تاثیر ابعاد هندسی بدنه سکوی پایه کششی در پاسخ سازه تحت اثر امواج

بهزاد حبیبی[۱] ، مهدی شفیعی‌فر[۲]

۱- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس تهران
۲- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

چکیده

سکوی پایه کششی (TLP) بعنوان یک سازه مناسب برای استخراج نفت در اعماق زیاد، شامل بخشهای پی، تندونها، رایزرها، بدنه و عرشه می باشدکه در بین آنها بدنه (HULL) از نظر نیروهای هیدرودینامیکی، وزن و هزینه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بدنه از ستونهای قائم، پنتون های افقی و مهاربندها با مقطع دایروی، مستطیلی یا مربعی تشکیل می‌شود. در طراحی‌های اخیر و بهبود یافته بدنهTLP از پوسته‌های استوانه‌ای با قطر بزرگتر برای ستونها و پنتونها که دارای حلقه‌های سخت کنندهٔ محیطی و تیرهای فرعی طولی برای کنترل بهتر، پایداری بیشتر سازه و مقاومت در برابر آسیب هستند، استفاده می‌شود. با توجه به اینکه یکی از نیروهای اصلی وارد بر بدنهTLP ناشی از نیروی امواج می‌باشد، ابعاد هندسی بدنه می‌تواند عامل مهمی در عملکرد بهینه و همچنین صرفه جویی اقتصادی در یک سکویTLP باشد. در این رابطه می توان با ارائه نسبتهای هندسی مناسب در بدنه، به روند طراحی اولیه کمک نمود به نحویکه عملکرد و ایمنی بهتری را انتظار داشت. در این مقاله اثر پارامترهای بی بعد هندسی بدنه TLP مانند نسبت حجم ستونها به حجم کل بدنه و اثر پارامترهای زاویه تابش موج و تعداد ستون در یک سکوی اجرا شده با تغییر ابعاد هندسی بدنه و با ثابت قرار دادن پارامتر های حجم کل بدنه، حجم مستغرق بدنه، پیش‌کشیدگی تندونها و وزن بدنه، تحت اثر امواج حداکثری با استفاده از نتایج نرم افزارABAQUS، مورد بررسی قرار گرفته و حدود مناسب ابعاد اولیه پیشنهاد گردیده است.

کلمات کلیدی: سکوی پایه کششی، تندون، بدنه، تحلیل دینامیکی، امواج حداکثری، طراحی اولیه

The Effect of TLP's Hull Geometry on The Platform Responses Under Waves

Abstract

Tension leg platforms are compliant structures for oil extraction in deep water consisting of hull, deck foundation, tendons and risers. The hull is very important part of a TLP from functionality, weight and cost point of views that is made of vertical column and horizontal pontoon with circular and rectangular sections. The hull geometry plays very important rule in optimum action of the structure. The ratio of columns volume to total volume (V_c/V), that is the function of pontoon length (L_2), column length (L_1), pontoon diameter (X_2), column diameter (X_1), is an important parameter in structure response against waves loading. In the present research a parametric study has been carried out to investigate the effect of hull geometry on TLP's responses under wave attack. A wide range of geometric parameters have been considered. A number of models have been set up by changing pontoon length, column length, pontoon diameter and column diameter. In these models the displacement volume, total volume and tendons' tension were kept constant. Then the structural models were analyzed under wave load using a finite element software. In this paper, results of this parametric study is presented and discussed. Based on these results, appropriate range of dimensionless geometry parameters are proposed for conceptual design of TLPs hull.

Keywords: TLP, Tendon, Hull Geometry, Wave Loading

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]

۱- مقدمه

برای استخراج نفت درآب‌های عمیق از سازه‌های ابتکاری جدید که با تکنولوژی موجود نیز قابل ساخت باشند استفاده می گردد. با افزایش عمق آب (بیشتر از حدود ۳۰۰ متر)، سکوهای ثابت که بر اساس تحمل بارهای خمشی و برشی طراحی می‌شوند، بازدهی خود را از دست می‌دهند، زیرا با افزایش ارتفاع سکوهای ثابت، میزان نیروهای خمشی و برشی بسیار زیاد شده و نیاز به پی‌های حجیم می‌باشد؛ همچنین پریودهای طبیعی سازه در محدوده پریودهای غالب موج قرار گرفته و حرکات شدیدی به سازه وارد می‌شود و در نتیجه ساخت این سازه‌ها غیر اقتصادی می‌شود. به منظور غلبه بر این مشکلات از مفاهیم سازه‌های تطبیقی استفاده می‌شود. ایده کلیدی در سازه‌های تطبیقی، کمینه کردن مقاومت سازه در برابر بارهای محیطی، ازطریق انعطاف‌پذیر کردن سازه می‌باشد. بنابراین یک سازه تطبیقی می‌تواند حرکت‌های جانبی قابل ملاحظه‌ای تحت بارهای موج و باد از خود نشان دهد. در بین سازه‌های تطبیقی، سکوی پایه کششی (TLP) برای آب‌های عمیق بسیار مناسب می‌باشد. سکوی پایه کششی یک سازه دوگانه است. بگونه ای که با در نظر گرفتن درجات آزادی افقی، TLP یک سازه تطبیقی است و مشابه سازه‌های شناور عمل می‌کند، در حالی‌که با درنظر گرفتن درجات آزادی قائم، TLP یک سازه سخت است و عملکرد مشابه سازه ثابت دارد.

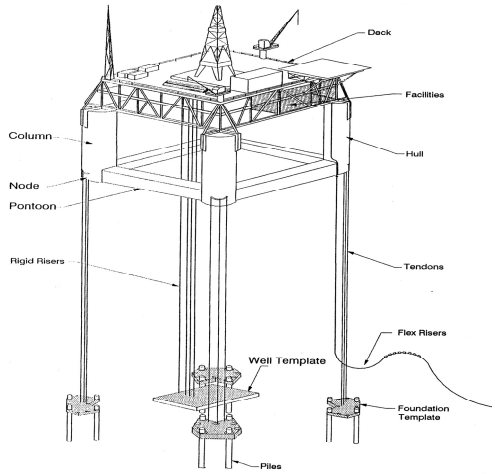
یک TLP چنانچه در شکل (۱) نشان داده شده از اجزای مختلف زیر تشکیل شده است:

الف) سازه فولادی عرشه، تحمل کننده وزن وسایل حفاری و تولید

ب) سازه Hull، متشکل از ستون‌ها، پنتون‌ها وگره‌های ستون/ پتنون محافظت کننده عرشه و تندون‌ها

