آنالیز هیدرودینامیکی سکوهای شناور با پایه های کششی

مهندس آرش افخمی[1]، دکتر محمدجواد کتابداری[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی دانشگاه صنعتی امیر کبیر
۲- استادیار دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی دانشگاه صنعتی امیر کبیر

چکیده

در میان سکوهای تطبیقی[1]، سکوهای شناور با پایه های کششی[2] رفتاری دوگانه از خود نشان می دهند. این سکوها در حرکات افقی کاملاً رفتاری تطبیقی داشته و مشابه سکوهای شناور رفتار می نمایند. از طرف دیگر در مقابل حرکات عمودی سختی بسیار زیادی از خود نشان داده و بیشتر همانند یک سازهٔ ثابت رفتار می کنند. در این مقاله به تحلیل دینامیکی رفتار این سکوها بر اثر امواج ساده و تعمیم آن به امواجی نامنظم با طیفی مشخص پر داخته شده است. تحلیل حاضر سه بعدی بوده و شامل ۶ درجهٔ آزادی (حرکت طولی، عرضی، عمودی، غلت، تاب و پیچ) می گردد. در این تحلیل درگیری[3] میان درجات آزادی مد نظر قرار گرفته و سختی ناشی از مهارها و نیروی درگ، به صورت غیر خطی مدل شده اند. نیروهای ناشی از امواج بر روی هر یک از المانهای سکو با کمک امواج ایری و معادلهٔ موریسن به صورت جداگانه محاسبه شده اند. اثر تفرق و تشعشع امواج ناچیز فرض شده و از رفتار دینامیکی خطوط مهار و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر آن چشم پوشی شده است. در نهایت معادلهٔ غیر خطی بدست آمده در حوزهٔ زمان و با کمک روش نیومارک- بتا حل شده است. برای مقایسهٔ درستی روش حل و پیاده سازی، پاسخهای ناشی از چند موج سادهٔ مشخص برای یک سکوی نمونه، مقایسه شده اند.

کلمات کلیدی: هیدرودینامیک، موریسن، سکوهای شناور، پایه های کششی، پاسخ دینامیکی، طیف پاسخ

HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF TENSION LEG PLATFORMS

Abstract

Among compliant offshore platforms, tension leg platforms (TLP) are referred to, as hybrid structures. This kind of platforms resemble to ordinary semi submersibles when their serge, sway and yaw motions are considered, since they are compliant whereas with respect to pith, roll and heave motions they respond more like a fixed platform rather than a floating body. This paper presents a method to analyze and evaluation of hydrodynamic forces of a regular simple wave on a TLP and a general solution to expand the method to be applied for a randomly changed water surface with a known spectrum e.g. pierson-Moskowitz. This analysis was made, using a 3D model with 6 coupled degree of freedoms. Stiffness of mooring system and drag force are assumed to non-linear and the effect of diffraction and radiation are neglected. Hydrodynamic forces and response were modeled, using modified Morison equation. The dynamic behavior of mooring lines and hydrodynamic forces on tensioners were neglected. The resulting equation was solved in time domain by Newmark-Beta algorithm.

Keywords: TLP, Morison, Hydrodynamics, Response Spectrum, Dynamic Response

1- Compliant 2- TLP 3- Coupling

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

مقدمه

با وابستگی روزافزون صنایع و دنیای مدرن به نفت و محصولات پتروشیمی حوزهٔ عملیات اکتشاف و استخراج این مادهٔ ارزشمند به پهنهٔ دریا ها و اقیانوسها نیز کشیده شده است. در این میان حتی اعماق دور از دسترس دریاها نیز مصون از این فعالیتها نبوده و امروزه حفاری و استخراج نفت تا ورای اعماق ۱۰۰۰ متر با رشد چشمگیری رو به افزایش است. اما اعماق بیشتر عملیاتی به معنی نیروهای بزرگتر، ممانهای بیشتر و درنتیجه استفادهٔ بیشتر از مواد و سنگینی سازه ها و در نهایت افزایش هزینهٔ تولید می باشد. از این رو امروزه تمایل زیادی به استفاده از انواع جدیدی از سازه های در یایی تحت عنوان سازه های تطبیقی در میان طراحان وبهره برداران ایجاد شده است.

در مجموع سازه های فراساحل را می توان به دو دستهٔ اصلی تقسیم نمود. سازه های ثابت و سازه های تطبیقی. در گروه اول که معمولاً در آبهای کم عمق کاربرد دارند، وزن سازه به کف دریا منتقل می‌گردد، اما در گروه دوم که معمولاً برای دریاهای عمیق بکار برده می‌شوند، ایدهٔ اصلی، کاهش مقاومت سازه در مقابل نیروهای خارجی بوسیلهٔ انعطاف پذیری سازه و استفاده از نیروی شناوری سازهٔ فوقانی می‌باشد.

همانطور که از نام سکوهای تطبیقی پیداست، این سازه ها نسبت به بارهای خارجی پاسخ بیشتری نشان میدهند تا جایی که سیستمهای مهاربندی ویا کنترل موقعیت دینامیکی، برای کنترل رفتار سکو لازم و ضروری است.

سکوهای شناور با پایه های تحت کشش

مانند سکوهای نیمه مغروق این سکوها تقریباً به حالت نیمه شناور مورد استفاده قرار میگیرند ، اما با کابلهایی تحت کشش به کف دریا متصل می‌شوند. استفاده از این مهارهای تحت کشش باعث بوجود آمدن ۱۵ تا ۲۵ درصد نیروی شناوری اضافه می گردد. نیروی به طرف بالای بیشتر از وزن، تضمینی برای تحت کشش بودن همیشگی مهارها. علاوه بر آن کابلهایی عمودی تحت کشش، عوامل مطمئنی برای نگه داشتن شناور، در موقعیتی مناسب نسبت به چاه می باشند. در حالت تعادل استاتیکی رابطهٔ زیر بین وزن، نیروی شناوری و کشش کابلها بر قرار است.

$$F_B = 4T_0 + W \qquad (۱)$$

ایدهٔ کلی، در این نوع سکوها کاهش مقاومت سازه در مقابل نیروهای خارجی بوسیلهٔ انعطاف پذیری سازه و استفاده از نیروی شناوری سازهٔ فوقانی می‌باشد. سکوهای با پایهٔ کششی در حقیقت یک سازه دوگانه[4] با شش درجهٔ آزادی می‌باشند. این سکوها نسبت به حرکات افقی و پیچش[5]، انعطاف پذیر بوده و مانند یک سازهٔ شناور عمل می‌نماید، در حالیکه نسبت به حرکت قائم، تاب[6] و غلت[7] سختی زیادی از خود نشان داده و همچون سازه ای ثابت رفتار می‌کنند. قسمت فوقانی این سکوها با استفاده از پایه‌های تحت کشش به پی‌هایی در بستر دریا متصل می‌شود. حرکت سازه در راستای قائم ، بوسیله کابل‌های تحت کشش، محدود شده و قابلیت شناوری آزاد ندارد، در حالیکه در جهات افقی مشابه یک سازهٔ شناور عمل می‌کند. بنابراین سکوهای فوق قابلیت حرکت در صفحهٔ افق را داشته ولی حرکت آنها در صفحهٔ قائم مقید شده است.

حرکات طولی،عرضی و چرخش در صفحه افق، به درجات آزادی نرم موسوم بوده دارای پریودی درحدود ۱۲۰-۵۰ ثانیه می‌باشند . حرکات قائم و چرخش حول محروهای طولی و عرضی درجات آزادی سخت به حساب آمده و پریود آنها در حدود ۴-۲ ثانیه می باشد [۱]. از آنجا که پریود حرکت قائم این سکوها به پریود امواج دریا، نزدیک می‌باشد، امکان وقوع تشدید در آن بیش از سایر درجات آزادی وجود دارد. در صورت وقوع تشدید در حرکت عمودی، امکان ایجاد پدیدهٔ خستگی در پایه‌های کششی به علت کم و زیاد شدن کشش مهارها وجود دارد. علاوه بر این در صورت نزدیکی پریودهای طبیعی حرکت قائم، تاب و غلت به یکدیگر، امکان بروز مشکلاتی در شرایط بهره‌برداری و عملکرد وجود دارد.

