

## آنالیز هیدرودینامیکی سکوهای شناور با پایه های کششی

مهندس آرش افخمی<sup>۱</sup>، دکتر محمدجواد کتابداری<sup>۲</sup>

- 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<sup>۱</sup>، سکوهای شناور با پایه های کششی<sup>۲</sup> 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 سازه ثابت رفتار می کنند. در این مقاله به تحلیل دینامیکی رفتار این سکوها بر اثر امواج ساده و تعیین آن به امواجی نامنظم با طیفی مشخص پرداخته شده است. تحلیل حاضر سه بعدی بوده و شامل ۶ درجه آزادی (حرکت طولی، عرضی، عمودی، غلت، تاب و پیچ) می گردد. در این تحلیل درگیری<sup>۳</sup> میان درجات آزادی مدنظر 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 معادله 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 معادله غیر خطی بدست آمده در حوزه زمان و با کمک روش نیومارک- بتا حل شده است. برای مقایسه درستی روش حل و پیاده سازی، پاسخهای ناشی از چند موج ساده 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 surge, sway and yaw motions are considered, since they are compliant whereas with respect to pitch, 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

## مقدمه

با واستگی روزافزون صنایع و دنیای مدرن به نفت و محصولات پتروشیمی حوزه عملیات اکتشاف و استخراج این ماده ارزشمند به پهنه دریاها و اقیانوسها نیز کشیده شده است. در این میان حتی اعمق دور از دسترس دریاهای نیز مصون از این فعالیتها نبوده و امروزه حفاری و استخراج نفت تا ورای اعمق ۱۰۰۰ متر با رشد چشمگیری رو به افزایش است. اما اعمق بیشتر عملیاتی به معنی نیروهای بزرگتر، ممانهای بیشتر و درنتیجه استفاده بیشتر از مواد و سنگینی سازه ها و در نهایت افزایش هزینه تولید می باشد. از این رو امروزه تمایل زیادی به استفاده از انواع جدیدی از سازه های دریایی تحت عنوان سازه های تطبیقی در میان طراحان و بهره برداران ایجاد شده است.

در مجموع سازه های فراساحل را می توان به دو دسته 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 می گردد، اما در گروه دوم که معمولاً برای دریاهای عمیق بکار برده می شوند، ایده اصلی، کاهش مقاومت سازه در مقابل نیروهای خارجی بوسیله انعطاف پذیری سازه و استفاده از نیروی شناوری سازه فوقانی می باشد.

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

## سکوهای شناور با پایه های تحت کشش

مانند سکوهای نیمه مغروف این سکوها تقریباً به حالت نیمه شناور مورد استفاده قرار میگیرند، اما با کابلهایی تحت کشش به کف دریا متصل می شوند. 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 حالت تعادل استاتیکی رابطه زیر بین وزن، نیروی شناوری و کشش کابلها برقرار است.