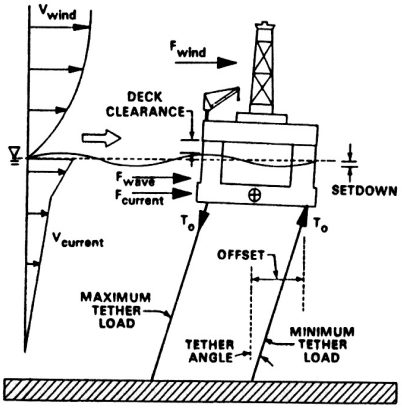
ج) سیستم مهاربندی، متشکل از لوله‌های تندون و متصل کننده‌های بالا و پایین

د) سیستم فنداسیون، متشکل از قالب ها (یکپارچه یا مجزا) با متصل کننده‌های انتهای تندون



شکل ۱- نمایی از اجزای یک سکوی پایه کششی

TLP دارای سه درجه آزادی انتقال (surge، sway، heave) و سه درجه آزادی دورانی (roll، pitch، yaw) می باشد. فرکانس‌های طبیعی surge، sway و yaw مقادیرکمی درحدود $\frac{1}{200}$ تا $\frac{1}{30}$ هرتز دارند. فرکانس‌های طبیعیheave، pitch و roll بسیار بیشتر و در محدوده $\frac{1}{5}$ تا 1 هرتز می‌باشند.



شکل ۲- پاسخ‌های اولیه سکوی پایه کششی

پاسخ‌های مهم و مرتبه اول یک سکوی TLP شامل موارد زیر است:

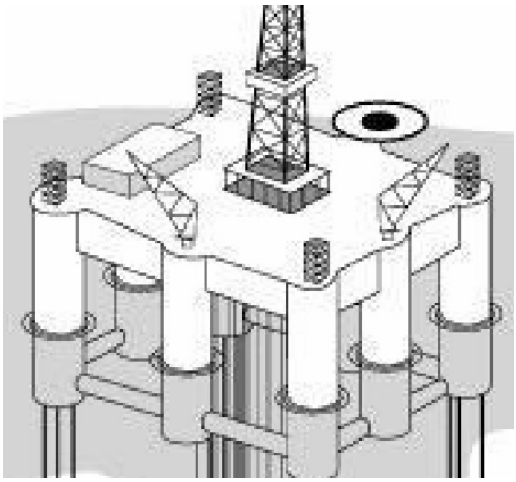
الف) offset (set down)که شامل حرکات surge وsway می‌باشد.

ب) کشش tether

ج) زاویه tether

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]

در شکل (۲) بصورت شماتیک این پاسخها نشان داده شده اند. یک مدل هندسی مورد استفاده برای بدنه TLP در شکل (۳) نشان داده شده است که دارای پنتونهای حلقوی با مقطع دایره و ۴ تا ۸ ستون قائم می باشد.



شکل ۳- یک مدل هندسی برای بدنه سکوی پایه کششی

روش‌های تحلیل سکوهای پایه کششی

در ابتدا سازه در برابر شرایط اولیه تحلیل استاتیکی می گردد. برای تعیین شرایط تعادل استاتیکی باید موارد زیر را مد نظر قرار داد:

الف) وزن کل سکو به همراه بارگذاری که باید تحلیل شود.

ب) جابجایی کل سکو (شناوری کل سکو) برای آبخورهای مختلف.

ج) همه کشش‌های تندون ها و رایزرهای عمل‌کننده روی سکو در هر شرایط بارگذاری که باید تحلیل شود.

سپس در برابر بارگذاری های مختلف، تحلیل دینامیکی فرکانسی یا تاریخچه زمانی سازه انجام می شود. همچنین بسته به پارامتر های خروجی مورد نیاز، تحلیل می‌تواند بصورت کوپله (ترکیبی) یا غیرکوپله (مجزا) انجام گردد.

با توجه به مطالعه Down و همکاران [2] که به بررسی اثر هندسی تک‌تک اعضای بدنه TLP نظیر پنتون پرداخته اند و همچنین Vasconsellos [3] که به نمونه ای از طراحی اولیه کلی TLP با تکنیکهای بهینه‌سازی پرداخته است، ابعاد هندسی بدنه در پاسخ سازه بسیار موثر می‌باشد.

در تحقیقات Grant و Sircar [4] که به بررسی فرآیند سیستماتیک عملکرد TLP پرداخته اند و Kibbee و Snell [5]که به جهت‌های جدید در طراحی هندسه بدنه TLP از نوع seastar پرداخته اند، راههای بهینه نمودن بدنه بررسی گردیده است.

با توجه به مطالعات انجام شده، انتخاب شکل هندسی مناسب برای بدنه TLP در طراحی اولیه باعث کاهش پارامترهای جابجایی و کشش حداکثری تندونها شده و همچنین با ارائه محدوده مناسب برای نسبتهای هندسی، مانند حجم ستونها به حجم کل(V_c / V)، موجب عملکرد بهینه سکو و صرفه جویی در زمان و هزینه می گردد [6, 7]. در این تحقیق اثر پارامترهای مختلف هندسی بدنه در عملکرد سازه TLP در برابر بار موج مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت حساسیت پاسخهای سازه TLP نسبت به آنها بررسی گردیده و محدوده مناسب نسبتهای هندسی بدنه برای طراحی اولیه پیشنهاد گردیده است.

مراحل مدل‌سازی سکو و انتخاب نوع بارگذاری

به دلیل تعداد اندک سازه های اجرا شده از نوعTLP و همچنین نیاز به تحلیل دینامیکی و کمبود اطلاعات لازم در موردTLPهای موجود، داشتن داده ها و اطلاعات جدید ضروری است. اجرای این هدف به منظور تولید داده های هندسی جدید TLP با انتخاب چند سکو که داده های نسبتا مناسب اولیه و کلی آنها موجود بوده صورت گرفته است و نسبتهای هندسی جدید ایجاد گشته است. با این داده ها و با تحلیل پاسخ سکوها در برابر بارگذاری‌های مختلف، انتخاب نسبتهای مناسب فراهم می‌گردد.

درهندسه بدنه سکوی TLP، ۵پارامتر به ترتیب قطر ستون(X1)، قطر پنتون(X2)، ارتفاع ستون(L1)، طول پنتون (L2) و عمق آبخور (X3) در نظر گرفته شده است. اما برای ایجاد داده‌های جدید در راستای هدف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]

تحقیق که عبارت است از بررسی نسبتهای هندسی بدنه TLP، با ثابت نگه داشتن تقریبی بعضی از پارامترها از جمله وزن عرشه، ارتفاع تندون‌ها، displacement، پیش کشیدگی تندونها، جنس تندونها و فرض صلب بودن بدنه TLP مشخصه های هندسی جدید تولید گشته و ساخت مدل آن توسط نرم افزار المان محدود انجام می شود. نمونه ای ازاطلاعات هندسه های تولید شده در جدول (۱) آمده است [1].