تأثیر تحریک قائم زلزله، بر این سکوها نسبت به تأثیرات افقی بیشتر می‌باشد. هر چند نتایج عددی

4- Hybrid 5- Paulling & Horton 6- Yaw 7- Pitch

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

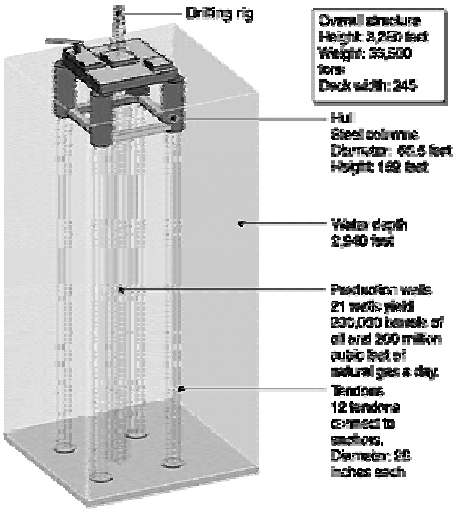
نشان دهندهٔ اهمیت پاسخ ناشی از زلزله بوده و در نتیجه باید بار وارد آمده بر اثر زمین لرزه، همانند سایر بارهای محیطی در طراحی سکوهای با پایهٔ کششی موردنظر قرار گیرد، اما طبیعت تطبیقی این سازه ها باعث خنثی شدن بخش عمدهٔ تحریک زلزله می‌شود. از آنجا که تاندونها این سکوها دارای انعطاف پذیری زیادی در حرکت افقی می‌باشند، تحریک افقی زلزله تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سکوها و تاندونها ندارد. لیکن این حرکات می‌تواند بر طراحی اتصال کروی بین تاندونها و کف دریا تأثیر بگذارد. همچنین پاسخ دینامیکی تاندونهای این سکوها با فرض وجود جریان تحت تحریک افقی زلزله، بررسی شده است. نتایج عددی نشان دهندهٔ آن است که افزایش سرعت جریان در پاسخ حرکت افقی تاندون تأثیر چندانی نداشته ولی باعث افزایش پاسخ حرکت قائم می‌شود. همچنین لحاظ کردن اثر اندرکنش باعث کاهش پاسخها می‌گردد [۱۱].

سکوهای با پایهٔ کششی را می‌توان به شکل های گوناگونی مانند مثلثی، مربعی ویا ستاره ای ساخت[۸] و [۹].

از سکوهای شناور با پایه های تحت کشش میتوان در دریاهایی با عمق بین ۱۲۰ تا ۱۵۰۰ متر استفاده نمود. از آنجا که با افزایش عمق در مورد سکوهای با پایهٔ کششی فقط هزینهٔ سیستم مهار و نصب آن افزایش می‌یابد، منحنی‌های هزینه برای سازه‌های فراساحلی دیگر رشد بیشتری با افزایش عمیق، در مقایسه با سکوهای با پایهٔ کششی دارند.

مزایای سکوهای با پایهٔ کششی عبارتند از [۸] :

- به علت طبیعت شناورشان، این سکوها ضربه کمتری از موج دریافت نموده و در نتیجه در شرایط دریای طوفانی، عملیاتی باقی می مانند .
- فرکانس‌های طبیعی در درجات آزادی نرم پایین‌تر از فرکانس امواج بوده و بنابراین امکان وقوع تشدید و اعمال بارهای شدید از بین می‌رود.
- هزینهٔ آن بویژه در آبهای عمیق، کمتر از سازه‌های ثابت می‌باشد .
- انتقال، نصب و از خارج نمودن آن از سرویس آسان می‌باشد.
- تغییر عمق عمدتاً تنها باعث تغییر در طول مهارها می‌شود.
- در نواحی لرزه خیز، نسبت به سکوهای ثابت دارای ایمنی بیشتری می‌باشد.
- به علت مقید بودن حرکت قائم ،کنترل و تعمیر و نگهداری رایزر، چاههای نفت و مهارها ، نسبتاً آسان است.
- مهمترین ویژگی آن در توانایی انتقال تشدیدها به خارج از محدودهٔ انرژی امواج می باشد.



شکل۱- سکوی حفاری Mars با پایه های تحت کشش

اولین کارهای مطالعاتی بر روی پاسخ این سازه ها نسبت به امواج دریا در اوایل دههٔ ۷۰ میلادی توسط پالینگ و هورتن[۸] و با فرض خطی بودن مسئله انجام پذیرفت. از آن پس بیشتر کارهای انجام شده با فرض خطی بودن نیروی پسار و سختی مهارها انجام پذیرفته. در این مقاله به تحلیل پاسخ دینامیکی این نوع سکوها بر اثر امواج نامنظم و با فرض غیر خطی بودن سختی مهارها و نیروی پسا بر اثر وابستگی به توان دوم سرعت پرداخته شده است. برای مدل سازی امواج از تئوری امواج خطی استفاده شده است.

8- Roll

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

طیف پیرسون وماسکوویچ [۵]

مشهورترین طیف انرژی امواج دریایی، طیف پیرسون وماسکوویچ [۹] باشد. این طیف در سال ۱۹۶۴ توسط این دو محقق و بر پایهٔ داده های واقعی جمع‌آوری شده توسط فیلیپس[۱۰] (۱۹۵۸) و کیتایی گوردسکی[۱۱] پیشنهاد شد.

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left[-B\left(\frac{g}{\omega U_w}\right)^4\right] \qquad (۲)$$

$$\alpha = 8.1\times10^{-3} \quad , \quad B = 0.74$$

که در آن U_W سرعت باد در ارتفاع ۱۹/۵ سطح آب بوده و α و B ضرایب ثابت می باشند. در این مدل شکل طیف تنها به سرعت باد بستگی دارد. بدون ورود به جزئیات می توان فرمول (۲) را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \qquad (۳)$$

$$\alpha = 5\left(\frac{\omega_p^2 \sigma_\zeta}{g}\right)^2$$

که در آن ω_p فرکانس حامل بیشترین انرژی و σ_ζ واریانس امواج می باشند. این رابطه در صورتی که $\alpha \approx$ ۰/۰۰۸ باشد، از نظر عددی با رابطهٔ اصلی *پیرسون وماسکوویچ* برابری خواهد نمود. طبق یافته های *هسلمن*[۱۲]، این طیف لزوماً نشان دهندهٔ موج کاملاً رشد یافته نبوده وتنها قسمتی از این طیف می تواند بیانگر چنین امواجی باشد.

در این تحلیل برای مدل نمودن امواج نامنظم دریا از این طیف استفاده شده است .

تحلیل بر اساس معادلهٔ موریسون

با توجه به کوچکی قطر المانهای استفاده شده در ساخت سکوهای نیمه مغروق، نسبت به ابعاد کلی سکو و همچنین طول امواج دریا، برای تحلیل حرکات سکوهای شناور، می‌توان از معادلهٔ موریسون استفاده نمود. اطلاعات اولیه موردنیاز برای محاسبهٔ حرکت سکو عبارتند از: جابجائی کل سکو، شعاعهای ژیراسیون و موقعیت مرکز ثقل. برای بدست آوردن نیروهای هیدرودینامیکی می‌توان بدنه سکو را به المانهایی کشیده ای تقسیم نمود که هر یک از این المانهایی با موقعیت ابتدا و انتهاء ، فرم سطح مقطع و ضرایب درگ و اینرسی مربوطه مشخص می‌شوند.

