک در آزمایشگاه OTRC پرداختند. این طراحی خاص آزمایشگاهی به دلیل تغییرات اعمال شده در API 2007 برای بخش خلیج مکزیک بوده است. تطابق ضعیف بین نتایج آزمایشگاهی و حل عددی غیر کوپل، تطابق بسیار خوب بین نتایج آزمایشگاهی و حل عددی کوپل برای پاسخ های اندازه گیری شده حرکات در درجات آزادی وتنش در تاندون ها از جمله مهمترین نتایج این پژوهش می باشد[6]. در این مقاله مهمترین پارامتر های مدلسازی سکوی پایه کششی، بیان شده و در نهایت مدل یک نمونه سکوی ISSC TLP برای عمق ۲۲۰ متر مورد مطالعه قرار می گیرد. مدل مناسب این سکوی ISSC TLP از جنس آلومینیوم ساخته و پس ار نصب تاندون ها در آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه شریف نصب و مورد آزمایش قرار گرفته است. در این مقاله ضمن تشریح روش آزمایش، نتایج حرکات آن برای درجه آزادی سرج(surge)تحت موج منظم ارائه می گردد.

قوانین تشابه برای مدل سازی آزمایشگاهی سکوی پایه کششی

با توجه به این که قانون فرود مناسب ترین قانون مقیاس برای مدلسازی سازه های نزدیک به سطح آزاد و مهار شده از جمله سکوهای پایه کششی می باشد مدلهای آزمایشگاهی با توجه به تشابه فرود مدل می شوند. عدد فرود، ابعادی متناسب با نسبت $\frac{u^2}{gD}$ را دارا می باشد. u سرعت سیال، g شتاب گرانشی و D بعد مشخصه سازه است. ضریب تشابه، λ می باشد، پس با توجه به تشابه هندسی، ابعاد مدل به صورت خطی با نسبت تشابه مدلسازی می گرد:

$$L_p = \sqrt{\lambda}\, L_m \qquad (۱)$$

از طرف دیگر:

$$u_p = \sqrt{\lambda}\, u_m \qquad (۲)$$

u_p سرعت جریان در نمونه واقعی و u_m سرعت جریان در مدل است. بقیه متغیرهای حائز اهمیت برای تست مدل TLP وارجاع دادن آن به سازه اصلی نیز در این قسمت تشریح شده است.

با توجه به این که از یک جنس ماده مشابه از سازه اصلی مثلا فولاد برای ساخت مدل استفاده می کنند، نسبت چگالی سازه اصلی و مدل برابر با یک خواهد بود. جرم سازه نیز از طریق رابطه $m = \rho v$ بدست می آید که ρ نماد چگالی می باشد. v در اینجا نماد حجم است. با توجه به آن چه

که گفته شد نسبت چگالی بین مدل و سازه اصلی برابر با یک است و از طرفی رابطه بین حجم مدل و سازه اصلی برابر با $v_p = \lambda^3 v_m$ خواهد بود. با توجه به این روابط نسبت بین جرم سازه اصلی و مدل از طریق رابطه زیر تعیین می شود:

$$m_p = \lambda^3 m_m \tag{۳}$$

در صورتی که از جنس دیگر مثلا آلومینیوم برای ساخت مدل استفاده شود باید با توجه به اصول جسم صلب همچنان رابطه (۳) مد نظر قرار گیرد با این تفاوت که با توجه به کوچکتر بودن چگالی آلومینیوم، از آلومینیوم با ضخامت بیشتر استفاده شود تا آن کاهش جرم حاصل از کوچکتر بودن چگالی جبران شود. پس همچنان رابطه (۳) بین مدل و نمونه واقعی برقرار خواهد بود.

برای نیروهای وارده از سیال بر سازه اصلی و مدل مثلا نیروی بویانسی می توان تناسب را به صورت رابطه (۴) برقرار نمود:

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{\gamma_p v_p}{\gamma_m v_m} \tag{۴}$$

چون نسبت چگالی سیال در آزمایشگاه به سیال در اقیانوس برابر با 0/975 می باشد در نتیجه عبارت $\frac{\gamma_m}{\gamma_p} = ۰/۹۷۵$ مد نظر قرار می گیرد. در نهایت رابطه زیر محقق می گردد:

$$F_p = \frac{\lambda^3}{0.975} F_m \tag{۵}$$

مقدار ۰/۹۷۵ نسبت بین چگالی آب شیرین و آب شور استاندارد می باشد. دلیل، این است که چون کلیه تست ها در آب تانک کشش که آب شیرین است صورت می پذیرد و نتایج آن باید برای سازه اصلی که در دریا در آب شور قرار دارد قابل استناد باشد، این ارتباط بین چگالی آب شیرین و شور لحاظ می شود تا نتایج کاربردی تر باشد.