جدول ۱- نمونه‌ای از اطلاعات هندسی تحلیل شده

x1 (m)	x2 (m)	l1 (m)	l2 (m)	Vtotal (m^3)	x1/ l1	x2/ l2	X1/ X2	L1/ L2
۲۵	۱۱/۵	۶۳	۷۳/۶۹	۱۰۴۱۹۴	۰/۴	۰/۱۶	۲/۱۷	۰/۸۵
۲۶	۹/۷۵	۵۹/۱۴	۸۶/۹۱	۱۰۵۵۴۳	۰/۴۴	۰/۱۱	۲/۶۷	۰/۶۸
۲۷	۷/۷۵	۵۵/۶۵	۱۰۹/۳	۱۰۶۴۶۲	۰/۴۹	۰/۰۷	۳/۴۸	۰/۵۱
۲۷/۵	۶/۷۵	۵۴/۰۳	۱۲۵/۵	۱۰۷۰۰۹	۰/۵۱	۰/۰۵	۴/۰۷	۰/۴۳
۲۴	۱۳/۵	۶۷/۲۹	۶۲/۷۷	۱۰۳۷۴۶	۰/۳۶	۰/۲۲	۱/۷۸	۱/۰۷
۲۳/۵	۱۴/۵	۶۹/۶۱	۵۸/۴۴	۱۰۳۶۱۰	۰/۳۴	۰/۲۵	۱/۶۲	۱/۱۹
۲۳	۱۵/۵	۷۲/۰۶	۵۴/۶۷	۱۰۳۵۳۳	۰/۳۲	۰/۲۸	۱/۴۸	۱/۳۲
۲۲	۱۷/۵	۷۷/۴۲	۴۸/۴۳	۱۰۳۵۵۶	۰/۲۸	۰/۳۶	۱/۲۶	۱/۶
۲۱/۵	۱۸/۵	۸۰/۳۴	۴۵/۸۱	۱۰۳۶۵۶	۰/۲۷	۰/۴	۱/۱۶	۱/۷۵
۲۱	۱۹/۵	۸۳/۴۵	۴۳/۴۶	۱۰۳۸۱۵	۰/۲۵	۰/۴۵	۱/۰۸	۱/۹۲
۲۰	۲۱/۵	۹۰/۲۷	۳۹/۴۱	۱۰۴۳۰۹	۰/۲۲	۰/۵۵	۰/۹۳	۲/۲۹
۲۵	۱۱/۵	۶۳	۷۳/۶۹	۱۰۴۱۹۴	۰/۴	۰/۱۶	۲/۱۷	۰/۸۵

در مدلسازی سازه فرضیات و شرایط زیر در نظر گرفته شده است:

۱- اتصال بین بدنه و تندونها بصورت اتصال با آزادی چرخشی در ۳ جهت می‌باشد.

۲- اتصال بین تندون و پی بصورت مفصلی است.

۳- بار و جرم عرشه بر صفحه صلب روی بدنه وارد می شود.

۴- از تاثیرات شکست موج صرفنظر شده است.

۵- اثر همپوشانی اعضا در برآورد نیروی موج لحاظ نشده است.

۶- بدنه سکو با افزایش مدول الاستیسیته صلب می‌گردد.

۷- از المان beam در مدل استفاده شده است.

در ضمن با توجه به محدوده قطر اجزا تشکیل دهنده بدنه سکو و طول موج های برخوردی و برقرار بودن شرط $D/L<0.2$ (نسبت قطر به طول موج)، در تمام ابعاد هندسی بدنه می توان از رابطه موریسون برای برآورد نیروهای ناشی از امواج استفاده نمود.

در بررسی سکوهای اجرا شده و اطلاعات وزنی و حجمی آنها روابطی برای پارامترهای هندسی و فیزیکی پیشنهاد شده است که می توان از آنها در مرحله طراحی اولیه سکو استفاده نمود. پارامترهای هندسی و فیزیکی که در این تحقیق مورد بررسی قرارگرفته اند در جدول (۲) نشان داده شده اند که در آن Awl سطح مقطع ستون، Hcol ارتفاع ستون، D قطر ستون، Nco تعداد ستونها، Lp، Bp و Hp بترتیب طول، عرض و ارتفاع پنتون، A سطح عرشه و d ضخامت عرشه می‌باشند [9, 8, 4].

جدول ۲- پارامترهای هندسی و فیزیکی مورد استفاده در تحقیق

	مشخصه های طراحی	معادله
۱	حجم مغروق ستون	Vmc=(Awl*Hmcol)*Nco
۲	حجم جابجا شده	delta=(Vmc+Vp)*p
۳	وزن ستونها	Pcol=0.286*D^1.612*Hcol
۴	وزن پنتون	Ppon=9.4*0.001*(Sp*Top)^1.05
۵		Sp=2*Lp*(Bp+Hp)
۶	وزن عرشه	Pdeck=0.218*d*A

با توجه به بررسی صورت گرفته و به دلیل اهمیت محاسبه دقیق نیروهای وارد بر بدنه در رفتار سازه، نرم افزار المان محدود مورد نظر باید دارای قابلیت خوبی در رابطه با وارد کردن نیروهای موج و نیروی شناوری بر روی TLP باشد. با توجه به قابلیتها وکارآیی نرم افزار ABAQUS (Ver6.4) در تحلیل دینامیکی و استاتیکی شناورها در تحقیق حاضر از این نرم افزار استفاده گردیده است. در بارگذاری ABAQUS از سیستم انتگرال مستقیم در تحلیل استاتیکی و تحلیل دینامیکی استفاده می گردد. مدول AQUA در نرم افزار ABAQUS سطح تراز آب را در هر لحظه محاسبه نموده و همه نیروها را فقط در محدوده سطح بستر تعریفی و سطح تراز آب محاسبه می‌نماید.

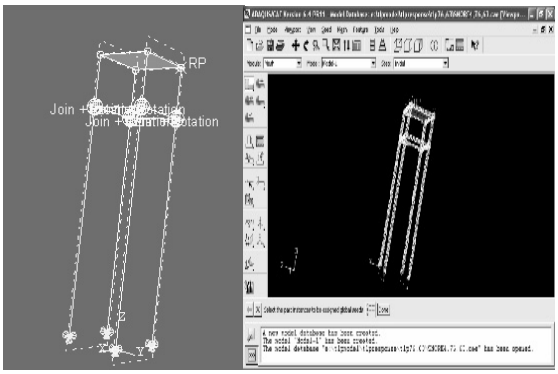
پارامترهای تعریف شده از سیال در محیط ABAQUS شامل غلظت، سطح بستر، سطح آزاد و ثابت وزنی می باشد. در این نرم افزار برای تعریف امواج می توان از دو تئوری امواج Stokes و تئوری ایری استفاده نمود که طی آن ارتفاع و پریود موج و زاویه شروع تابش موج و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]

جهت موج در صفحهXY برای آن تعریف می گردد. برای اعمال نیروی حاصل از امواج از روابط موریسون بهره گرفته می شود به نحوی که ضرایب هیدرودینامیک درگ و اینرسی Cd و Cm با توجه به قطرهای اعضاء و عمق آب انتخاب می گردد.