معادلهٔ کلی حرکت سکو را می‌توان به صورت ماتریسی زیر بیان نمود[۱] :

$$M\ddot{X} = \sum M_A(\ddot{\eta} - \ddot{X}) + \sum M_{FK}\ddot{\eta} + \sum B\,|\dot{\eta} - \dot{X}|(\dot{\eta} - \dot{X}) - KX - K_m X \qquad (۴)$$

دراین معادله X، $\dot{X}$ و $\ddot{X}$ بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب بوده و هریک دارای ۶ مؤلفه هستند، M ، M_A و M_{FK} ماتریس‌های ۶×۶ بوده و بیانگر ماتریس اینرسی، جرم اضافی و اینرسی ناشی از نیروی *فرود کریلوف* می باشند. مانند گذشته B ماتریس میرائی ناشی از نیروی درگ، K ماتریس سختی هیدرواستاتیکی و K_m ماتریس سختی حاصل از مهارهای سکو تعریف می گردند. سرعت و شتاب ذرات آب نیز با بردارهای $\dot{\eta}$ و $\ddot{\eta}$ نمایش داده شده‌اند و علائم Σ استفاده شده بیانگر لحاظ نمودن تغییرات $\dot{\eta}$ و $\ddot{\eta}$ در المانهای مختلف است. مقدار میرایی ناشی از ایجاد امواج، چندان قابل توجه نبوده و از معادله فوق حذف گردیده است.

معادله(۴) با استفاده از معادلهٔ *موریسون* برای نیروی حاصل از امواج نوشته شده است. معادلهٔ فوق را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$(M + M_A)\ddot{X} + B\,|\dot{X}|\dot{X} + (K + K_m)X = \sum (M_A + M_{FM})\ddot{\eta} + \sum B\,|\dot{\eta} - \dot{X}|(\dot{\eta} - \dot{X}) + B\,|\dot{X}|\dot{X} \qquad (۵)$$

جملهٔ $B\,|\dot{X}|\dot{X}$ به هر دو طرف معادله افزوده شده است تا فرم متداول برای سمت چپ معادله بدست آید. معادلهٔ فوق بخاطر وجود X در جملات مربوط به نیروی امواج مقداری پیچیده است، ولی دو خصوصیت امواج باعث ساده شدن آن می‌گردند، این دو خصوصیت عبارتند از: بزرگ بودن مقدار $\sum M_{FK}\ddot{\eta}$ و کاهش

9- Pierson & Moskowitz 10- Phillips 11- Kitaigorodskii 12- Hesselmann

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

سرعت ذرات آب با افزایش عمق که کوچک بودن عبارت $\sum B\,|\dot{\eta}-\dot{X}|(\dot{\eta}-\dot{X})+B\,|\dot{X}|\dot{X}$ را برای المانهای واقع در عمق زیاد نتیجه می‌دهند. با توجه به ساده‌سازی ، معادله (۵) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$(M+M_A)\ddot{X}+B\,|\dot{X}|\dot{X}+(K+K_m)X = \sum(M_A+M_{FM})\ddot{\eta}+\sum B\,|\dot{\eta}|\dot{\eta} \qquad (۶)$$

که در فرم فوق مقدار $\sum B\,|\dot{\eta}|\dot{\eta}$ جایگزین عبارت $\sum B\,|\dot{\eta}-\dot{X}|(\dot{\eta}-\dot{X})+B\,|\dot{X}|\dot{X}$ شده است.

نتایج بدست آمده بیانگر این مطلب است که نیروی پس‌ماند امواج که بر اثر ساده‌سازی لحاظ نگردیده است، چندان قابل توجه نبوده و حتی در فرکانس‌های بالا که نیروهای درگ بزرگترند، خطای حاصله قابل چشم‌پوشی است.

روش حل عددی نیومارک- β

در این روش تغییر مکانها و سرعتها در فاصله زمانی $i+1$ با بکارگیری معادلات زیر بدست می‌آیند:

(۷)

$$\dot{x}_{i+1}=\dot{x}_i+0.5\Delta t\left[\ddot{x}_i+\ddot{x}_{i+1}\right]$$
$$x_{i+1}=x_i+\Delta t\dot{x}_i+(0.5-\beta)(\Delta t)^2\ddot{x}_i+\beta(\Delta t)^2\ddot{x}_{i+1}$$

متغیر β، معنی فیزیکی خاصی داشته و برای $\beta=\frac{1}{4}$، معادله فوق، مشابه معادلهٔ متناظر آن در روش تفاوتهای مرکزی می‌گردد. در حالیکه برای $\beta=\frac{1}{6}$ معادله را برای تغییرات شتاب بصورت خطی در فاصله زمانی، سازگار می‌سازد [۱].

با نوشتن معادلهٔ حرکت برای فواصل زمانی $i-1$، i و $i+1$ معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$M\ddot{x}_{i-1}+C\dot{x}_{i-1}+Kx_{i-1}=F_{i-1} \qquad (۸)$$

$$M\ddot{x}_i+C\dot{x}_i+Kx_i=F_i \qquad (۹)$$

$$M\ddot{x}_{i+1}+C\dot{x}_{i+1}+Kx_{i+1}=F_{i+1} \qquad (۱۰)$$

پس از ضرب معادلات(۸) و(۱۰) در $\beta(\Delta t)^2$ و معادلهٔ (۹) در $(1-2\beta)(\Delta t)^2$ و سپس جمع نمودن آنها، نتیجه می‌شود:

$$(\Delta t)^2M\left[\begin{array}{l}\left\{\beta\ddot{x}_{i+1}+(\frac{1}{2}-\beta)\ddot{x}_i\right\}\\-\left\{\beta\ddot{x}_i+(\frac{1}{2}-\beta)\ddot{x}_{i-1}\right\}+\left\{\frac{1}{2}\ddot{x}_i+\frac{1}{2}\ddot{x}_{i-1}\right\}\end{array}\right]$$
$$+(\Delta t)^2C\left[\begin{array}{l}\left\{\frac{1}{2}\dot{x}_i\right\}+\left\{\frac{1}{2}\dot{x}_{i-1}\right\}\\+\left\{\beta(\dot{x}_{i+1}-\dot{x}_i)\right\}+\left\{(\frac{1}{2}-\beta)(\dot{x}_i-\dot{x}_{i-1})\right\}\end{array}\right] \qquad (۱۱)$$
$$+(\Delta t)^2K\left[\beta x_{i+1}+(1-2\beta)x_i+\beta x_{i-1}\right]$$
$$=(\Delta t)^2\left[\beta F_{i+1}+(1-2\beta)F_i+\beta F_{i-1}\right]$$

و با جایگزین نمودن روابط (۷) در معادله فوق،معادلهٔ (۱۲) حاصل می‌شود.

بنابراین تغییر مکانها در لحظه $i+1$ با استفاده از مقادیر آنها در لحظات i و $i-1$ قابل محاسبه هستند. تغییر مکان در لحظه $t=\Delta t$ یعنی x_1 به عنوان حالت خاص معادلهٔ (۱۲) بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$\left[M+\frac{1}{2}(\Delta t)C+\beta(\Delta t)^2K\right]x_{i+1}=$$
$$(\Delta t)^2\left[\beta F_{i+1}+(1-2\beta)F_i+\beta F_{i-1}\right]$$
$$+\left[2M-(\Delta t)^2(1-2\beta)K\right]x_i \qquad (۱۲)$$
$$-\left[M-\frac{1}{2}(\Delta t)C+\beta(\Delta t)^2K\right]x_{i-1}$$

$$\left[M+\frac{1}{2}(\Delta t)C+\beta(\Delta t)^2K\right]x_1$$
$$=(\Delta t)^2\beta F_1 \qquad (۱۳)$$
$$+(\Delta t)^2\left[(\frac{1}{2}-\beta)I+(\frac{1}{4}-\beta)\Delta tCM^{-1}\right]F_0$$

معادلات فوق با فرض $x_0=\dot{x}_0=0$ برای $t=0$ نتیجه شده است.

با مقایسه روش تفاوتهای مرکزی با روش نیومارک $-\beta$ مشاهده می‌شود که برای $\beta=0$ دو روش معادل می‌باشند .

همچنین می‌توان نشان داد که روش نیومارک $-\beta$ برای مقادیر $\beta>1/4$ همیشه از پایداری عددی برخوردار خواهد بود. برای $\beta<1/4$ نیز شرایط پایداری عددی به قرار زیر هستند[۱]:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

$$\frac{\Delta t}{T_n}=\begin{cases}0.318(\beta=0)\\0.450(\beta=\frac{1}{8})\\0.551(\beta=\frac{1}{6})\end{cases} \qquad (۱۴)$$

مدل سازی سکو

در این تحلیل، مدل به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده و دارای ۶ درجه آزادی می باشد. این درجات آزادی سه درجه جابجایی[۱۳] و سه چرخش حول محورهای مختصات[۱۴] می باشند. سعی بر آن بوده تا تاثیر درجات آزادی بر یکدیگر لحاظ گردد[۳]. باتوجه به هندسهٔ اکثر این نوع سکوها، با استفاده از زبان MATLAB، نرم افزار نوشته شد که مدلی استاندارد، شامل چهار ستون و چهار عضو افقی مغروق را مورد تحلیل قرار می دهد.