دوره تناوب حرکات ۶ درجه آزادی مدل سکوی پایه کششی با نمونه واقعی آن رابطه زیر رادارد[7]:

$$\mathrm{T}_p = \sqrt{\lambda}\, T_m \tag{۶}$$

شتاب نوسانی حرکات در ۶ درجه آزادی برابر است با حاصل تقسیم سرعت نوسانی در آن درجه آزادی به پریود حرکت در آن درجه آزادی، بنابر این رابطه بین شتاب نوسانی در مدل سکوی پایه کششی و سازه اصلی برای هر درجه آزادی با توجه به اصول تشابه از فرمول زیر پیروی می کند:

$$\frac{\ddot{x}_p}{\ddot{x}_m} = \frac{\frac{\dot{x}_p}{T_p}}{\frac{\dot{x}_m}{T_m}} = \frac{\dot{x}_p T_m}{\dot{x}_m T_p} = \frac{\sqrt{\lambda}\, \dot{x}_m T_m}{\dot{x}_m \sqrt{\lambda}\, T_m} = 1;\ \ \ddot{x}_p = \ddot{x}_m \tag{۷}$$

x مقدار جابجایی نوسانی در راستای محورهای مختصات می باشد که واحد آن متر است، $\dot{x}$ مقدار سرعت نوسانی در راستای محورهای مختصات است که واحد آن متر بر ثانیه است، $\ddot{x}$ مقدار شتاب نوسانی در راستای محورهای مختصات می باشد.

انتخاب مقیاس مدلسازی

برای انتخاب یک مقیاس مناسب برای مدلسازی یک سکوی پایه کششی از روی ابعاد واقعی، توانایی سیستم تولید امواج در برابر شرایط دریایی در آزمایشگاه به عنوان یک معیار، می باشد. حداکثر ارتفاع موج تولیدی در آزمایشگاه که در برنامه تست قرار داده می شود، بالاترین محدوده مقیاس در مدلسازی را تعیین می کند. پهنای فرکانسی یک ژنراتور موج و همینطور توانایی آن برای تولید فرکانس بالا و امواج با طول موج کوچک می تواند در تعیین محدوده مقیاس مدلسازی موثر واقع شود. با کالیبره کردن ژنراتور موج قبل از انجام تست می توان طیف موج مناسب برای تولید موج را با ضریب اطمینان بالایی تولید کرد. سایز فیزیکی مدل نیز در تانک های کشش کوچک حائز اهمیت است زیرا برگشت امواج در تانک های باریک از دیواره ها روی خود مدل تاثیر می گذارد و باعث تاثیر گذاری روی نیروی دریفت و ممان های اندازه گیری شده می شود. به طور کلی هرچه ابعاد مدل نسبت به ابعاد تانک کشش بزرگتر شود این تاثیرات دیواره بیشتر می گردد. معمولا با استفاده از سیستم جذب امواج در دیواره ها می توان اثرات وجود دیواره در برگشت امواج را حذف کرد.

نیروهای کشش سطحی اصولا در محاسبات مربوط به مدلسازی سکوهای فراساحلی کم اهمیت هستند و اثرات پتانسیل مقیاس شده مرتبط معمولا قابل صرف نظر کردن است. در بعضی از تست ها این عامل کم اهمیت کم کم گسترش یافته و بر خلاف حذف آن در ابعاد واقعی، در تست آزمایشگاهی روی مدل قابل صرف نظر کردن نمی باشد. این عامل یکی از فاکتورهایی است که در نهایت انتخاب عدد به عنوان ضریب تشابه را برای تست در شرایط آب عمیق در تانک کشش تحت تاثیر قرار می دهد. تاثیرات اصلی پتانسیل کشش سطحی در تست مدل ناشی از تاثیرات خواص امواج کوچک می باشد. وقتی که امواج به اندازه کافی کوچک می شود، کشش سطحی یک سختی و استحکام خاصی را به سطح آب اعمال می کند که این برای تغییر ارتباط معمول بین طول موج و سرعت فاز کافی می باشد. بنابراین کشش سطحی به عنوان یک ترم گرانشی اضافه در معادلات موج تاثیر می گذارد. این تاثیرات اصولا در امواج با طول موج کمتر از ۰/۱ متر قابل رویت و امکان پذیر است. در اینجا امواج به صورت

حرکت یک ناهمواری و به صورت موجک اعمال می شود. اگر در نظر گرفته شود که در شرایط استفاده از سکوهای فراساحلی شناور در ابعاد واقعی، دوره تناوب امواج، کمتر از ۴ ثانیه و طول موج کمتر از ۲۵ متر نباشد(اصولا دوره تناوب امواج بین ۳ تا ۳۰ ثانیه می باشد)، به این نتیجه می رسیم که برای صرفنظر از اثرات کشش سطحی و اصولی بودن نتایج حاصل از شرایط تست مدل نباید ضریب تشابه ابعادی بین مدل و نمونه واقعی در مدلسازی آب عمیق کمتر از $\frac{1}{250}$ باشد. عامل مهم دیگر که در تعیین مقیاس مدلسازی آزمایشگاهی سکوی پایه کششی اهمیت فراوان دارد عمق آزمایشگاه است. عمق آزمایشگاه باید با درنظر گرفتن مقیاس مدلسازی بتواند طول تاندون را در شرایط واقعی مدل کند. پس با توجه به توضیحات فوق ملاحظه می شود که یکی از تاثیر گذار ترین محدودیت انتخاب مقیاس مدلسازی ذکر شده است که از طریق آن کمترین مقیاس مناسب برای مدلسازی آزمایشگاهی تعیین گردید. قالبا مقیاس مدلسازی در آزمایشگاه ها بین $\frac{1}{50}$ تا $\frac{1}{200}$ در نظر گرفته می شود.