در تحقیق حاضر با توجه به دقت بیشتر تئوری موج استوکس و توصیه های مراجع مختلف نظیر [8,10,11]، از این تئوری موج استفاده شد.

با استفاده از این نرم افزار، مدل سازه برای تمامی ابعاد هندسی مورد نظر شامل ۶۴ مدل ساخته شد. یک نمونه از مدل ساخته شده در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۴- مدلسازی انجام شده در ABAQUS Ver6.4-6.5

از آنجا که هدف تحقیق بررسی اثر نسبتهای هندسی بدنه TLP می‌باشد، از تحلیل میدان زمانی برای مدل ترکیبی (کوپله) استفاده شده است. در این تحقیق برای تعیین موج طرح از اطلاعات موج دریای شمال (North Sea) استفاده شد و موج با ارتفاع ۱۲ متر و پریود ۱۰ ثانیه به سازه در دو زاویه صفر و ۴۵ درجه تابیده شد و تحلیل دینامیکی کوپله تاریخچه زمانی برای ۶۴ مدل هندسی جدید انجام گردید. پس از آن پارامترهای خروجی دسته بندی گردیدند. نمونه ای از نتایج در جدول (۳) آمده است.

از ترکیب متغیرهای اصلی هندسه بدنه TLP می‌توان متغیرهای بی بعد زیر را بدست آورد:

V_c / V : نسبت حجم ستون به حجم کل

$L_1 /(V^{1/3})$: نسبت طول ستون به ریشه سوم حجم

$X_1 /(V^{1/3})$: نسبت طول پنتون به ریشه سوم حجم

$L_2 /(V^{1/3})$: نسبت قطر ستون به ریشه سوم حجم

$X_2 /(V^{1/3})$: نسبت قطر پنتون به ریشه سوم حجم

این پارامتر برای طراحی اولیه یک سکوی TLP بسیار حائز اهمیت می باشد.

پس از انجام تحلیل دینامیکی بصورت تاریخچه زماتی خروجی های تحلیل دسته بندی می گرددکه در آنها پارامترهای مهم عبارتند از:

$U_{1,2\,(max)}$: جابجایی حداکثر صفحه ای

$TENSION_{(max)}$: کشش حداکثری تندون

$TENSION_{(min)}$: کشش حداقلی تندون

جدول ۳- پارامترهای هندسی و فیزیکی مورد استفاده در تحقیق

x1 (m)	x2 (m)	L1 (m)	L2(m)	Vtota (m^3)	u1,2 (max) (m)	Tension (max)
۲۵	۱۱/۵	۶۳	۷۳/۶۹	۱۰۴۱۹۴	۲/۷	۱۳۶۲۷۴۰۰۰
۲۶/۲	۹/۲۵	۵۸/۲۳	۹۱/۶۱	۱۰۵۷۵۰	۱/۶	۱۳۳۴۳۶۰۰۰
۲۷	۷/۷۵	۵۵/۶۵	۱۰۹/۳۴	۱۰۶۴۶۲	۰/۶۷	۱۲۵۱۵۸۰۰۰
۲۷/۷	۶/۲۵	۵۳/۲۵	۱۳۵/۵۹	۱۰۷۳۰۵	۱/۳۶	۱۳۱۵۰۰۰۰۰
۲۴	۱۳/۵	۶۷/۲۹	۶۲/۷۷	۱۰۳۷۴۶	۴/۶۸	۱۳۹۱۵۲۰۰۰
۲۲/۵	۱۶/۵	۷۴/۶۶	۵۱/۳۶	۱۰۳۵۱۵	۶/۰۴	۱۳۵۵۸۰۰۰۰
۲۱	۱۹/۵	۸۳/۴۵	۴۳/۴۶	۱۰۳۸۱۵	۵/۸۹	۱۴۴۳۹۷۰۰۰
۲۰/۲	۲۱	۸۸/۴۸	۴۰/۳۵	۱۰۴۱۶۳	۳/۷	۱۵۸۹۸۰۰۰۰
۲۰	۲۱/۵	۹۰/۲۷	۳۹/۴۱	۱۰۴۳۰۹	۷/۳	۱۵۲۲۹۳۰۰۰
۲۲	۱۷/۵	۷۷/۴۲	۴۸/۴۲	۱۰۳۵۵۶	۵/۷۴	۱۴۴۶۱۳۰۰۰
۲۱/۵	۱۸/۵	۸۰/۳۴	۴۵/۸۱	۱۰۳۶۵۶	۶/۵۳	۱۴۳۷۶۵۰۰۰

بحث و بررسی نتایج

در تحقیق حاضر اثر پارامترهای زاویه تابش و تعداد ستون و نسبت V_c / V مورد بررسی قرار گرفته اند. از آنجا که تغییر پارامتر V_c / V ناشی از تغییر چهار پارامتر $X_1 /(V^{1/3})$، $L_1 /(V^{1/3})$، $X_2 /(V^{1/3})$ و $L_2 /(V^{1/3})$ می‌باشد، نحوه تغییر پارامترهای ذکر شده نیز مهم می باشد و باید مورد بررسی قرار گیرد.

اثر پارامتر زاویه تابش بر پاسخ‌های TLP

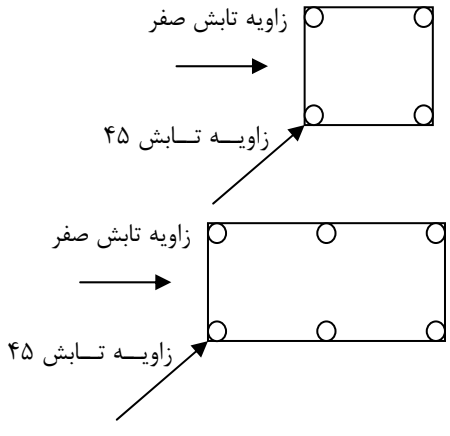
باتوجه به نتایج تحلیلی، وقتی زاویه تابش از صفر به ۴۵ درجه تغییر می یابد، به دلیل موقعیت تابش موج دو تندون در سختی در برابر جابجایی صفحه‌ای مشارکت کامل ندارند. بنابراین جابجایی افقی وقتی که

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]

زاویه تابش برابر ۴۵ درجه است نسبت به زاویه تابش صفر درجه افزایش می یابد. از اینرو پس از شناسایی جهت موج حداکثری، سکو با زاویه صفر درجه نسبت به یکی از دو محورX,Y قرار گرفت [1].