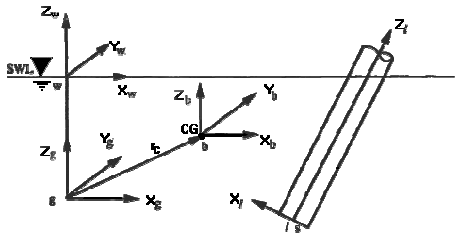
در این مدل سازی کابلهای تحت کشش سکو مورد مطالعه قرار نگرفته و کابلهای مهار بدون وزن و با رفتار ارتجاعی خطی فرض شده اند، علاوه بر آن فرض بر آن بوده که امواج آب مستقیماً تاثیری، مانند اعمال نیروی درگ، بر خطوط مهار ندارند. موج آب در این مدل خطی و دو بعدی در نظر گرفته شده و از روابط مربوط به امواج ایری در اعماق زیاد استفاده شده است. علی رغم مدل سازی دو بعدی امواج ،تاثیر جهت پیشروی برخورد امواج با سکو پیش بینی شده است. در این مدل سازی ضرایب درگ، اینرسی و جرم افزوده ثابت فرض شده اند.

سیستم مختصات

کل مدل سازی در یکی سیستم مختصات ثابت یا اینرسیال به نام سیستم جهانی یا g صورت می گیرد. مبداء این سیستم در محل مرکز جرم سکو قبل از اعمال هر نیروی خارجی واقع بوده و محورهای آن به موازات جهات اصلی سکو در این حالت در نظر گرفته می شوند.

سیستم مختصات اینرسیال دیگری نیز با نام w با مختصات افقی برابر با سیستم g در سطح آب تعریف شده است که سرعت و شتاب ذرات آب نسبت به آن محاسبه می شود.

سیستم مختصات b متصل به مرکز جرم سکو بوده و همراه آن حرکت و دوران می نماید. در مواردی که نیاز به انتگرال گیری برای یافتن حجم و مرکز حجم اعضاء بوده یک سیستم مختصات محلی به نام l برای هر یک از اعضاء در مرکز سطح مقطع پایینی آنها تعریف شده است [۱۸].



شکل ۲- تعریف سیستمهای مختصات[۱۲]

چرخش سکو[۱۳]

همانطور که گفته شد سیستم مختصات b می تواند همراه سکو حرکت کرده و با آن دوران یابد. بنابراین برای تعیین مختصات هر یک از نقاط واقع بر سکو لازم است در هر لحظه مختصات مرکز جرم سکو در سیستم g و دوران محورهای سیستم b مشخص باشد. برای این منظور سه زاویه ϕ,θ,ψ ، را به ترتیب برای دوران مدل محور $X,\ Y,\ Z$ تعریف می نماییم.

اگرمرکز جرم سکو نیز در هر لحظه مختصاتی مانند X_c, Y_c, Z_c داشته باشد، محل و نحوه قرارگیری سکو مشخص می شود. باید دقت کنیم که ترتیب دوران زوایای اویلری حائز اهمیت بوده و لزوماً باید به ترتیب ذکر شده در بالا بر سازه اعمال شوند .

رابطه برداری تبدیل هر نقطه مانند A به مختصات a_1, a_2, a_3 در سیستم b به سیستم g را می توان به صورت زیر نوشت :

$$\vec{r}_A=\begin{bmatrix}X_c\\Y_c\\Z_c\end{bmatrix}+[R]^T\begin{bmatrix}a_1\\a_2\\a_3\end{bmatrix} \qquad (۱۵)$$

که در آن :

13- (Serge, Sway, Heave) Translation 14- (Pitch, Roll, Yaw) Rotation

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

$$[R]=\begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\psi\cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\psi-\sin\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\phi\sin\theta+\cos\phi\cos\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \sin\theta\cos\phi\cos\psi+\sin\phi\sin\psi & \sin\theta\cos\phi\sin\psi-\sin\phi\cos\psi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

محاسبه بردار نیروهای خارجی وارد بر سکو و ماتریسهای ضرایب

همانطور که قبلاً گفته شد، برای سادگی در حل معادلهٔ موریسن، تمام ضرایبی که مستقیماً در جابجایی، سرعت و شتاب ضرب می شوند به یک سمت و تمامی ضرایبی که در سرعت و شتاب ذرات آب ضرب می گردند به سوی دیگر منتقل می شوند. مجموعهٔ این دسته ضرایب را تحت عنوان نیروهای خارجی شناخته و بصورت F نشان می دهیم .F در مدل حاضر با شش درجه آزادی، یک بردار با ۶ المان می باشد که سه درایه اول نیرو و سه درایه دوم ممانهای خارجی می باشند:

$$F=\begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z & M_x & M_y & M_z \end{bmatrix}^T \qquad (۱۶)$$

برای یافتن نیروهای خارجی ابتدا هر یک از مولفه های تشکیل دهندهٔ نیرو بر المانهای سکو پیدا شده و سپس با یکدیگر جمع می شوند. این مدل نیروی خارجی شامل چهار مولفه فرض شده است.

$$F=F_E+F_{DL}+F_{DB}+F_{BV} \qquad (۱۷)$$

که F_E نیروی اینرسی، F_{DL} نیروی درگ اعمال شده بر اطراف المانهای استوانه ای شکل، F_{DB} نیروی درگ اعمال شده بر کف ستونها، F_{BV} نیروی شناوری حاصل از پروفیل امواج بر المانهایی است که سطح آب را قطع می نمایند.

نیروی اینرسی سیال

نیروی اینرسی سیال برای جریانی عمود بر محور یک استوانه به صورت زیر تعریف می شود.

$$F_{FK}=C_M A_L \ddot{u} \qquad (۱۸)$$

با حفظ کلیه ویژگیها با تصویربردار آنی شتاب در مرکز یک سیلندر بر جهت عمود بر محور استوانه، نیروی اینرسی در

حالت سه بعدی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F_{FK}=C_M \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} M \ddot{\eta}\, dl \qquad (۱۹)$$

که در آن M ماتریس ۶×۶ ضرایب جرم افزوده، $\ddot{\eta}$ بردار شتابهای لحظه ای ذرات آب در نقاط مختلف محور استوانه و C_M ضریب اینرسی می باشند. دلیل انتگرال گیری در طول المان به خاطر تفاوت شتاب لحظه ای ذرات آب در نقاط مختلف یک استوانه با نحوهٔ قرارگیری دلخواه می باشد. از آنجا که عملاً در نرم افزار امکان انتگرال گیری از رابطه فوق وجود ندارد، برای محاسبهٔ نیروی اینرسی قسمت مغروق هر یک از استوانه ها به تکه هایی کوچک تقسیم شده و با محاسبهٔ شتاب در مرکز هر تکه و ضرب آن در ماتریس ضرایب جرم افزوده و جمع کلیهٔ نتایج، نیروی وارد بر هر استوانه محاسبه می شود. نحوه استخراج ماتریس M در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد. شتاب ذرات آب نیز به شکل زیر محاسبه می شود.

$$\ddot{\eta}=\begin{bmatrix} \ddot{u}\cos\beta & \ddot{u}\sin\beta & \ddot{w} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \qquad (۲۰)$$

که β در آن زاویه پیش روی امواج، $\ddot{u}$ شتاب افقی ذرات آب و $\ddot{w}$ شتاب عمودی ذرات آب می باشند. ضریب $C_M=C_A+1$ بوده و C_A ضریب جرم افزود ثابت و برابر ۱ در نظر گرفته شده است [۲].