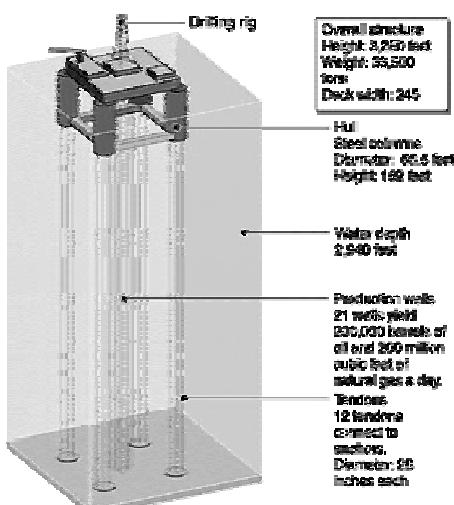
$$(1) \quad F_B = 4T_0 + W$$

ایده کلی، در این نوع سکوها کاهش مقاومت سازه در مقابل نیروهای خارجی بوسیله انعطاف پذیری سازه و استفاده از نیروی شناوری سازه فوقانی می باشد. سکوهای با پایه کششی در حقیقت یک سازه دوگانه<sup>۴</sup> با شش درجه آزادی می باشند. این سکوها نسبت به حرکات افقی و پیچش<sup>۵</sup>، انعطاف پذیر بوده و مانند یک سازه شناور عمل می نماید، در حالیکه نسبت به حرکت قائم، تاب<sup>۶</sup> و غلت<sup>۷</sup> سختی زیادی از خود نشان داده و همچون سازه ای ثابت رفتار می کنند. قسمت فوقانی این سکوها با استفاده از پایه های تحت کشش به پی هایی در بستر دریا متصل می شود. حرکت سازه در راستای قائم، بوسیله کابل های تحت کشش، محدود شده و قابلیت شناوری آزاد ندارد، در حالیکه در جهات افقی مشابه یک سازه شناور عمل می کند. بنابراین سکوهای فوق قابلیت حرکت در صفحه افق را داشته ولی حرکت آنها در صفحه قائم محدود شده است.

حرکات طولی، عرضی و چرخش در صفحه افق، به درجات آزادی نرم موسوم بوده دارای پریودی در حدود ۵۰-۱۲۰ ثانیه می باشند. حرکات قائم و چرخش حول محروهای طولی و عرضی درجات آزادی سخت به حساب آمده و پریود آنها در حدود ۲-۴ ثانیه می باشد [۱]. از آنجا که پریود حرکت قائم این سکوها به پریود امواج دریا، نزدیک می باشد، امکان وقوع تشیدید در آن بیش از سایر درجات آزادی وجود دارد. در صورت وقوع تشیدید در حرکت عمودی، امکان ایجاد پدیده خستگی در پایه های 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 بهره برداری و عملکرد وجود دارد.

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

- انتقال، نصب و از خارج نمودن آن از سرویس آسان می‌باشد.
- تغییر عمق عمده‌تاً 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 رایزره، چاههای نفت و مهارها، نسبتاً آسان است.
- مهمترین ویژگی آن در توانایی انتقال تشدیدها به خارج از محدوده انرژی امواج می‌باشد.



شکل ۱- سکوی حفاری Mars با پایه‌های تحت کشش

اولین کارهای مطالعاتی بر روی پاسخ این سازه‌ها نسبت به امواج دریا در اوایل دهه ۷۰ میلادی توسط پالینگ و هورتن<sup>۱</sup> 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

نشان دهنده 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 پایه کششی مورد نظر قرار گیرد، اما طبیعت تطبیقی این سازه‌ها باعث خنثی شدن بخش عمده 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 دهنده 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 پایه کششی را می‌توان به شکل‌های گوناگونی مانند مثلثی، مربعی و یا ستاره‌ای ساخت [۸] و [۹].

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

مزایای سکوهای با پایه کششی عبارتند از [۸] :

- به علت طبیعت شناورشان، این سکوها ضربه کمتری از موج دریافت نموده و در نتیجه در شرایط دریایی طوفانی، عملیاتی باقی می‌مانند.
- فرکانس‌های طبیعی در درجات آزادی نرم پایین تر از فرکانس امواج بوده و بنابراین امکان وقوع تشدید و اعمال بارهای شدید از بین می‌رود.
- هزینه آن بویژه در آبهای عمیق، کمتر از سازه‌های ثابت می‌باشد.