اثر پارامتر تعداد ستون بر پاسخ‌های TLP

مدل اصلی ابتدا با ۴ ستون در نظر گرفته شد و بررسی های مختلف در رابطه با رفتار آن انجام گرفت. همانگونه که در شکل (۵) مشاهده می شود، در این مدل تقارن در برابر موج وارده در دو حالت زاویه تابش برابر با صفر و ۴۵ درجه وجود دارد. در مدل ۶ ستونی که مطابق شکل (۵) در نظر گرفته شده است، در زاویه تابش موج برابر صفر تقارن وجود دارد؛ اما در حالت ۴۵ درجه تقارن وجود نداشته و پیچش صفحه ای نیز ایجاد می گردد. از اینرو درحالتی که زاویه تابش صفر درجه می باشد، تغییر تعداد ستون از ۴ به ۶ موجب کاهش جابجایی حداکثر صفحه ای می گردد؛ اما در حالت تابش ۴۵ درجه، علاوه بر افزایش نیرو بخاطر بیشتر شدن سطح در معرض بدنه، تغییر تعداد ستون از ۴ به ۶ به دلیل غیر متقارن گشتن سکو در برابر بار وارده باعث افزایش جابجایی حداکثر صفحه ای می گردد. بنابراین باید توجه داشت که انتخاب تعداد ستونها و ترکیب قرارگیری آنها به نحوی باشد که حجم آنها حداکثر لنگر مقاوم را در برابر حرکت pitch ایجاد نماید.



شکل ۵- نحوه اعمال جهت امواج به سکو

اثر پارامتر V_c/V

در نمودارهای شکلهای (۷) تا (۱۰) تغییرات کشش حداکثری تندونها و جابجایی حداکثر صفحه ای بر حسب نسبت حجم ستونها به حجم کل (V_c/V) برای شرایط مختلف رسم گردیده است. با توجه به اینکه پارامتر (V_c/V) متغیری است که تابعی از متغیرهای طول ستون (L_1)، قطر ستون(X_1)، طول پنتون(L_2)، قطر پنتون(X_2) می‌باشد، در نمودارها نحوه تغییر متغیرهای X_1، L_1، X_2، L_2 نیز همگام با تغییر V_c/V نشان داده شده است.

در نمودار شکل (۷) نمودار حداکثر جابجایی در صفحه xy نسبت به پارامترهای $X_1/(V^{1/3})$، $L_1/(V^{1/3})$، $X_2/(V^{1/3})$ و $L_2/(V^{1/3})$در شرایط زاویه تابش موج برابر با صفر درجه و تعداد ستون برابر با ۴ رسم گردیده است. با بررسی نمودار مشاهده می شود با افزایش درصد مشارکت ستون در حجم کل از۵۰٪ به ۷۵٪ جابجایی صفحه ای حدود ۴ برابر کاهش می یابد و همچنین باعث کاهش محسوس حداکثر کشش تندون ناشی از بارگذاری می‌گردد.

برای امکان مقایسه نتایج لازم است پارامتر حجم کل و حجم مستغرق برای تمام هندسه‌های تولید شده ثابت باشد. نحوه تغییر متغیرهای هندسی در جهت ثابت نگه داشتن پارامترهای حجم کل و حجم مستغرق طوری است که با افزایش V_c/V نسبت $L_2/(V^{1/3})$ با شیب بسیار زیادی نسبت به سایر پارامترها افزایش می‌یابد. در حالیکه پارامترهای $X_2/(V^{1/3})$ و $L_1/(V^{1/3})$ با شیب کمی کاهش یافته و پارامتر $X_1/(V^{1/3})$ با شیب کمی افزایش می یابد. با توجه به نتایج فوق بنظر می‌رسد طراحی بهینه به سمت قطور شدن ستونها و لاغر شدن پنتونها میل می‌کند. البته پارامترهای سازه‌ای مخصوصا پارامترهایی نظیر طراحی جزییات سازه‌ای اعضای ستون و پنتون محدود کننده این فرایند می‌باشند.

در شکل (۸) تغییرات حداکثر جابجایی در صفحه xy نسبت به پارامترهای $X_1/(V^{1/3})$، $L_1/(V^{1/3})$، $X_2/(V^{1/3})$ و $L_2/(v^{1/3})$ در شرایط زاویه تابش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]

موج ۴۵ درجه و تعداد ستون برابر با ۴ نشان داده شده است. شکل (۹) نیز نمودار حداکثر جابجایی در صفحه xy را نسبت به پارامترهای مذکور در شرایطی که زاویه تابش موج ۴۵ درجه و تعداد ستون برابر با ۶ باشد نشان می‌دهد. در نمودارهای ارائه شده در شکلهای (۸) و (۹) می‌توان نتایج مشابه بند قبل را نتیجه گرفت. با توجه به نمودارهای ذکر شده محدوده مناسب V_c / V بین ۰/۷ و ۰/۸ می‌باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه‌گیری نمود که برای بهینه نمودن بدنه جهت ایجاد حداقل جابجایی در صفحه TLP باید تا حد امکان طول پنتون و قطر ستونها را زیاد و قطر پنتون و ارتفاع ستونها را کاهش داد. این نتیجه‌گیری در نگاه اول بخاطر افزایش قطر ستون و در نتیجه افزایش نیروی ناشی از امواج ممکن است غیر عادی به نظر برسد که در ادامه علت این امر بررسی می‌گردد.

در شکل (۶) چگونگی جابجایی یک سکویTLP در اثر نیروی ناشی از امواج نشان داده شده است. در سکوی TLP سختی افقی از تغییر کشش تندونها حاصل می‌شود. تعادل قبل از بارگذاری سکو را از رابطه زیر بدست آورد:

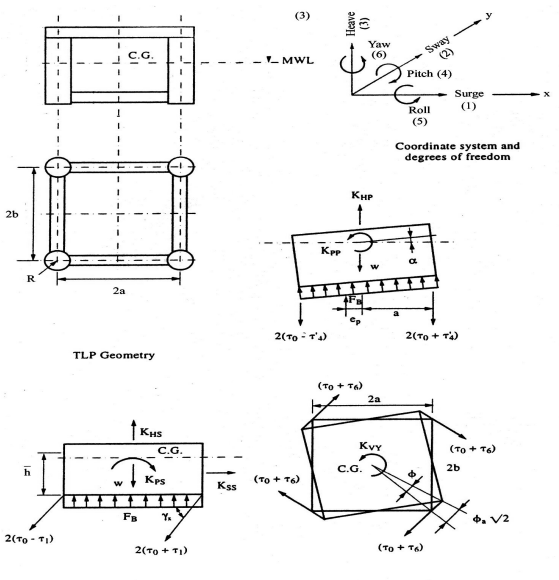
$$2T = F_B - W \qquad (۱)$$

که در آن T کشش تندون، F_B نیروی شناوری، W نیروی وزن می باشند.