نیروی درگ بر اطراف استوانه ها

نیروی درگ بر یک استوانه را پس از جداسازی متغییرهای درون قدر مطلق به صورت زیر محاسبه می نماییم .

$$F_{DL}=C_D \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} D\dot{\eta}|\dot{\eta}|\, dl \qquad (۲۱)$$

که در آن D ماتریس ۶×۶ ضرایب درگ و $\dot{\eta}$ بردار سرعتهای لحظه ای ذرات آب در نقاط مختلف محور استوانه و C_D ضریب درگ جریان در اطراف یک سیلندر می باشد. در اینجا نیز دلیل انتگرال گیری در طول المان، تفاوت سرعتهای لحظه ای ذرات آب در نقاط مختلف استوانه است.

همانند قسمت قبل برای محاسبه این انتگرال قسمت مغروق هر یک از استوانه ها به تکه هایی کوچک تقسیم شده و با محاسبهٔ سرعت ذرات در مرکز هر تکه و ضرب آن در ماتریس ضرایب درگ و جمع کلیه نتایج، نیروی وارد بر هر استوانه محاسبه می شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

ماتریس سرعتها مشابه ماتریس شتابها می باشد. در اینجا برای سادگی بیشتر وبا توجه به برخی کارهای گذشته C_D ثابت و برابر ۱/۲ فرض شده است [۲]، [۸] و [۹].

نیروی درگ بر کف ستونها

حرکات عمودی و غلتشهای طولی و عرضی سکوها باعث به وجود آمدن نیروهای درگ قابل توجهی به خصوص بر سطوح جانبی عناصر عرضی می گردند. علاوه بر آن با توجه به قطر قابل توجه ستونها می‌توان وجود نیروهای درگ بزرگی را بر روی کف ستونها پیش بینی نمود. اگر در این شرایط هم مکانیزم اعمال نیرو را مشابه با نحوهٔ ایجاد درگ بر روی جدارهٔ سیلندرها فرض کنیم، کل نیروی درگ بر اثر حرکت سکو و سرعت ذرات آب به صورت زیر نوشته می شود: [۹]

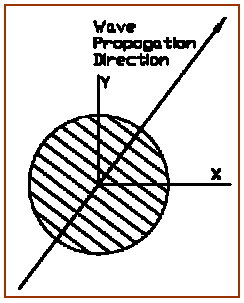
$$F_{DBT} = 0.5\rho C_D \frac{\pi D_c^2}{4} T(\dot{\eta}-\dot{x})|\dot{\eta}-\dot{x}| \qquad (۲۲)$$

که در آن F_{DBT} کل نیروی درگ وارد آمده بر کف یک ستون ، C_D ضریب درگ یک صفحهٔ تخت D_C قطر ستون ، $\dot{\eta}$ سرعت لحظه ای ذرات آب در هر نقطه، $\dot{x}$ سرعت سازه و T ماتریس انتقال نیرو در جهت محور ستون می باشند. مطابق روش جداسازی سرعتها که قبلاً گفته شد و انتقال جملات دارای $\dot{x}$ به سمت چپ معادله و چشم پوشی از خطای باقی مانده، بر اثر جدایی، نیروی درگ F_{DB} به صورت زیر محاسبه می شود.

$$A_D = \frac{1}{8}\rho\pi D_c^2 \text{ و } F_{DB} = C_D T \int_S A_D \dot{\eta}|\dot{\eta}|ds \qquad (۲۳)$$

از آنجا که انتظار می رود سکوهای با پایهٔ کششی حرکات بزرگی را در درجات آزادی غلتش طولی و عرضی از خود نشان ندهند، برای محاسبهٔ اندازهٔ نیروهای درگ بر کف ستونها، قاعدهٔ ستونها در هر حالت افقی فرض شد. با اعمال این فرض و با توجه به ثابت بودن سرعت ذرات آب بر یک خط عمود بر جهت پیشروی موج و در یک عمق ثابت ، برای محاسبهٔ انتگرال فوق ، سطح پایینی هر ستون به نوارهای نازکی، عمود بر جهت پیشروی موج تقسیم شده و سپس سرعت عمودی ذرات آب در وسط هر یک محاسبه می شود.

مقدار انتگرال مورد نظر با جمع تمامی مقادیر بدست آمده از ضرب سرعتهای محاسبه شده در مساحت نوارها بدست می آید. حاصل محاسبات فوق، اندازهٔ نیروی درگی می باشد که باید به موازات محور ستون، بر کف سیلندر اعمال شود.



شکل ۳- المان بندی کف ستونها

نیروی شناوری متغیر بر کف ستونها [۹]

علاوه بر نیروی درگ، بر کف ستونها نیروی دیگری نیز ناشی از فشار دینامیکی ناشی از امواج اعمال می شود. فشار دینامیکی امواج در عمق z به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_D = \rho g \eta_B K_P(z) \qquad (۲۴)$$

که در آن ρ چگالی آب، η_B ارتفاع پروفیل موج در بالای نقطهٔ مورد نظر نسبت به خط آب ساکن و $K_P(z)$ فاکتور پاسخ فشار در عمق z می باشد. $K_P(z)$ برای آبهای عمیق به صورت زیر تعریف می گردد:

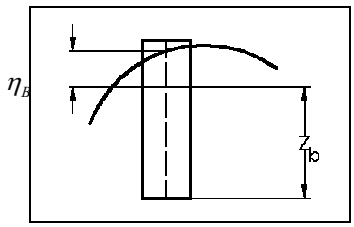
$$K_P(z) = \exp(2\pi\frac{z}{\lambda}) \qquad (۲۵)$$

که z عمق آب (عددی همیشه منفی) و λ. طول موج می باشند. نیروی شناوری متغیر بر کف ستونها را می توان با کمک رابطهٔ زیر محاسبه نمود [۹]:

$$F_{BV} = T\int_S P_D ds = T\rho g\int_S \eta_B K_P(z) ds \qquad (۲۶)$$

که T ماتریس انتقال نیرو در جهت محور ستون می باشد. در اینجا نیز نیروی ناشی از فشار موج بر کف ستونها را با فرض افقی بودن صفحهٔ زیرین ستونها و المان بندی آن مشابه قسمت قبل، محاسبه می نماییم.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]



شکل ۴- مدل سازی فشار دینامیکی بر کف ستونها

تعیین ماتریس جرم و جرم افزوده

از آنجا که مختصات مورد استفاده مختصات اصلی سکو هستند، ماتریس جرم فیزیکی M یک ماتریس قطری خواهد بود [۱]. جرم اضافی نیز با جمع کلیه جرمهای اضافی المانها بدست می‌آید.

در حالت کلی، برای المانهای استوانه‌ای می‌توان فرض نمود که فقط مؤلفه عمودی شتاب، باعث ایجاد جرم اضافی می‌گردد، بنابراین با معلوم بودن مختصات دو انتهای المان، قطر و ضریب جرم اضافی، ماتریس جرم اضافی تعیین می‌شود.

با تعریف پارامتر $K_1 = \rho C_m \frac{\pi d^2}{4}$، جرم اضافی ناشی از شتابهای واحد در جهت محورهای Ox، Oy و Oz عبارتست از:

(۲۷)

$$-m_{ij} = \begin{bmatrix} -K_1\sin^2\alpha & K_1\cos\alpha\cos\beta & K_1\cos\alpha\cos\gamma \\ K_1\cos\alpha\cos\beta & -K_1\sin^2\alpha & K_1\cos\alpha\cos\gamma \\ K_1\cos\alpha\cos\gamma & K_1\cos\alpha\cos\gamma & K_1\sin\gamma \end{bmatrix}$$

که در آن $\cos\alpha$، $\cos\beta$ و $\cos\gamma$ کسینوسهای هادی محور طولی استوانه می باشند.

ماتریس فوق تنها بخشی از ماتریس کل را نمایش می‌دهد. برای $i=۴$ تا $i=۶$ و $j=۱$ تا $j=۳$ مؤلفه‌ها ممانهای ناشی از جرم اضافه حول Ox، Oy و Oz هستند. این ممانها را می‌توان با انتگرالگیری در امتداد طول المان بدست آورد. به عنوان مثال m_{41} به صورت زیر محاسبه می شود:

$$m_{41} = m_{31} y_m - m_{21} z_m \qquad (۲۸)$$

مؤلفه‌های m_{ij} برای $i=۱$ تا $i=۶$ و $j=۴$ تا $j=۶$ ناشی از شتاب دورانی حول محورهای Ox، Oy و Oz است. مابقی مؤلفه‌های ماتریس با توجه به خاصیت تقارن بدست می‌آیند.