مدل سازی مدول الاستیسیته تاندون با استفاده از تشابه کوشی

مدلسازی آزمایشگاهی یک سکوی پایه کششی از دو بخش سازه اصلی و خطوط مهار تشکیل شده است. دربخش اصلی سازه که تشکیل شده از ستون ها و پانتون ها می باشد با توجه به صلبیت بالا نیازی به مدل کردن مدول الاستیسیته نیست. اما برای خطوط مهار سکوی پایه کششی(تاندون) به علت پیروی از سازه های باریک و لاغر باید مدول الاستیسیته نیز تبدیل شود. این تبدیل مدول الاستیسیته بر اساس تشابه کوشی قابل بیان است بدین صورت که نسبت نیروی اینرسی به نیروی الاستیک برای مدلهای باریک و لاغر مثل خطوط مهار باید با این نسبت در پروتوتایپ برابر باشد[18]. مشخصات فیزیکی تاندون، اعم از سختی قائم، سختی خمشی و قطر خارجی لازم است که در امر مدلسازی لحاظ گردد. اما به علت طاقت فرسا بودن مدلسازی به صورت دقیق از مدل کردن مشخصات فیزیکی کم اهمیت اعم از سختی خمشی می توان صرف نظر کرد. یک نمونه از تاندون ها، تاندون های ساخته شده از پلاستیک با قرار دادن سیم فولادی داخل آن می باشد. در شرایط خاص نیز می توان برای ایجاد سختی قابل تنظیم جهت تست در عمق های متفاوت سکوی واقعی و ارجاع دادن نتایج مدل به آن از فنرهای محوری که نقش تاندون را با سختی مورد نیاز ایفا می کنند استفاده نمود[15]. جهت مدلسازی سختی خمشی که نسبت به مدلسازی سختی قائم(محوری) برای تاندون کم اهمیت می باشد، باید کرنش خمشی بین تاندون سکوی پایه کششی واقعی و تاندون مدل آزمایشگاهی برابر باشد که به تشابه کوشی معروف است[18] :

$$\left(\frac{MY}{EI}\right)_p = \left(\frac{MY}{EI}\right)_m \tag{8}$$

برای برقراری تشابه کوشی لازم است معادله (۸) برقرار شود. از معادله (8)، صرفا برای تعیین رابطه بین مدول الاستیسته تاندون مدل و تاندون پروتوتایپ استفاده می شود که برای تاندون فقط سختی محوری ارجح تر است و مد نظر قرار می گیرد. در اینجا EI سختی خمشی، E مدول الاستیسیته، M ممان خمشی و Y فاصله آخرین رشته از محور خنثی می باشد.

سختی خمشی بین مدل و سازه اصلی با توجه به رابطه زیر ارتباط پذیر است:

$$(EI)_p = \lambda^5 (EI)_m \tag{۹}$$

معادله (8) قانون تشابه فرود را ارضا می کند. برای ممان اینرسی مقطع نیز رابطه زیر برقرار است:

$$I_p = \lambda^4 I_m \tag{۱۰}$$

در نهایت ملاحظه می شود که برای برقراری روابط بالا مدول الاستیسیته بین مدل و سازه اصلی از رابطه زیر پیروی می کند:

$$E_p = \lambda E_m \tag{11}$$

طبق این اصل مهم مدول الاستیسیته ماده مورد استفاده برای تاندون درمدل TLP باید $\frac{1}{\lambda}$ ماده مورد استفاده برای تاندون در نمونه واقعی باشد. برای این کار باید جنس های مختلف تحت آزمایش کشش قرار گیرد تا به نتیجه مورد نیاز دست پیدا کرد.مدلسازی سختی خمشی در تاندون هم زمان با مدلسازی سختی محوری جهت تعیین جنس تاندون و مقطع آن بسیار سخت است، به همین منظور در مدلسازی آزمایشگاهی سکوی پایه کششی، برای تاندون ها تنها مدلسازی سختی محوری به دلیل بیشتر بودن بار محوری و تطبیقی بودن این سکوها، صورت می پذیرد($\frac{AE}{L}=$ سختی محوری).

$$\frac{\left(\frac{AE}{L}\right)_p}{\left(\frac{AE}{L}\right)_m} = \frac{A_p E_p L_m}{A_m E_m L_p} = \frac{\lambda^3 A_m E_m L_m}{A_m E_m \lambda L_m} = \lambda^2 \tag{12}$$

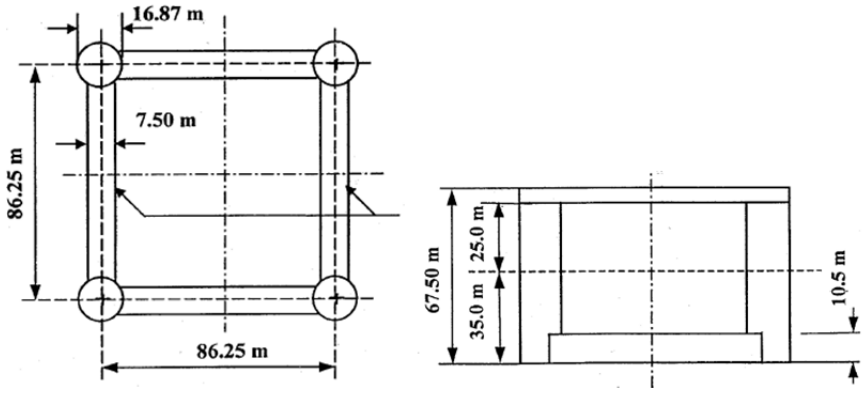
در اینجا Aمساحت مقطع تاندون و Lطول تاندون است. در این مقاله از سکوی پایه کششی ISSC به عنوان نمونه واقعی جهت مدلسازی آزمایشگاهی استفاده شده است.