اما پس از بارگذاری ناشی از موج بر سازه مطابق شکل(۶) جابجایی افقی بهمراه یک چرخش pitch ایجاد می گردد. اگر این زاویه را γ_S و نیروی وارد بر پایه ستونها ناشی از بار موج را F_W و جابجایی افقی را U نامیده شود در حالت تعادل لنگر ناشی از بارگذاری رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$(-\Delta T * 2a * \cos(\gamma_s)) + (F_W * d / 2) - (2 * T * \overline{S} * \sin(\gamma_s)) = 0 \qquad (۲)$$

که در آن ΔT از رابطه (۳) و (۵) بدست می‌آید.



شکل ۶- بررسی چگونگی جابجایی در سکوی TLP در اثر بارگذاری

$$\Delta T = \frac{EA_t}{L}(\sqrt{L^2 + U^2} - L) \qquad (۳)$$

$$\sin\gamma_X = \frac{U}{\sqrt{U^2 + L^2}} \qquad (۴)$$

$$\Delta T = (F_W * d/2 - 2 * T * \overline{S} * \sin(\gamma_s)) / (2 * a * \cos\gamma_s) \qquad (۵)$$

در این روابط (2*a) طول پنتون، d عمق آبخور، $\overline{S}$ فاصله بین مرکز جرم و شناوری، E مدول الاستیسیته، A_t سطح مقطع تندون، L طول تندون است.

ترم اول معادله(۲) لنگر ناشی از تغییرکشش تندونها می باشد. ترم دوم لنگر حاصله ازنیروی انتگرال گرفته موج می‌باشد که به دلیل ثابت بودن عمق مستغرق، d ثابت می باشد. ترم سوم رابطه (۲) از رابطه لنگر پایدار کننده تحلیل شناورها ناشی از چرخش pitch شکل (۶) حاصل گردیده است. با توجه به تحلیلهای انجام شده در این تحقیق هر چه سهم ستونها بیشتر باشد یا به عبارت دیگر V_c / V افزایش یابد موجب چاق شدن ستونها و لاغرشدن پنتونها به همراه افزایش طول آنها در جهت ثابت نگه داشتن پارامترهایی نظیر حجم مستغرق می شود. این امر باعث افزایش شدید لنگر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]

برگرداننده پایداری در مقابل حرکت pitch می‌گردد. البته با افزایش قطرستون نیروهای وارده از طرف موج بر سازه F_W افزایش می یابد اما در مقابل افزایش لنگر برگرداننده شناورها، افزایش کمتری دارد.

میزان رشد F_w را می توان بصورت زیر بررسی نمود. با توجه به تغییر قطر ستونها از ۲۰ متر الی۲۷/۵ متر و بر اساس رابطه موریسون (۶) با افزایش ۳۵٪ در قطر ستون F_I حداکثر ۳۵٪ افزایش داشته و نیروی F_d حداکثر ۸۰٪ افزایش خواهد داشت و در مجموع نیروی F_W با تقریب بالا حداکثر ۸۰٪ افزایش خواهد داشت.

$$F_W = F_I + F_D \qquad (۶)$$

$$F_I = \frac{\pi}{4}\rho_W C_A D^2(\dot{u} - \ddot{x}) + \frac{\pi}{4}\rho_W C_A D^2 \dot{u}$$

$$= \frac{\pi}{4}\rho_W D^2 (C_M \dot{u} - C_A \ddot{x})$$

$$F_D = \frac{1}{2}\rho_W C_D D|u - \dot{x}|(u - \dot{x})$$

همچنین با تغییر شکلهای ایجاد شده در ترم سوم رابطه (۲) مقدار $\bar{s}$ حدود ۲ برابر افزایش یافته و طول پنتون (2*a) حدود ۲/۵ برابر می گردد.

بنابر این با افزایش۲ برابری $\bar{s}$ وافزایش۲/۵ برابری مقدار طول پنتون ($2*a$) و افزایش ۸۰٪ نیروی حاصل از موج، مقدار ΔT در رابطه (۵) کاهش می یابد که این امر در نتایج تحلیل کاملا واضح می باشد. پس از آن با قراردادن مقدار ΔT در رابطه (۳)، جابجایی افقی بدست می آید. بنابراین ملاحظه می‌شود که با کاهش ΔT جابجایی افقی کاهش خواهد یافت.

درشکل (۱۱) نمودار نسبت جابجایی قائم به طول پنتون (چرخش pitch) نسبت به پارامتر V_c / V در شرایطی که زاویه تابش موج صفر درجه و تعداد ستون برابر با ۴ نشان داده شده است. با توجه به نمودار این شکل ملاحظه می شود که نسبت جابجایی قائم به طول پنتون ($(U_{3MAX} - U_{3MIN})/L_2$) با افزایش V_c / V کاهش می یابد که در واقع همان زاویه چرخش pitch می‌باشد که تاییدی بر توضیحات بند قبلی می‌باشد.

درشکل (۱۲) نمودار نسبت جابجایی قائم نسبت به پارامتر v_c / v برای زاویه تابش موج صفر درجه و تعداد ستون برابر با ۴ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار ملاحظه می‌شود که جابجایی قائم (U_{3MAX}) با افزایش V_c / V کاهش می‌یابد.

به دلیل اینکه حدود نسبتهای هندسی در طراحی اولیه بسیار مهم می باشد، در شکل(۱۳) نمودار حداکثرکشش تندون نسبت به پارامترهای L_1 / L_2، X_1 / X_2 و V_c / V در شرایط (زاویه تابش موج برابر با ۴۵ درجه و تعداد ستون برابر با ۴) ارائه شده است. با توجه به این شکل می توان محدوده مناسب برای تقسیم فضای بدنه را به صورت زیر ارائه نمود:

$$۰/۵ < X_1 / X_2 < ۱ \quad \text{و} \quad ۲/۵ < L_1 / L_2 < ۴$$

با توجه به تحلیلهای انجام شده، در یک روش عملی در طراحی اولیه بدنه لازم است پس از انتخاب حجم کل بدنه با توجه به وزن عرشه و مقاومت تندونها و عمق آبخور مورد نظر به تقسیم فضاها پرداخته شود. انجام مراحل کار به شرح زیر پیشنهاد می گردد:

۱- حجم مستغرق بدنه محاسبه گردد.

۲- عمق آبخور محاسبه و به عنوان ثابت در نظر گرفته شود.