ژیراسیون و موقعیت مرکز ثقل. برای بدست آوردن نیروهای هیدرودینامیکی می‌توان بدن سکو را به المانهایی کشیده ای تقسیم نمود که هر یک از این المانهایی با موقعیت ابتدا و انتهای، فرم سطح مقطع و ضرایب درگ و اینرسی مربوطه مشخص می‌شوند. معادله کلی حرکت سکو را می‌توان به صورت ماتریسی زیر بیان نمود [۱] :

$$\begin{aligned} M \ddot{x} &= \sum M_A (\ddot{x} - X) + \sum M_{FK} \ddot{x} \\ &+ \sum B |\dot{x} - X| (\dot{x} - X) - KX - K_m X \end{aligned} \quad (4)$$

در این معادله  $X$ ،  $\dot{x}$  و  $\ddot{x}$  بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب بوده و هریک دارای ۶ مؤلفه هستند،  $M_{FK}$  و  $M_A$  ماتریس‌های ۶×۶ بوده و بیانگر ماتریس اینرسی، جرم اضافی و اینرسی ناشی از نیروی فرود کریلوف می‌باشند. مانند گذشته  $B$  ماتریس میرایی ناشی از نیروی درگ،  $K$  ماتریس سختی هیدروداستاتیکی و  $K_m$  ماتریس سختی حاصل از مهارهای سکو تعریف می‌گردند. سرعت و شتاب ذرات آب نیز با بردارهای  $\dot{x}$  و  $\ddot{x}$  نمایش داده شده‌اند و عالم استفاده شده بیانگر لحاظ نمودن تغییرات  $\dot{x}$  و  $\ddot{x}$  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 معادله موریسون برای نیروی حاصل از امواج نوشته شده است. معادله فوق را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} (M + M_A) \ddot{x} + B |\dot{x} - X| \dot{x} \\ + (K + K_m) X = \\ \sum (M_A + M_{FK}) \ddot{x} \\ + \sum B |\dot{x} - X| (\dot{x} - X) + B |\dot{x} - X| \dot{x} \end{aligned} \quad (5)$$

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

## طیف پیرسون و ماسکوویج [۵]

مشهورترین طیف انرژی امواج دریایی، طیف پیرسون و ماسکوویج<sup>۹</sup> باشد. این طیف در سال ۱۹۶۴ توسط این دو محقق و بر پایه داده‌های واقعی جمع‌آوری شده توسط فیلیپس<sup>۱۰</sup> و کیتاوی گوردنسکی<sup>۱۱</sup> پیشنهاد شد.

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

$$\alpha = 8.1 \times 10^{-3}, \quad B = 0.74$$

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

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^4 \right] \quad (3)$$

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

که در آن  $\omega_p$  فرکانس حامل بیشترین انرژی و  $\sigma_c$  واریانس امواج می‌باشد. این رابطه در صورتی که  $\approx ۰/۰۰۸$  باشد، از نظر عددی با رابطه اصلی پیرسون و ماسکوویج برابر خواهد نمود. طبق یافته‌های هسلمن<sup>۱۲</sup>، این طیف لزوماً نشان دهنده موج کاملاً رشد یافته نبوده و تنها قسمتی از این طیف می‌تواند بیانگر چنین امواجی باشد.

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

## تحلیل بر اساس معادله 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 معادله موریسون استفاده نمود. اطلاعات اولیه موردنیاز برای محاسبه حرکت سکو عبارتند از: جایگائی کل سکو، شعاعهای

$$\begin{aligned} & (\Delta t)^2 M \left[ \begin{array}{l} \left\{ \beta x_{i+1} + \left( \frac{1}{2} - \beta \right) x_i \right\} \\ - \left\{ \beta x_i + \left( \frac{1}{2} - \beta \right) x_{i-1} \right\} + \left\{ \frac{1}{2} x_i + \frac{1}{2} x_{i-1} \right\} \end{array} \right] \\ & + (\Delta t)^2 C \left[ \begin{array}{l} \left\{ \frac{1}{2} x_i \right\} + \left\{ \frac{1}{2} x_{i-1} \right\} \\ + \left\{ \beta (x_{i+1} - x_i) \right\} + \left\{ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) (x_i - x_{i-1}) \right\} \end{array} \right] \quad (11) \\ & + (\Delta t)^2 K \left[ \beta x_{i+1} + (1 - 2\beta)x_i + \beta x_{i-1} \right] \\ & = (\Delta t)^2 \left[ \beta F_{i+1} + (1 - 2\beta)F_i + \beta F_{i-1} \right] \end{aligned}$$