ملاحظات ابعادی سکوی پایه کششی واقعی جهت ساخت مدل

جدول ۱،مشخصات ابعادی ISSC TLP را نشان می دهد. شکل ۲ به ترتیب از چپ به راست پلان و نمای این سکو را ارائه می دهند.

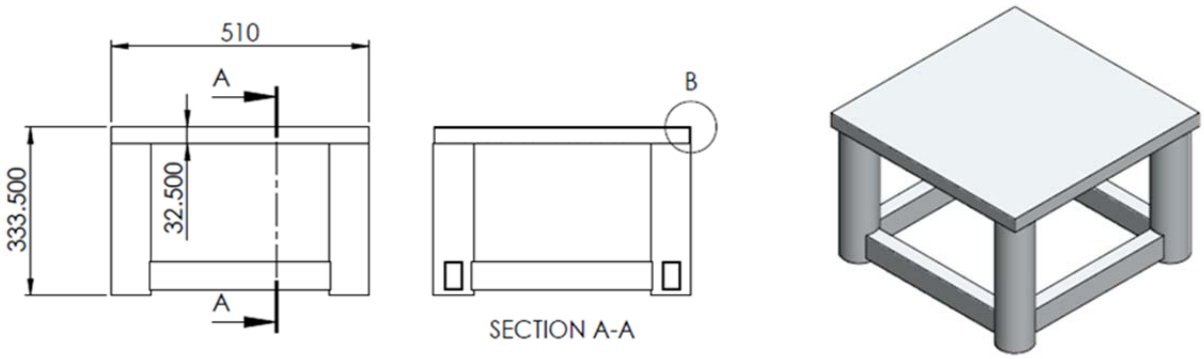
جدول ۱: مشخصات ابعاد واقعی ISSC TLP

فاصله بین ستون ها	$86.25\,m$
شعاع ستون ها	$8.44\,m$
عرض مقطع پانتون	$7.5\,m$
ارتفاع مقطع پانتون	$10.5\,m$
آبخور	$35\,m$
جابجایی	$54.5\times10^{6}\,kg$
جرم	$40.5\times10^{6}\,kg$
ممان اینرسی حرکت رول	$82.37\times10^{9}\,kg.m^{2}$
ممان اینرسی حرکت پیچ	$82.37\times10^{9}\,kg.m^{2}$
ممان اینرسی حرکت یاو	$98.07\times10^{9}\,kg.m^{2}$
ارتفاع مرکز ثقل بالای کیل	$38\,m$



شکل ۲: پلان و نمای ISSC TLP

فرایند مدلسازی سکوی پایه کششی در آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه شریف با مقیاس $\frac{1}{200}$ صورت پذیرفته است. با توجه به این که عمق بهره برداری مناسب این آزمایشگاه ۱/۱ متر می باشد و مدلسازی عمق و طول تاندون ها از مهمتری الزامات مدلسازی آزمایشگاهی سکوی پایه کششی است، نتایج آزمایشات روی این مدل برای ۲۲۰ متر عمق واقعی قابل ارجاع است. با در نظر گرفتن روابط مربوط به تشابه ابعادی ذکر شده و موجودیت بازار، مدل آلومینیومی پس از تعیین ابعاد در نرم افزار Solid Works ساخته شده و خروجی های سازه ای آن استخراج شده است. شکل ۳ به ترتیب از چپ به راست نمای این مدل ساخته شده و شکل سه بعدی آن را در نرم افزار Solid Works نشان می دهد.



شکل ۳: نماو شکل سه بعدی مدل سکوی پایه کششی ساخته شده از آلومینیوم در نرم افزار Solidworks

مشخصات ابعادی این مدل آلومینیومی با توجه به ضریب تشابه و موجودیت بازار در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول۲: مشخصات ابعادی مدل آزمایشگاهی

ارتفاع ستون	$30.1cm$
فاصله بین ستون ها	$43.125cm$
شعاع ستون ها	$4cm$
عرض مقطع پانتون	$3.5cm$
ارتفاع مقطع پانتون	$5.5cm$
آبخور در حالت پیش کشیده نشده	$11cm$
جرم مدل	$5.09kg$
ارتفاع مرکز ثقل بالای کیل	$17.6cm$
تعداد تاندون ها	12
ممان اینرسی در مرکز ثقل	$I_{xy} = -0.0000\ kg.mm^2$ $I_{xz} = 0.0000\ kg.mm^2$ $I_{xx} = 256863.4206\ kg.mm^2$ $I_{yy} = 357012.4516\ kg.mm^2$ $I_{zz} = 256863.4206\ kg.mm^2$ $I_{zx} = 0.0000\ kg.mm^2$ $I_{zy} = -0.0000\ kg.mm^2$

جرم افزوده با ابعاد سکو رابطه خطی دارد و تمامی ابعاد سکو به درستی با مقیاس تشابه مدل شده است. از آنجا که جرم با ضریب تشابه، مدل شده و سختی نیز مدل شده است و از طرفی پریود حرکات با تقسیم جرم به اضافه جرم افزوده بر سختی متناسب است می توان اظهار داشت که پریود طبیعی حرکات نیز با مقیاس تشابه مدل شده است.