۳- وزن حدودی بدنه با توجه به روابط تقریبی ذکر شده درجدول (۲) محاسبه گردد.

۴- متغیرهای طول ستون و طول پنتون و قطر ستون و قطر پنتون در نظر گرفته شوند.

۵- محدودیت های زیر اعمال گردد:

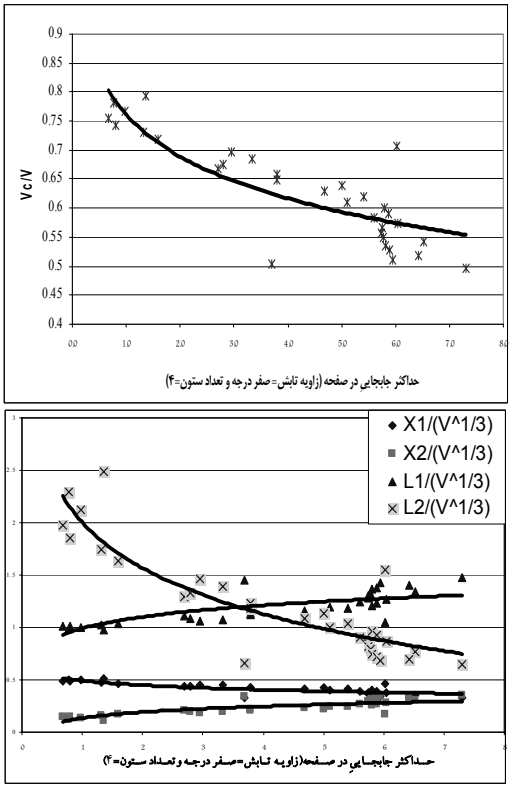
- $۰/۷ < V_c / V < ۰/۸$
- حداقل طول ستون برابر با عمق آبخور به علاوه ارتفاع موج حداکثری باشد
- حداقل طول پنتون برابر با مجذور سطح عرشه در نظر گرفته شود.

- می توان محدوده نسبتهای هندسی مناسب بدنه را با استفاده از شکل (۱۳) به صورت زیر ارائه نمود:

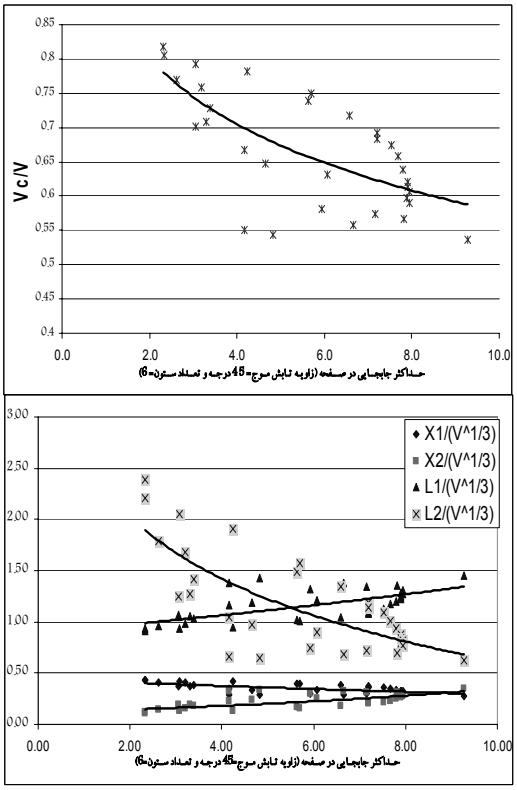
$$۰/۵ < X_1 / X_2 < ۱ \quad \text{و} \quad ۲/۵ < L_1 / L_2 < ۴$$

با توجه به مراحل ذکر شده تحلیل هندسه های جدید تحت بار موج صورت گرفته و ابعاد بهینه انتخاب می گردد.

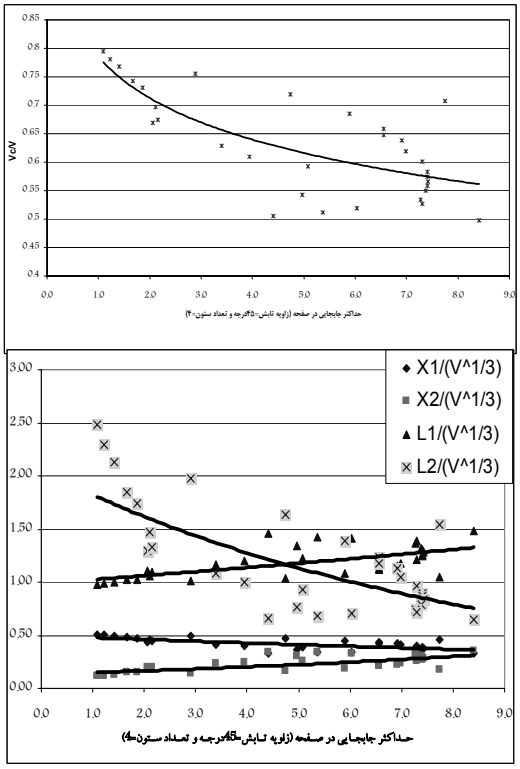
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]



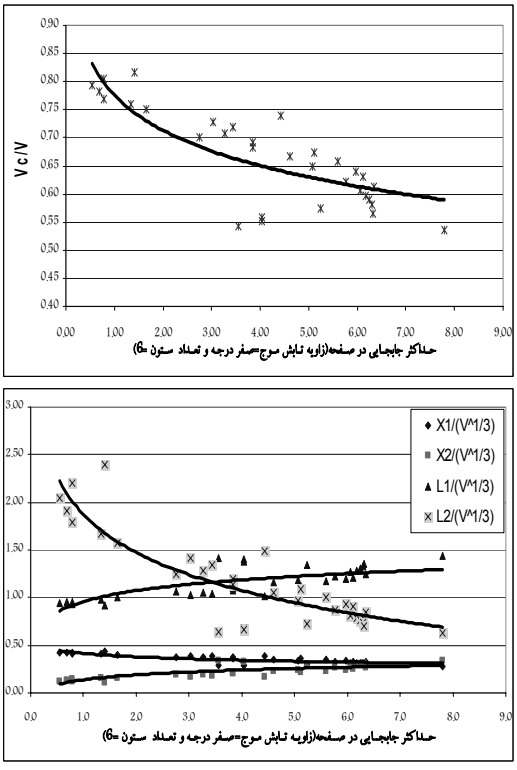
شکل ۷- نمودار حداکثر جابجایی در صفحه xy نسبت به پارامترهای مختلف در شرایط (زاویه تابش موج صفر درجه و ۴ ستون)



شکل ۹- نمودار حداکثر جابجایی در صفحه xy نسبت به پارامترهای مختلف درشرایط زاویه تابش موج برابر صفر درجه و ۶ ستون