تعیین ماتریس درگ

ماتریس میرایی B به طریقی مشابه با محاسبهٔ ماتریس جرم اضافی قابل محاسبه است. ماتریس فوق مجموع ماتریس‌های میرائی برای تک‌تک المانها می باشد. فرض می کنیم که تنها مؤلفهٔ عمودی نیروی درگ بر هر المان قابل توجه است. فرم کلی نیروی درگ بصورت زیر است:

$$F_D = b_{ij} |\dot{x}_j| \dot{x}_j \qquad (۲۹)$$

تعیین ماتریس سختی

ماتریس سختی نیز مانند ماتریسهای جرم افزوده و درگ یا دمپینگ ماتریسی ۶×۶ بوده که با ضرب شدن در بردار ۶ عضوی مختصات سکو نیروها و ممانهای ناشی از جابجایی سازه را در معادله ایجاد می نماید.

یک درایه مانند k_{ij} از ماتریس سختی، بیانگر نیروی ایجاد شده در درجهٔ آزادی iام بر اثر پاسخ سازه به جابجایی سکو در درجه آزادی jام و مهار حرکت در بقیهٔ درجات آزادی می‌باشد

در اینجا باید خاطر نشان شویم که درایه های ماتریسی سختی به دلیل وجود جملاتی با سینوسها، کسینوسها و توانهای جابجایی غیر خطی بوده و به دلیل وجود این ترمها و همچنین تغییرات کشش خطوط مهار سکو، ماتریس سختی نیز مانند دو ماتریس قبلی به پاسخ سازه وابسته است[۱۵]. ماتریس سختی در واقع حاصل جمع دو ماتریس سختی ناشی از خطوط مهار و نیروی شناوری می باشد. فرم کلی ماتریس سختی به شکل زیر است.

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & K_{15} & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & K_{24} & 0 & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ 0 & K_{42} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ K_{51} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \qquad (۳۰)$$

برای انجام محاسبات مدول مقطع هر یک از خطوط مهار را به شکل زیر تعریف می نماییم.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

$$S_M = \frac{AE}{L_o} \qquad (۳۱)$$

که در آن A سطح مقطع کابل، E مدول یانگ (برابر با GPa ۲۰۰ برای فولاد) و L_o طول اولیهٔ کابل می باشند . کشش اولیهٔ کابل رانیز با T_o نمایش می دهیم .

با این تعاریف، برای محاسبهٔ k_{i1}، مطابق شکل ۵، جابجایی دلخواه x_1 را به سکو می‌دهیم. اگر افزایش کشش هر خط مهار ، ΔT_1، را بر حسب مشخصات اولیهٔ کابل و طول نهایی آن L_1 محاسبه کنیم .

$$\Delta T_1 = (L_1 - L_o)S_M \quad \text{و} \quad L_1 = \sqrt{x_1^2 + L_o^2} \qquad (۳۲)$$

با نوشتن تعادل نیروها در جهت x می توان k_{11} را محاسبه نماییم.

$$\left.\begin{aligned} K_{11}x_1 &= 4(T_o + \Delta T_1)\sin\gamma_x \\ \sin\gamma_x &= \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + L_o^2}} \end{aligned}\right\} \qquad (۳۳)$$

$$\Rightarrow k_{11} = \frac{4(T_o + \Delta T_1)}{\sqrt{x_1^2 + L_o^2}}$$

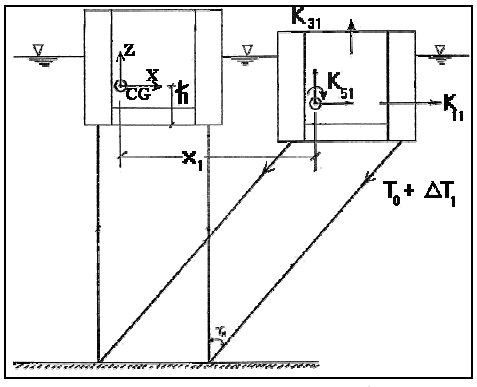
به همین ترتیب k_{51}, k_{31} نیز محاسبه می شوند.

$$k_{31} = 4\frac{T_o(\cos\gamma_x - 1) + \Delta T_1 \cos\gamma_x}{x_1} \qquad (۳۴)$$

$$\cos\gamma_x = \frac{L_o}{\sqrt{x_1^2 + L_o^2}}$$

$$k_{51} = -k_{11}\bar{h} \qquad (۳۵)$$

که $\bar{h}$ فاصلهٔ عمودی مرکز جرم با محل اتصال خطوط مهار کف ستونها می باشد.



شکل۵- جابجایی طولی سکو

با توجه به تقارن طولی و عرضی سکو، مشابه با همین محاسبات را می توان برای جابجایی به اندازهٔ y_1 در درجهٔ آزادی دوم یا محور عرضی تکرار نمود.

$$k_{22} = \frac{4(T_o + \Delta T_1)}{\sqrt{y_1^2 + L_o^2}} \qquad (۳۶)$$

$$k_{32} = 4\frac{T_o(\cos\gamma_y - 1) + \Delta T_1 \cos\gamma_y}{y_1} \qquad (۳۷)$$

$$\cos\gamma_y = \frac{L_o}{\sqrt{y_1^2 + L_o^2}}$$

$$k_{42} = -k_{22}\bar{h} \qquad (۳۸)$$

بدون ورود به جزئیات درایه های دیگر ماتریس سختی به مطابق روابط (۳۹) محاسبه می شوند. در روابط بالا D_C قطر ستونها، ψ, θ, ϕ به ترتیب زوایای غلت و تاب و پیچ، e فاصلهٔ افقی مرکز بویانسی سکو در حالت دوران یافته با مرکز جرم سکوی B_2بویانسی جدید سکو می‌باشند.

$$\left.\begin{aligned} k_{24} &= \frac{2\sin\beta(T_o + \Delta T_1)}{|\phi|} \\ k_{34} &= \frac{(2\cos\beta - 4)T_o + 2\cos\beta\Delta T_1}{\phi} \\ k_{44} &= \frac{2r_{2z}(T_o + \Delta T_1)\sin(\beta + \alpha + |\phi|) + B_2 e}{|\phi|} \\ k_{33} &= 4S_M + \frac{3}{4}g\,\pi e D_c^2 \\ k_{15} &= \frac{2\sin\beta(T_o + \Delta T_1)}{|\theta|} \\ k_{35} &= \frac{(2\cos\beta - 4)T_o + 2\cos\beta\Delta T_1}{\theta} \\ k_{55} &= \frac{2r_{xz}(T_o + \Delta T_1)\sin(\beta + \alpha + |\theta|) + \beta_2 e}{|\theta|} \\ k_{36} &= 4\frac{T_o(L_o - L_1) + \Delta T_1 L_o}{L_1\psi} \\ k_{66} &= 8\frac{(T_o + \Delta T_1)\gamma_{xr}\sin(\frac{\psi}{2})\cos(\frac{\psi}{2})}{L_1\psi} \end{aligned}\right\} \qquad (۳۹)$$

$r_{\xi\zeta}$ نیز به صورت فاصلهٔ مرکز جرم با محل اتصال کابل به کف ستونها در صفحهٔ $\xi O\zeta$ متعلق به دستگاه مختصات متصل به سکو تعریف می شود. زاویهٔ α، زاویهٔ بین محور یک ستون وخط بین مرکز کف ستون و مرکز جرم سکو می باشد. زاویهٔ β نیز زاویهٔ میان

15- Response-dependent

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

راستای عمودی و خطوط مهار تحت کشش بر اثر غلتش سکو می باشد.

جرم افزودهٔ کف ستونها در حرکت عمودی

برای یک سیلندر عمودی با حرکت رفت و برگشتی، جرم افزودهٔ سطح مقطع استوانه به صورت تجربی اندازه گیری شده و به شکل زیر تعریف می گردد(چاکرابارتی و هانا ۱۹۹۰) [۹].

$$M_h = \frac{2}{3}\rho\pi\left(\frac{D_c}{2}\right)^3 \qquad (۴۰)$$

در این مدل M_h مستقیماً با درایهٔ M_{33} جمع می شود.