و با جایگزین نمودن روابط (۷) در معادله فوق، معادله (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 معادله (۱۲) بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} & \left[ M + \frac{1}{2}(\Delta t)C + \beta(\Delta t)^2 K \right] x_{i+1} = \\ & (\Delta t)^2 \left[ \beta F_{i+1} + (1 - 2\beta)F_i + \beta F_{i-1} \right] \\ & + \left[ 2M - (\Delta t)^2 (1 - 2\beta)K \right] x_i \\ & - \left[ M - \frac{1}{2}(\Delta t)C + \beta(\Delta t)^2 K \right] x_{i-1} \\ & \left[ M + \frac{1}{2}(\Delta t)C + \beta(\Delta t)^2 K \right] x_1 \\ & = (\Delta t)^2 \beta F_1 \\ & + (\Delta t)^2 \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) I + \left( \frac{1}{4} - \beta \right) \Delta t CM^{-1} \right] F_0 \quad (12) \end{aligned}$$

معادلات فوق با فرض  $x_0 = x_i = 0$  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]:

سرعت ذرات آب با افزایش عمق که کوچک بودن عبارت  $\sum B |x_i - x_{i-1}| + B |x_i - x_{i+1}|$  را برای المانهای واقع در عمق زیاد نتیجه می‌دهند. با توجه به ساده‌سازی، معادله (۵) را می‌توان به صورت زیر نوشت:  $(M + M_A) \ddot{x}_i + B |\dot{x}_i| X + (K + K_m) X = \sum (M_A + M_{FM}) x_i + \sum B |x_{i-1} - x_i|$

که در فرم فوق مقدار  $\sum B |x_{i-1} - x_i|$  جایگزین عبارت  $\sum B |x_i - x_{i-1}| + B |x_i - x_{i+1}|$  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- $\beta$

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

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + 0.5\Delta t [x_i + x_{i+1}] \\ x_{i+1} &= x_i + \Delta t x_i + (0.5 - \beta)(\Delta t)^2 x_i + \beta(\Delta t)^2 x_{i+1} \end{aligned} \quad (13)$$

متغیر  $\beta$ ، معنی فیزیکی خاصی داشته و برای  $\beta = \frac{1}{4}$  معادله فوق، مشابه معادله 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 نوشتتن معادله حرکت برای فواصل زمانی  $i-1$ ،  $i$  و  $i+1$  معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$Mx_{i-1} + Cx_{i-1} + Kx_{i-1} = F_{i-1} \quad (14)$$

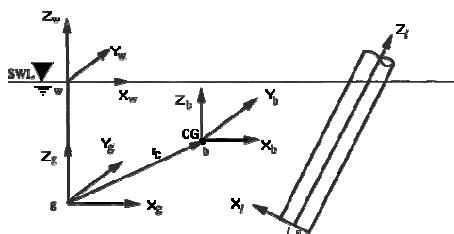
$$Mx_i + Cx_i + Kx_i = F_i \quad (15)$$

$$Mx_{i+1} + Cx_{i+1} + Kx_{i+1} = F_{i+1} \quad (16)$$

پس از ضرب معادلات (۱۴) و (۱۵) در  $(\Delta t)^2$  و معادله (۱۶) در  $(1 - 2\beta)(\Delta t)^2$  و سپس جمع نمودن آنها، نتیجه می‌شود:

شده است که سرعت و شتاب ذرات آب نسبت به آن محاسبه می‌شود.

سیستم مختصات  $b$  متصل به مرکز جرم سکو بوده و همراه آن حرکت و دوران می‌نماید. در مواردی که نیاز به انگال گیری برای یافتن حجم و مرکز جرم 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  $b$  می‌تواند 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  $\phi, \theta, \psi$  را به ترتیب برای دوران مدل محور  $X, Y, Z$  تعریف می‌نماییم.