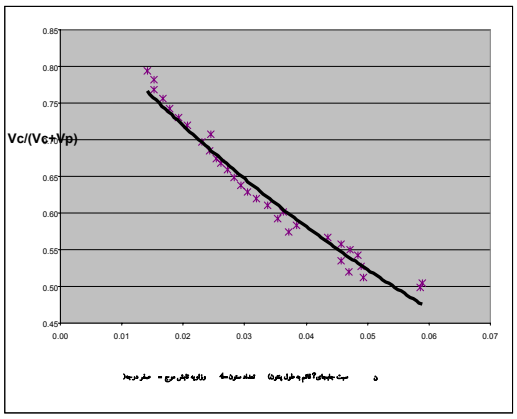


شکل ۸- نمودار حداکثر جابجایی در صفحه xy نسبت به پارامترهای مختلف در شرایط (زاویه تابش موج برابر ۴۵ درجه و ۴ ستون)

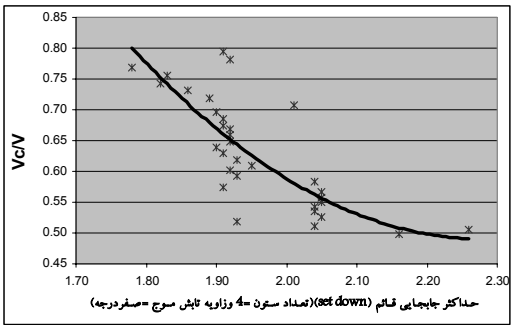


شکل ۱۰- نمودار حداکثر جابجایی در صفحه xy نسبت به پارامترهای مختلف در شرایط زاویه تابش موج برابر۴۵ درجه و ۶ ستون

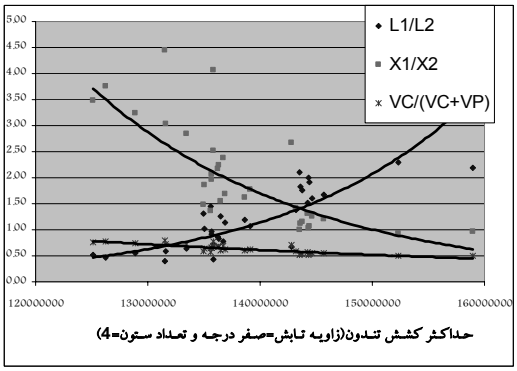
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]



شکل ۱۱- نمودار نسبت جابجایی قائم به طول پنتون (چرخش) pitch) نسبت به پارامتر V_c / V در شرایط زاویه تابش موج برابر با صفر درجه و تعداد ستون برابر با ۴



شکل ۱۲- نمودار حداکثر جابجایی قائم (set down) نسبت به پارامتر V_c / V در شرایط زاویه تابش موج برابر با صفر درجه وتعداد ستون برابر با ۴



شکل ۱۳- نمودار حداکثرکشش تندون نسبت به پارامترهای L_1 / L_2، X_1 / X_2 و V_c / V در شرایط (زاویه تابش موج برابر با صفر درجه و تعداد ستون برابر با۴)

نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از تحلیل هندسه های متفاوت با نرم افزار المان محدود و دسته‌بندی نتایج خروجی و تحلیل آنها اهم نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱- تغییر تعداد ستون از ۴ به ۶ درحالتی که زاویه تابش صفر درجه می باشد موجب کاهش جابجایی حداکثر صفحه ای می گردد. اما در حالت تابش ۴۵ درجه، علاوه بر افزایش نیرو بخاطر بیشتر شدن سطح در معرض بدنه، تغییر تعداد ستون از ۴ به ۶ به دلیل غیر متقارن گشتن سکو در برابر بار وارده باعث افزایش جابجایی حداکثر صفحه ای می گردد. بنابراین باید توجه داشت که انتخاب تعداد ستونها و ترکیب قرارگیری آنها به نحوی باشد که حجم آنها حداکثر لنگر مقاوم را در برابر حرکت pitch ایجاد نماید.

۲- توزیع حجم باید به نحوی باشد که لنگر پایدار کننده شناوری را افزایش دهد؛ به نحوی که بیشترین مقاومت در برابر چرخش زاویه ای ایجاد گردد.

۳- با توجه به نمودارها و مباحث بند های قبلی می توان محدوده نسبتهای هندسی مناسب بدنه را به شرح زیر ارائه نمود:

$$۰/۷ < V_c / V < ۰/۸$$

$$۲/۵ < L_1 / L_2 < ۴$$

$$۰/۵ < X_1 / X_2 < ۱$$

در پایان ذکر این نکته ضروری است که نتایج فوق الذکر فقط در محدوده فرضیات انجام گرفته در تحقیق حاضر و محدویت های کار انجام شده حاصل شده‌اند. بررسی تاثیرات عدم در نظر گرفتن این فرضیات می‌تواند موضوع کارهای تحقیقاتی آینده باشد.

مراجع

۱- حبیبی، بهزاد." بررسی اثر شکل هندسی بدنه سکوی پایه کششی در پاسخ سازه توسط امواج و بهینه سازی آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴.

2-Downie M.J.; Graham J.M.R.; Seo S-G. "The Effect of Pontoon Geometry on

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]

6-Jeffreys E R and Patel M H, "Dynamic analysis models of the tension leg platform", Journal of Energy Resources Technology, Vol 104, pp 217-223, l982.

7-Demirbilek. Z. "TENSION LEG PLATFORM: A State of the Art Review", New York: ASCE, 0-87262-683-0, 335 pp. 1989.

8-API, Recommended Practice For Planning, Designing, and Construction of Tension Leg Platforms", API RECOMMENDED PRACTICE 2T, 1997.

9-Oo, K.M., Miller, N.S ,"Semi-submersible Design: the Effect of Differing Geometric on Heaving Response and Stability" OMAE, Proceedings of the 16th International conference on offshore mechanics and Arctic Engineering 1997.

the Response of a TLP in Waves". OMAE 1996 Proceedings of the 15th International conference on offshore mechanics and Arctic engineering (ASME, New York), 1A, 467-472, 1996.

3-Vasconcellos, J. M., "One Approach to TLP Preliminary Design Using Optimization Techniques" OMAE, Proceedings of the 18th International conference on offshore mechanics and Arctic engineering, 1999.

4-Grant. H.G, Sircar. S. "Systematic Procedure for Developing Optimum TLP Configuration" OMAE Proceedings of the 15th International conference on offshore mechanics and Arctic engineering (ASME, New York) 1996.

5-Kibbee. S.E.,,Snell, D.C., "New Direction in TLP Technology" OTC, 14175, Offshore Technology Conference, Houston, 2004.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.1.2]