تعیین پیش کشیدگی در سکوی واقعی

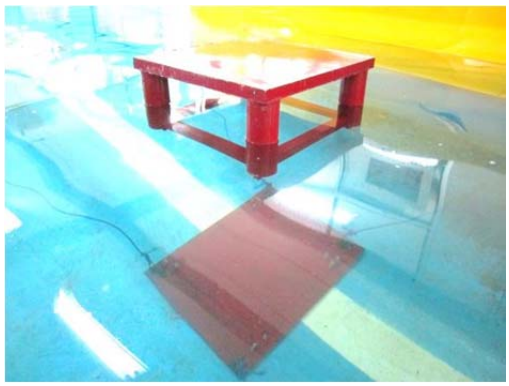
با توجه به پارامتر های ابعادی ارائه شده در جدول ۱ که مربوط به سکوی واقعی بیان شده می باشد، مقدار پیش کشیدگی در سکو از حاصلضرب اختلاف جرم و جابجایی سکو در شتاب گرانشی زمین بدست می آید که برابر با ۱۳۷/۳۴×۱۰^۶ نیوتن می باشد. این مقدار پیش کشیدگی در سکو باعث افزایش آبخور می شود که به آن آبخور افزوده می گویند. آبخور افزوده برای این سکوی پایه کششی ۱۵ متر می باشد. این مقدار آبخور افزوده نشان می دهد که سکوی واقعی که با توجه به جدول ۱ دارای ۳۵ متر آبخور در حالت پیش کشیده می باشد، در حالت بدون پیش کشیدگی و بدون نصب خطوط مهار، ۲۰ متر آبخور داشته است.

تعیین پیش کشیدگی در مدل آزمایشگاهی بر اساس سکوی واقعی

برای مدلسازی مقدار پیش کشیدگی باید نسبت مقدار پیش کشیدگی به وزن در سکوی واقعی و مدل آزمایشگاهی با هم برابر باشد. در اینجا با داشتن مقادیر پیش کشیدگی سکوی واقعی و وزن سکوی واقعی و وزن مدل آزمایشگاهی به ترتیب برابر با $137/34\times10^6$نیوتن و $397/305\times10^6$ نیوتن و ۵۴/۰۵۳۱ نیوتن، مقدار پیش کشیدگی مدل آزمایشگاهی بدست می آید که برابر است با ۱۸/۶۸۵۰ نیوتن. با استفاده از اصول بخش قبل (پیش کشیدگی)، برای مدل مقدار آبخور افزوده مورد نیاز برای ایجاد پیش کشیدگی مناسب برابر ۹ سانتی متر بدست می آید. بنابراین مدل باید پس از به آب انداختن ۹ سانتی متر در آب فرو رود و در آبخور معادل ۲۰ سانتی متر عملیات اتصال تاندون صورت پذیرد تا پیش کشیدگی مناسب سکوی واقعی، مدل شود[10].

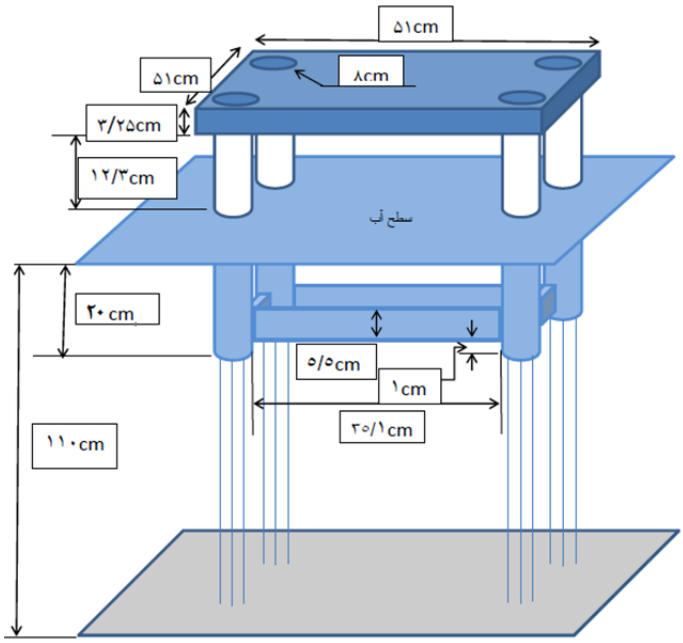
حوضچه کشش جهت انجام تست مدل

مدل سکو، در مرکز پژوهشی مهندسی دریا دانشگاه شریف تست شده است. این مرکز به کانالی به طول ۲۵ متر و عرض ۲/۵ متر و عمق ۱/۲ متر مجهز می باشد. . ضمنا این آزمایشگاه مجهز به سیستم موج ساز از نوع فلپ می باشد که توانایی تولید امواج منظم و نامنظم را داراست. آب درون حوضچه، آب شیرین است تا مشکلات ناشی از خوردگی کاهش یابد. تست‌های مختلفی از جمله تست تجهیزات زیرآب مانند پروانه، سکان و انواع زیردریایی‌ها قابل انجام است. در این پروژه عملا از سیستم موج ساز جهت تولید امواج مواجه با مدل سکوی پایه کششی نصب شده در حوضچه کشش استفاده می شود. شکل ۴ مدل نصب شده در حوضچه کشش مرکز پژوهشی مهندسی دریا را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مدل نصب شده در حوضچه کشش مرکز پژوهشی مهندسی دریا