اگر مرکز جرم سکو نیز در هر لحظه مختصاتی مانند  $Z_c, Y_c, X_c$  داشته باشد، محل و نحوه قرارگیری سکو مشخص می‌شود. باید دقیق کنیم که ترتیب دوران زوایای اوپلری 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  $a_3, a_2, a_1$  در سیستم  $b$  به سیستم  $g$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + [R]^T \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

که در آن:

$$\frac{\Delta t}{T_n} = \begin{cases} 0.318(\beta = 0) \\ 0.450(\beta = \frac{1}{8}) \\ 0.551(\beta = \frac{1}{6}) \end{cases} \quad (14)$$

### مدل سازی سکو

در این تحلیل، مدل به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده و دارای ۶ درجه آزادی می‌باشد. این درجات آزادی سه درجه جابجایی<sup>۱۳</sup> و سه چرخش حول محورهای مختصات<sup>۱۴</sup> می‌باشند. سعی بر آن بوده تا تاثیر درجات آزادی بر یکدیگر لحاظ گردد.<sup>۱۵</sup> با توجه به هندسه اکثر این نوع سکوهای، با استفاده از زبان MATLAB، نرم افزار نوشته شد که مدلی استاندارد، شامل چهار ستون و چهار عضو افقی مغروق را مورد تحلیل قرار می‌دهد.

در این مدل سازی کابلهای تحت کشش سکو مورد مطالعه قرار نگرفته و کابلهای مهار بدون وزن و با رفتار ارجاعی 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 اعمق زیاد استفاده شده است. علی رغم مدل سازی دو بعدی امواج، تاثیر جهت پیش روی 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 می‌گیرد. 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 می‌شوند.

سیستم مختصات اینرسیال دیگری نیز با نام  $w$  با مختصات افقی برابر با سیستم  $g$  در سطح آب تعریف

که در آن  $M$  ماتریس  $6 \times 6$  ضرایب جرم افزوده،<sup>۲۰</sup> بردار شتابهای لحظه‌ای ذرات آب در نقاط مختلف محور استوانه و  $C_M$  ضریب اینرسی می‌باشند. دلیل انتگرال گیری در طول المان به خاطر تفاوت شتاب لحظه‌ای ذرات آب در نقاط مختلف یک استوانه با نحوه قرارگیری دلخواه می‌باشد. از آنجا که عملاً در نرم افزار امکان انتگرال گیری از رابطه فوق وجود ندارد، برای محاسبه نیروی اینرسی قسمت مغروف هر یک از استوانه‌ها به تکه‌هایی کوچک تقسیم شده و با محاسبه شتاب در مرکز هر تکه و ضرب آن در ماتریس ضرایب جرم افزوده و جمع کلیه نتایج، نیروی وارد بر هر استوانه محاسبه می‌شود. نحوه استخراج ماتریس  $M$  در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد. شتاب ذرات آب نیز به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$\ddot{\mathbf{r}} = [i\cos\beta \ i\sin\beta \ u \ 0 \ 0]^T \quad (20)$$

که  $\beta$  در آن زاویه پیش روی امواج،<sup>۲۱</sup> شتاب افقی ذرات آب و  $u$  شتاب عمودی ذرات آب می‌باشند. ضریب  $C_A$  بوده و  $C_A = C_M + 1$  ضریب جرم افزوده ثابت و برابر ۱ در نظر گرفته شده است [۲].

### نیروی درگ بر اطراف استوانه‌ها

نیروی درگ بر یک استوانه را پس از جداسازی متغیرهای درون قدر مطلق به صورت زیر محاسبه می‌نماییم.

$$F_{DL} = C_D \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} D \rho \eta dl \quad (21)$$

که در آن  $D$  ماتریس  $6 \times 6$  ضرایب درگ و<sup>۲۲</sup> بردار سرعتهای لحظه‌ای ذرات آب در نقاط مختلف محور استوانه و  $C_D$  ضریب درگ جریان در اطراف یک سیلندر می‌باشد. در اینجا نیز دلیل انتگرال گیری در طول المان، تفاوت سرعتهای لحظه‌ای ذرات آب در نقاط مختلف استوانه است.