نیروی درگ اعمال شده بر کف ستونها بر اثر حرکت عمودی

در بخش ۶-۳-۳ کل نیروی درگ وارد شده بر کف یک ستون بر اثر حرکت عمودی نشان داده شد. در آنجا سرعتهای ذرات آب و سکو از یکدیگر جدا شده و درگ حاصل از سرعت ذرات آب با چشم پوشی از باقیماندهٔ جداسازی، مورد مطالعه قرار گرفت. درست چپ معادله نیز همانند قسمت قبل می توان F_{DB} را محاسبه کرده و مستقیماً به عناصر شرکت کننده در دستگاه معادلات افزود.

روش حل استفاده شده برای مدل حاضر

برای حل مدل ساخته شده از روش نیومارک - β استفاده شد. اما برای اجتناب از برخورد با معادلات جبری درجه ۲ پس از بسط مشتقات جابجایی، به دلیل وجود جملات شامل $\ddot{x}^2$ در معادلهٔ دیفرانسیل، بردار $\ddot{x}^2$ به صورت زیر در نظر گرفته شد.

$$\left[\ddot{x}^2\right]_{6\times1} = \left[D\ddot{x}\right]_{6\times6}\left[\ddot{x}\right]_{6\times1} \qquad (۴۱)$$

ماتریس $[D\ddot{x}]$، یک ماتریس ۶×۶ بوده که مقادیر بردار $[\ddot{x}]$ بر روی درایه‌های قطر اصلی آن گذاشته شده اند .با کمک این تعریف و حدس یک مقدار اولیه در هر گام زمانی برای ماتریس $[D\ddot{x}]$، معادله حل شده و سپس برای تصحیح هر چه بهتر جوابهای بدست آمده مقدار بدست آمده برای بردار $\ddot{x}$ در ماتریس $D\ddot{x}$ جایگزین می گردد. در هر گام زمانی این مرحلهٔ سعی و خطا تا جایی که خطای محاسبه کمتر از مقدار ε مورد نظر شود ادامه یافته و پس از حصول جواب مورد نظر به گام بعدی می رویم. حدس اولیه برای هر گام زمانی بردار سرعت گام قبلی بوده و حدس اولیهٔ گام نخست بردار سرعت صفر می باشد. با این روش ملاحظه شد که تقریباً پس از ۱۰ تا ۲۰ جایگذاری در هر گام زمانی می توان به خطایی کمتر از ۰/۰۵ رسید. برای یافتن دامنهٔ حرکات سکو در هر فرکانس موج، لازم است آنقدر در زمان حرکت کنیم تا دامنهٔ حرکات به مقدار ثابت برسد (در صورتی که شرایط تشدید رخ ندهد). ملاحظه شد که تقریباً پس از ۲۰ تا ۵۰ سیکل کامل حرکت سکو، می توان دامنهٔ حرکات را ثابت در نظر گرفت.

از آنجا که معادله دیفرانسیل بدست آمده غیر خطی می باشد، نمی توان برای یافتن جابجایی سکو بر اثر امواج نامنظم، از اصل جمع آثار پاسخ به امواج سادهٔ متعدد، استفاده نمود . برای یافتن پاسخ سکو به امواج نا منظم، ابتدا می توان طیف موج مورد نظر را به امواج سینوسی تشکیل دهندهٔ آن تجزیه نموده و سپس در هر مرحله، برای یافتن بردار نیروهای خارجی، از جمع آثار فشارها، سرعتها و شتابهای تمامی مؤلفه های موج استفاده کرد. پاسخ بدست آمده، جابجایی سکو بر اثر امواجی نامنظم خواهد بود که می توان آنرا با کمک تابع انتقال فوریهٔ سریع[۱۶] به حوزهٔ فرکانس برده و طیف حرکت را استخراج نمود. باید دقت نمود که با توجه به غیر خطی بودن این سیستم، تبدیل مجدد طیف حاصل به حوزهٔ زمان اشتباه بوده و نمی توان این طیف را به حوزهٔ زمان تبدیل نمود.

نتایج اجرای مدل بر یک سکوی نمونه

سکوی نمونه

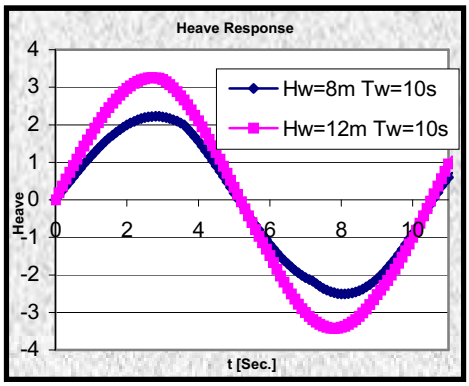
مشخصات سکوی نمونهٔ بررسی شده در جدول ۱ خلاصه شده است :

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

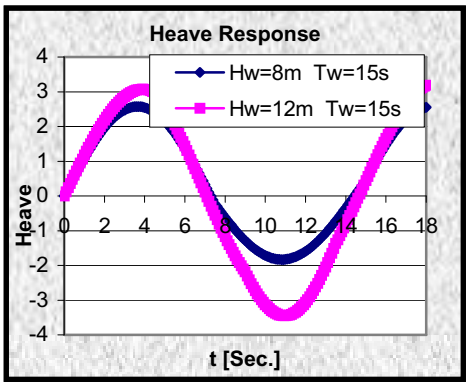
جدول ۱: مشخصات سکوی نمونه

$W\ (KN)$	۳۳۰۰۰۰	$A/E\ (KN/m)$	۳۴۰۰۰
$F_B\ (KN)$	۴۶۵۵۰۰	$P_D\ (m)$	۷۵/۶۶
$T_o\ (KN)$	۱۳۵۰۰	$D = D_c\ (m)$	۱۶/۳۹
$L_o\ (m)$	۲۶۹	I_{xx}	۳۵/۱
$d\ (m)$	۳۰۰	I_{yy}	۳۵/۱
$KG\ (m)$	۲۷/۴۷	I_{zz}	۴۲/۴

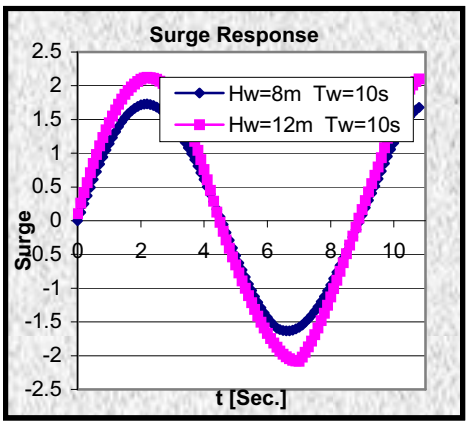
نتایج تحلیل مدل در حوزهٔ زمان برای دو ارتفاع موج ثابت با دو پریود برای درجات آزادی حرکت طولی و عمودی ارائه شده اند. زاویهٔ پیشروی موج صفر درجه بوده است. در ادامه پاسخ طیفی سکو به امواج ۱۰ متری برای درجات آزادی حرکت طولی، عمودی وغلتش عرضی یا تاب، ارائه شده اند.