شکل ۵ نمای شماتیک مدل سکو نصب شده همراه با تاندون ها را ارائه می دهد.



شکل ۵: نمای شماتیک مدل سکوی نصب شده در آزمایشگاه

تعیین مشخصات تاندون برای مدل آزمایشگاهی سکو(ISSC TLP)

در مرجع[8] کلیه ابعاد و مشخصات تاندون برای سکوی ISSC TLP در عمق ۴۵۰ متر و ۷۰۰ متر و ۱۰۰۰ متر ارائه شده که درجدول ۳ نشان داده شده است. با الگو گیری از مرجع[9] که تنها تفاوت مشخصات تاندون در این سه عمق، طول تاندون بوده که به ترتیب عمق، برابر ۴۱۵ متر و ۶۶۵ متر و ۹۶۵ متر به علت آبخور ۳۵ متر می باشد(مثلا طول تاندون برای عمق ۴۵۰ متر برابر۴۱۵ = ۳۵ − ۴۵۰ متر می باشد)، برای سکوی ISSC TLP در عمق ۲۲۰ متر نیز از تاندون ها با مشخصات جدول ۳ استفاده می شود با این تفاوت که طول تاندون با توجه به آبخور ۳۵ متر برابر ۱۸۵ = ۳۵ − ۲۲۰ متر در نظر گرفته می شود.

جدول ۳: مشخصات تاندون سکوی ISSC TLP

Number of tendon at each coloumn	1
Outer radius of tendon	$0.50m$
Inner radius of tendon	$0.3434m$
Tendon length	$415m$
Pretension of each tendon	$3.43E\ 7\ N$
Young's modulus	$2.1E\ 11\ N/m^2$
Axial stiffness of each tendon	$2.1E\ 8\ N/m$

شعاع خارجی هرکدام از تاندون ها ۰/۵ متر و شعاع داخلی هرکدام از آن ها ۰/۳۴۳۴ متر می باشد. بنابر این مساحت مقطع هر تاندون ۰/۴۱۵ متر مربع است. بنا براین برای عمق ۲۲۰ متر سختی قائم تمامی تاندون ها از رابطه زیر بدست می آید:

$$\text{سختی قائم تاندون ها} = 4\times\frac{AE}{L} = 4\times\frac{0.415\times 2.1\times 10^{11}}{185} = 1.88\times 10^{9}\, N/m \qquad (۱۳)$$

در عبارت بالا A مساحت مقطع تاندون و E مدول الاستیسیته تاندون و L طول تاندون می باشد، عدد ۴ نیز معرف تعداد تاندون ها در مدل با ابعاد اصلی می باشد. از آنجا که نسبت سختی محوری تاندون در پروتوتایپ به سختی محوری تاندون در مدل آزمایشگاهی برابر با مجذور ضریب تشابه می باشد، سختی کلیه تاندون ها در مدل بدست می آید:

$$\text{سختی کلیه تاندون ها در مدل} = \frac{1.88\times 10^{9}}{200^{2}} = 47000\, N/m \qquad (۱۴)$$

به علت وجود سیم های فولادی یا استیلی با قطرهای کم در ابعاد دهم میلی متر و میکرون در بازار از این نوع سیم ها با برآورد محاسبات زیر جهت ساخت تاندون ها در مدل استفاده شده است که در ادامه ابعاد دقیق این سیم های فولادی بیان می گردد. دراین تحقیق از ۱۲ تاندون(۱۲سیم فولادی) برای مدلسازی سختی استفاده شده است.

$$\text{سختی هر تاندون مدل آزمایشگاهی} = \frac{AE}{L} = \frac{\frac{\pi D^{2}}{4}\times 2.1\times 10^{11}}{0.9} = \frac{47000}{12} = 3916.66\, N/m \quad D = 0.15\, mm \qquad (۱۵)$$

پس در نهایت از ۱۲ تاندون(سیم فولادی موجود در بازار) با قطر ۰/۱۵میلی متر جهت مدلسازی تاندون استفاده شده است.