همانند قسمت قبل برای محاسبه این انتگرال قسمت مغروف هر یک از استوانه‌ها به تکه‌هایی کوچک تقسیم شده و با محاسبه سرعت ذرات در مرکز هر تکه و ضرب آن در ماتریس ضرایب درگ و جمع کلیه نتایج، نیروی وارد بر هر استوانه محاسبه می‌شود.

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

### محاسبه بردار نیروهای خارجی وارد بر سکو و ماتریس‌های ضرایب

همانطور که قبلاً گفته شد، برای سادگی در حل معادله موریسن، تمام ضرایبی که مستقیماً در جایجایی، سرعت و شتاب ضرب می‌شوند به یک سمت و تمامی ضرایبی که در سرعت و شتاب ذرات آب ضرب می‌گردند به سوی دیگر منتقل می‌شوند. مجموعه این دسته ضرایب را تحت عنوان نیروهای خارجی شناخته و بصورت  $F$  نشان می‌دهیم.  $F$  در مدل حاضر با شش درجه آزادی، یک بردار با ۶ المان می‌باشد که سه درایه اول نیرو و سه درایه دوم مانهای خارجی می‌باشند:

$$F = [F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T \quad (16)$$

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

$$F = F_E + F_{DL} + F_{DB} + F_{BV} \quad (17)$$

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 سطونهای  $F_{BV}$  نیروی شناوری حاصل از پروفیل امواج بر المانهایی است که سطح آب را قطع می‌نمایند.

### نیروی اینرسی سیال

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

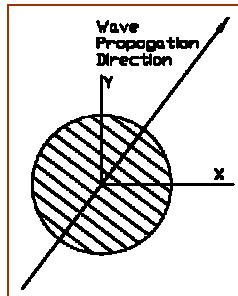
$$F_{EK} = C_M A_L \eta \quad (18)$$

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 می‌شود:

$$F_{EK} = C_M \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} M \eta dl \quad (19)$$

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، اندازه 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:

$$P_D = \rho g \eta_B K_p(z) \quad (24)$$

که در آن  $\rho$  چگالی آب،  $\eta_B$  ارتفاع پروفیل موج در بالای نقطه 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:

$$K_p(z) = \exp(2\pi \frac{z}{\lambda}) \quad (25)$$

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

$$F_{BV} = T \int_S P_D ds = T \rho g \int_S \eta_B K_p(z) ds \quad (26)$$

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 صفحه زیرین ستونها و المان بندی آن مشابه قسمت قبل، محاسبه می نماییم.

ماتریس سرعتها مشابه ماتریس شتابها می باشد. در اینجا برای سادگی بیشتر و با توجه به برخی کارهای گذشته  $C_D$  ثابت و برابر  $1/2$  فرض شده است [۲]، [۸]، [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 می توان وجود نیروهای درگ بزرگی را بر روی کف ستونها پیش بینی نمود. اگر در این شرایط هم مکانیزم اعمال نیرو را مشابه با نحوه ایجاد درگ بر روی جداره سیلندرها فرض کنیم، کل نیروی درگ بر اثر حرکت سکو و سرعت ذرات آب به صورت زیر نوشته می شود: [۹]

$$F_{DBT} = 0.5eC_D \frac{\pi D_c^2}{4} T \quad (22)$$

که در آن  $F_{DBT}$  کل نیروی درگ وارد آمده بر کف یک ستون،  $C_D$  ضریب درگ یک صفحه تخت  $D_c$  قطر ستون،  $T$  سرعت لحظه ای ذرات آب در هر نقطه، 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  $\frac{d}{ds}$  به سمت چپ معادله و چشم پوشی از خطای باقی مانده، بر اثر جدایی، نیروی درگ  $F_{DB}$  به صورت زیر محاسبه می شود.