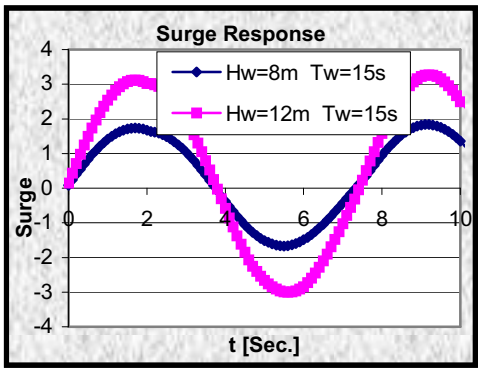
شکل ۶- پاسخ وابستهٔ حرکت قائم با ارتفاع موج ۸ و ۱۲ متر و پریود ۱۰ ثانیه و زاویه بر خورد ۰ درجه



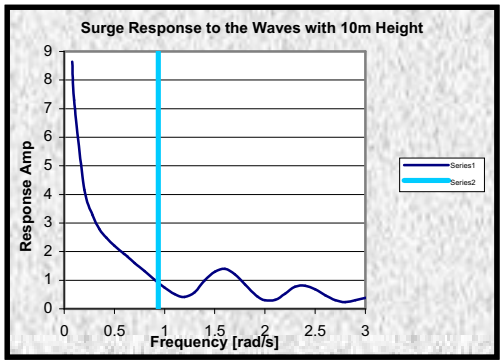
شکل ۷- پاسخ وابستهٔ حرکت قائم با ارتفاع موج ۸ و ۱۲ متر و پریود ۱۵ ثانیه و زاویه بر خورد ۰ درجه



شکل ۸- پاسخ وابستهٔ حرکت طولی با ارتفاع موج ۸ و ۱۲ متر و پریود ۱۰ ثانیه و زاویه بر خورد ۰ درجه



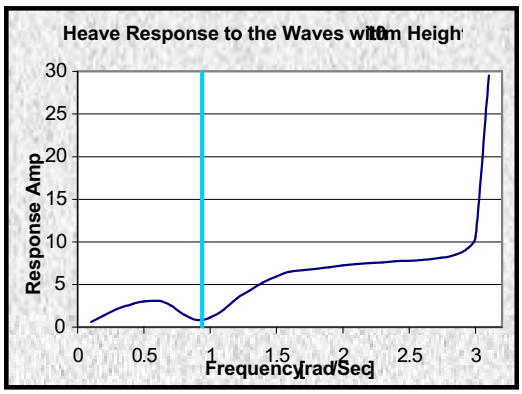
شکل ۹- پاسخ وابستهٔ حرکت طولی با ارتفاع موج ۸ و ۱۲ متر و پریود ۱۵ ثانیه و زاویه بر خورد ۰ درجه



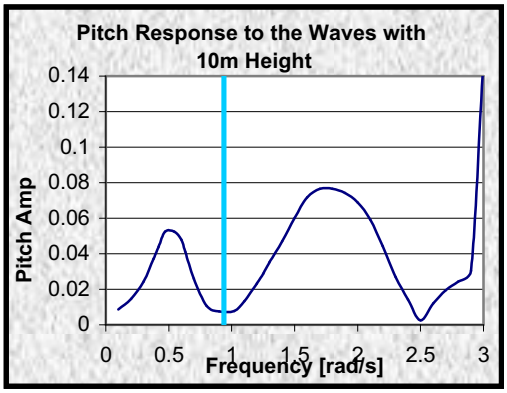
شکل ۱۰- دامنهٔ پاسخ حرکت طولی ، به امواجی با ارتفاع ۱۰ متر و زاویه بر خورد ۰ درجه

15- FFT

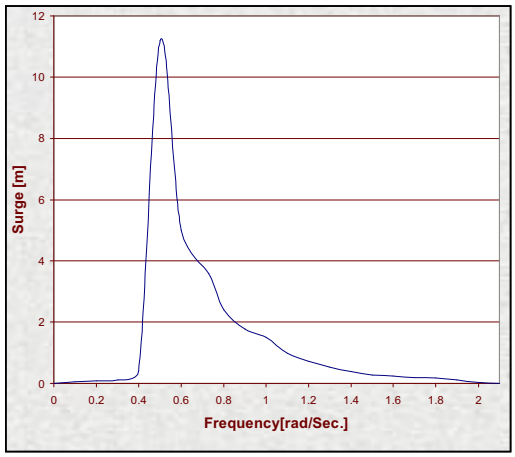
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]



شکل ۱۱- دامنهٔ پاسخ حرکت قائم ، به امواجی با ارتفاع ۱۰ متر و زاویه بر خورد ۰ درجه



شکل ۱۲- دامنهٔ پاسخ حرکت غلتش عرضی ، به امواجی با ارتفاع ۱۰ متر و زاویه بر خورد ۰ درجه



شکل۱۳- پاسخ حرکت افقی سکو به طیف P-M با ω_P =۰/۷

با توجه به آنکه نسبت ارتفاع به طول موج امواج آب از مقداری معین نمی تواند بیشتر باشد، با بررسی شرایط شکست امواج، داریم :

$$\frac{H}{\lambda} < \frac{1}{7} \Rightarrow \sqrt{\frac{14\pi H}{g}} < T \quad \text{or} \quad \sqrt{\frac{2\pi g}{7H}} > \omega$$
$$\xrightarrow{H=10m} T > 6.7 \quad \text{or} \quad \omega < 0.94$$

این مقدار حداکثر فرکانس فیزیکی ممکن برای امواجی با ارتفاع ۱۰ متر می باشد، که با یک خط عمودی مشخص شده است.

نتیجه گیری

در بخشهای گذشته به روش تحلیل حرکات سکوهای شناور با پایه های کششی، با کمک معادلهٔ موریسن و بدون خطی سازی نیروی درگ پرداخته شد. مقایسهٔ نتایج این تحلیل با نتایج مدلسازی مشابه دیگر که توسط Chandrasekaran و Jain [۸] انجام شده تطابق خوبی نشان داده و تفاوتهای موجود را باید به دلیل در نظر گرفته شدن نیروی جرم افزوده، درگ و فشار دینامیکی بر کف ستونها دانست که در مرجع[۸] در نظر گرفته نشده اند. از طرف دیگر در این تحلیل نیروی درگ خطی سازی نشده و روش مدل سازی سختی، در آن دقیقتر می باشد. در نهایت الگوریتم حل عددی در روش حاضر کمی با کارهای مشابه تفاوت دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]

منابع

1. Patel, Minoo H., "COMPLIANT OFFSHORE STRUCTURES", Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1991.
2. Chakrabarti, S. K., "HYDRODYNAMICS OF OFFSHORE STRUCTURES", Computational Mechanics Publication, GB, 1987.
3. Paz, Mario, "STRUCTURAL DYNAMICS: THEORY AND COMPUTATION", USA, 1980.
4. Thomson, William T., "THEORY OF VIBRATION WITH APPLICATIONS", Unwin Hyman, London , 1988 .
5. Massel ,Stanislaw R. , "OCEAN SURFACE WAVES : THEIR PHYSICS AND PREDICTION", World Scientific , USA , 1996 .
6. Clauss G. ,Lehmann E. , "OFFSHORE STRUCTURES Vol. 1" , Springer-Verlag ,1991 .
7. Bar-avi P. ,Benaroya H. , "NONLINEAR DYNAMICS IF COMPLIANT OFFSHORE STRUCTURES" , Swets & Zeitlinger ,1997 .
8. Chandrasekaran S. , Jain A.K. , "DYNAMIC BEHAVIOR OF SQUARE AND TRIANGULAR OFFSHORE TENSION LEG PLATFORMS UNDER REGULAR WAVE LOADS" , Ocean Engineering , 29, pp 279-313 ,2002
9. Bhattacharyya S.K. , Sreekumar S. ,Idichandy V.G , "COUPLED DYNAMICS OF SEASTAR MINI TENSION LEG PLATFORM" , Ocean Engineering , 30, pp 709-737 ,2003
10. Gomathinayagam S. , Vendhan C.P. , Shanmugasundaram J. , "DYNAMIC EFFECTS OF WIND LOADS ON OFFSHORE DECK STRUCTURES" , Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 84, pp 345-367 ,2000
11. US. army corps of engineers , "COSTAL ENGINEERING MANUAL" , Department of defense , em 1110-2-1100 ,Washington D.C ,2002
12. Chitrapu A.S. , Ertekin R.C. , "TIME-DOMAIN SIMULATION OF LARGE AMPLITUDE RESPONSE OF FLOATING PLATFORMS" , Ocean Engineering , 22 , pp 367-385 ,1995
13. Mays , Timothy Wayne "THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF MOORED CYLINDERS USED AS BREAKWATERS" , Virginia Polytechnic Institute and State ,1997
14. Billings A.S , Stansby P.K. , Swain A.K. , "ACCURATE PREDICTION OF NON-LINEAR WAVE FORCES: PART II (RESPONDING CYLINDER)" , University of Salford , UK ,1997

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.6.6]