شبیه سازی موج در آزمایشگاه

برای تست حرکات شناور و سکو در امواج بنابر آنچه که در فصل پیش گفته شد از تشابه عدد فرود و تساوی عدد استروهال برای شناور و مدل که خود از نتایج تشابه فرود است استفاده می گردد. بنابر این با برابر قرار دادن نسبت عدد فرود به عدد استروهال بین مدل و نمونه واقعی بدست می آید:

$$\frac{F_n}{S_n} = \frac{\frac{V}{\sqrt{gL}}}{\frac{V\,T}{L}} = \frac{V}{\sqrt{gL}}\times\frac{L}{V\,\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{1}{2\pi}\omega\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (۱۶)$$

درمعادله (۱۶) Vسرعت سیال، L طول مشخصه از جسم، ω و T نیز به ترتیب فرکانس موج و دوره تناوب آن می باشند. با در نظر گرفتن تساوی $\frac{1}{2\pi}\omega\sqrt{\frac{L}{g}}$ بین مدل و نمونه واقعی و فرضیات شرایط آب عمیق بدست می آید:

$$\left(\frac{1}{2\pi}\omega\sqrt{\frac{L}{g}}\right)_m = \left(\frac{1}{2\pi}\omega\sqrt{\frac{L}{g}}\right)_p$$

$$\frac{\omega_m}{\omega_p} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} = \sqrt{\lambda}$$

$$\frac{K_m}{K_p} = \sqrt{\lambda}$$

$$\frac{\lambda_{wp}}{\lambda_{wm}} = \frac{(\lambda_w)_p}{(\lambda_w)_m} = \lambda \qquad (۱۷)$$

در روابط بالا λ مقیاس مدلسازی، K عدد موج و λ_w طول موج می باشد. با عنایت به روابط (۱۶) و (۱۷) همانطور که نشان داده شده است نسبت طول موج در دریا به طول موج در آزمایشگاه برابر مقیاس مدلسازی می باشد که در این پایان نامه ۲۰۰ است. به طور مختصر می توان بیان نمودکه ارتفاع موج ، طول موج و عمق آب بصورت خطی وبا ضریب $\frac{1}{\lambda}$ در مدلسازی به روش فرود ، مدل می گردد. منظور از پسوند p و m دریای واقعی و آزمایشگاه می باشد.

تست مدل در آزمایشگاه

با توجه به تئوری های ذکر شده در بخش های قبل، مدل سکوی پایه کششی آلومینیومی در آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه شریف ساخته شد. برای ساخت قطعات این مدل آلومینیومی، جوش آرگون با الکترود آلومینیومی مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت سیم های فولادی(تاندون ها) با قطر بدست آمده، از یک طرف به قلاب های زیر مدل نصب شده و از طرف دیگر به قلاب های جوش شده روی صفحه آهنی که در کف آزمایشگاه قرار گرفته است به صورت مفصلی متصل شده است. در نهایت این مدل همراه با صفحه زیرین توسط طناب های متصل به قرقره خارجی به آب انداخته شده است به طوریکه زاویه برخورد موج با مدل برابر صفر درجه باشد. امواج منظم با ارتفاع ۴ سانتی متر و ۷ طول موج متفاوت ذکر

شده در جدول ۴ به این مدل برخورد داده شده است که نتایج RAO حرکت سرج آن استخراج شده است. شکل ۶ نصب تاندون به سکو بیرون از کانال را نشان می دهد.

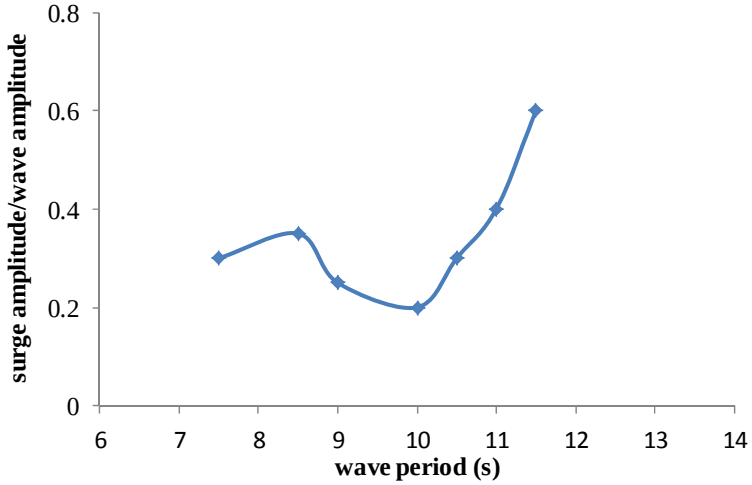
شکل ۶: نصب تاندون به انتهای ستون مدل سکو

جدول ۴: طول امواج برخوردی با ارتفاع ۴ سانتی متر به مدل

شماره تست	پریود امواج واقعی	طول امواج دریای واقعی	طول موج متناسب در آزمایشگاه
Test number	$T_{wp}(s)$	$\lambda_{wp}(m)$	$\lambda_{wm}(m)$
1	7.5	87.8	0.439
2	8.5	112.8	0.564
3	9	126.4	0.632
4	10	156.2	0.781
5	10.5	172.2	0.861
6	11	189	0.945
7	11.5	206.4	1.032