$$A_D = \frac{1}{8} \rho \pi D_c^2 \quad F_{DB} = C_D T \int_S A_D ds \quad (23)$$

از آنجا که انتظار می رود سکوهای با پایه کششی حرکات بزرگی را در درجات آزادی غلتش طولی و عرضی از خود نشان ندهند، برای محاسبه اندازه نیروهای درگ بر کف ستونها، قاعده 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 محاسبه انتگرال فوق، سطح پایینی هر ستون به نوارهای نازکی، عمود بر جهت پیشروی موج تقسیم شده و سپس

### تعیین ماتریس درگ

ماتریس میرایی  $B$  به طریقی مشابه با محاسبه ماتریس جرم اضافی قابل محاسبه است. ماتریس فوق مجموع ماتریس‌های میرایی برای تک‌تک المانها می‌باشد. فرض می‌کنیم که تنها مؤلفه عمودی نیروی درگ بر هر المان قابل توجه است. فرم کلی نیروی درگ بصورت زیر است:

$$F_D = b_{ij} \begin{vmatrix} x & y \\ x & y \end{vmatrix} \quad (29)$$

### تعیین ماتریس سختی

ماتریس سختی نیز مانند ماتریس‌های جرم افزوده و درگ یا دمپینگ ماتریسی  $6 \times 6$  بوده که با ضرب شدن در بردار  $6$  عضوی مختصات سکو نیروها و ممانهای ناشی از جابجایی سازه را در معادله ایجاد می‌نماید.

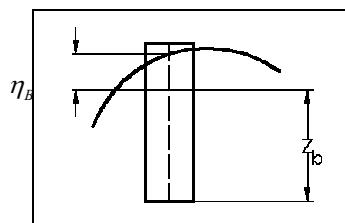
یک درایه مانند  $k_{ij}$  از ماتریس سختی، بیانگر نیروی ایجاد شده در درجه آزادی  $i$  am بر اثر پاسخ سازه به جابجایی سکو در درجه آزادی  $j$  am و مهار حرکت در بقیه درجات آزادی می‌باشد

در اینجا باید خاطر نشان شویم که درایه‌های ماتریسی سختی به دلیل وجود جملاتی با سینوسها، کسینوسها و توانهای جابجایی غیر خطی بوده و به دلیل وجود این ترمهای و همچنین تغییرات کشنخ خطوط مهار سکو، ماتریس سختی نیز مانند دو ماتریس قبلی به پاسخ سازه وابسته است.<sup>۱۵</sup> ماتریس سختی در واقع حاصل جمع دو ماتریس سختی ناشی از خطوط مهار و نیروی شناوری می‌باشد. فرم کلی ماتریس سختی به شکل زیر است.

$$K =$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & K_{15} & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & K_{24} & 0 & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ 0 & K_{42} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ K_{51} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \quad (30)$$

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



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:

$$(27)$$

$$-m_{ij} =$$

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

که در آن  $\alpha$ ,  $\beta$  و  $\gamma$  کسینوسها هادی محور طولی استوانه می‌باشند.

ماتریس فوق تنها بخشی از ماتریس کل را نمایش می‌دهد. برای  $i = 4$  تا  $i = 6$  و  $j = 1$  تا  $j = 3$  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 می‌شود:

$$m_{41} = m_{31} y_m - m_{21} z_m \quad (28)$$

مؤلفه‌های  $m_{ij}$  برای  $i = 1$  تا  $i = 6$  و  $j = 4$  تا  $j = 6$  ناشی از شتاب دورانی حول محورهای  $Ox$ ,  $Oy$  و  $Oz$  است. مابقی مؤلفه‌های ماتریس با توجه به خصیت تقارن بدست می‌آیند.