نتایج

با توجه به مقیاس مدلسازی، کلیه ۷ تست آزمایشگاهی،در امواج منظم با زاویه برخورد صفر درجه به سکو صورت پذیرفته است. این تست ها در ۷ پریود موج منظم آزمایشگاه که متناسب با ۷ طول موج آزمایشگاه نشان داده در جدول ۴ و ارتفاع موج ثابت ۴ سانتی متر انجام شده است. با اندازه گیری دامنه حرکت سرج در این پریودهای مختلف و تقسیم این دامنه ها بر دامنه موج که برابر ۲ سانتی متر است، خروجی های حرکت سرج(محور عمودی نمودار RAO) برای مدل استخراج شده است. شکل ۸ نمودار RAO حرکت سرج برای ISSC TLP در عمق ۲۲۰ متر نشان می دهد. برای استخراج نمودار شکل ۸ ابتدا تست ها برای طول موج های ستون اول سمت راست جدول۴ که مربوط به مدل است انجام شده است در نهایت نتایج هر یک از این طول موج ها که بیانگر طول موج و پریود موج در واقعیت، با مقیاس $\frac{1}{200}$ ارائه شده در ستون دوم و سوم جدول ۴ می باشد قابل ارجاع است و از این داده ها، نمودار RAO سکوی واقعی در عمق ۲۲۰ متر استخراج شده است. همانطور که در نمودار رویت می شود از پریود موج ۱۰ ثانیه به بعد با افزایش پریود که همان افزایش طول موج است، نیروهای وارده از موج بر سازه سکو افزایش پیدا کرده که نشان دهنده افزایش حرکت سرج می باشد. از پریود ۸/۵ ثانیه تا ۱۰ ثانیه کاهش حرکت سرج به دلیل است که رفته رفته با افزایش پریود تا ۱۰ ثانیه، فشار روی المان های سطح به گونه ای توزیع می شود که انتگرال این فشار صفر خواهد شد. در پریود ۷/۵ ثانیه نیز یک نقطه ماکزیمم وجود دارد که این نقطه به دلیل گیر کردن موج با این پریود در فضای بین پانتون هاست.



شکل ۸: نمودار RAO حرکت سرج برای ISSC TLP با پیش کشیدگی ۱۴۰۰۰ تن

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

مشخصات فیزیکی تاندون، اعم از سختی قائم، سختی خمشی و قطر خارجی لازم است که در امر مدلسازی لحاظ گردد. اما بـه علـت طاقـت فرسـا بودن مدلسازی به صورت دقیق از مدل کردن مشخصات فیزیکی کم اهمیت اعم از سختی خمشی می توان صرف نظر کرد. نیروهای حاصل از موج وارد بر سازه، با افزایش طول موج افزایش می یابد تا جایی که در طول موج های بسیار بلند دامنه حرکت سرج به دامنه موج به عدد ۱ بـرای زاویـه برخورد صفر درجه میل می کند. در ادامه این تحقیق می توان به استخراج نتایج دریامانی درجات دیگر آزادی حرکت این مدل سکوی پایه کششی اشاره کرد. همچنین می توان با قطع کردن تاندون ها، به بررسی عملکرد این سکو در امواج در زوایای مختلف برخـورد امـواج پرداخـت. بـا افـزودن آبخور از طریق افزودن عمق آب در کانال نیز می توان این سکو را در پیش کشیدگی های مختلف بررسی کرد.

تشکر و قدر دانی

از همکاری صمیمانه پرسنل آزمایشگاه مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف در انجام آزمایشات کـه بـی شـک بـدون وجود ایشان این پروژه به شر منزل مقصود نمی رسید، صمیمانه تشکر می شود.

مراجع

[1] Tan S .Gie, W.C. de Boom, “ The Wave Induced Motion of Tension Leg Platform in Deep Water, ”Offshore Technology Conference, 1981

[2] Lyons, G.J., Patel, M.H., Sarohia, S. “Theory and model test data for tether forces on tensioned buoyant platforms”. Proceedings of the Offshore Technology Conference, OTC No. 4643, 533-544, 1983

[3] Ney Roitman, Ricardo F.M. Andrade, Ronaldo C.Batista, “ Dynamic Response Analysis of Small-Scale Model Tension Leg Platform, ” Elsevier Science Publishers Ltd. England, 1992

[4] Nungsoo Kim,Cheung Hun Kim, “Surge Motion of Mini TLP in Random Seas-Comparison between Experiment and Theory, ” International Offshore and Polar Engineering Conference,2005

[5]Mohammad Javad Ketabdari, Hamid Alemi Ardakani, Mohammad Alemi Ardakani, “Laboratory Investigation On Response Behaviour Of SeaStar Mini Tension Leg Platformm Against Regular Water Waves, ” 26th International Conference On Offshore Mechanics and Arcitic Engineering, 2007

[6] John Murray, Chan K, Yang and Wooseuk Yang, “ An Extended Tension Leg Platform for Post-Katrina Gulf of Mexico, ”ISOPE-2008-287,2008

[7] Ney Roitman, Ricardo F.M. Andrade, Ronaldo C.Batista, “Dynamic Response Analysis of Small-Scale Model Tension Leg Platform, ” Elsevier Science Publishers Ltd. England,1992

[8] Morgan, J.R., Malaeb, D., “Dynamic analysis of tension leg platforms, ” Proceedings of the SecondInternational Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, 31-37, 1983

[9] Z.M.Wang,C.H.Kim, ‘‘Nonlinear Response of ISSC TLP in High and Steep Random Waves, ’’ International Journal of Offshore and Polar Engineering Conference, 2001

[10] تابش پور، محمدرضا، تحلیل دینامیکی غیر خطی و تصادفی سکوی دارای پایه کششی، پایان نامه دکترا در مهندسی عمران، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۵