با توجه به تقارن طولی و عرضی سکو، مشابه با همین محاسبات را می‌توان برای جابجایی به اندازه  $y_1$  در درجه آزادی دوم یا محور عرضی تکرار نمود.

$$k_{22} = \frac{4(T_o + \Delta T_1)}{\sqrt{y_1^2 + L_o^2}} \quad (36)$$

$$k_{32} = 4 \frac{T_o(\cos \gamma_y - 1) + \Delta T_1 \cos \gamma_y}{y_1} \quad (37)$$

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

$$k_{42} = -k_{22} \bar{h} \quad (38)$$

بدون ورود به جزئیات درایه‌های دیگر ماتریس سختی به مطابق روابط (۳۹) محاسبه می‌شوند. در روابط بالا قطر ستونها،  $\psi, \theta, \phi$  به ترتیب زوایای غلت و تاب و پیچ،  $e$  فاصله افقی مرکز بولیانسی سکو در حالت دوران یافته با مرکز جرم سکوی  $B_2$  بولیانسی جدید سکو می‌باشند.

$$\left. \begin{aligned} k_{24} &= \frac{2 \sin \beta (T_o + \Delta T_1)}{|\phi|} \\ k_{34} &= \frac{(2 \cos \beta - 4)T_o + 2 \cos \beta \Delta T_1}{\phi} \\ k_{44} &= \frac{2r_{2z}(T_o + \Delta T_1) \sin(\beta + \alpha + |\phi|) + B_2 e}{|\phi|} \\ k_{33} &= 4S_M + \frac{3}{4} g \pi e D_c^2 \\ k_{15} &= \frac{2 \sin \beta (T_o + \Delta T_1)}{|\theta|} \\ k_{35} &= \frac{(2 \cos \beta - 4)T_o + 2 \cos \beta \Delta T_1}{\theta} \\ k_{55} &= \frac{2r_{xz}(T_o + \Delta T_1) \sin(\beta + \alpha + |\theta|) + \beta_2 e}{|\theta|} \\ k_{36} &= 4 \frac{T_o(L_o - L_1) + \Delta T_1 L_o}{L_1 \psi} \\ k_{66} &= 8 \frac{(T_o + \Delta T_1) \gamma_{xr} \sin(\frac{\psi}{2}) \cos(\frac{\psi}{2})}{L_1 \psi} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

$r_{\xi\xi}$  نیز به صورت فاصله مرکز جرم با محل اتصال کابل به کف ستونها در صفحه  $O\xi\xi$  متعلق به دستگاه مختصات متصل به سکو تعریف می‌شود. زاویه  $\alpha$ ، زاویه بین محور یک ستون و خط بین مرکز کف ستون و مرکز جرم سکو می‌باشد. زاویه  $\beta$  نیز زاویه میان

$$S_M = \frac{AE}{L_o} \quad (31)$$

که در آن  $A$  سطح مقطع کابل،  $E$  مدول یانگ (برابر با  $GPa$ ) و  $L_o$  طول اولیه کابل می‌باشد. کشش اولیه کابل رانیز با  $T_o$  نمایش می‌دهیم.

با این تعاریف، برای محاسبه  $k_{11}$ ، مطابق شکل ۵، جابجایی دلخواه  $x_1$  را به سکو می‌دهیم. اگر افزایش کشش هر خط مهار،  $\Delta T_1$ ، را بر حسب مشخصات اولیه کابل و طول نهایی آن  $L_1$  محاسبه کنیم.

$$\Delta T_1 = (L_1 - L_o)S_M \quad \text{و} \quad L_1 = \sqrt{x_1^2 + L_o^2} \quad (32)$$

با نوشتن تعادل نیروها در جهت  $x$  می‌توان  $k_{11}$  را محاسبه نماییم.

$$\left. \begin{aligned} K_{11}x_1 &= 4(T_o + \Delta T_1) \sin \gamma_x \\ \sin \gamma_x &= \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + L_o^2}} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

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

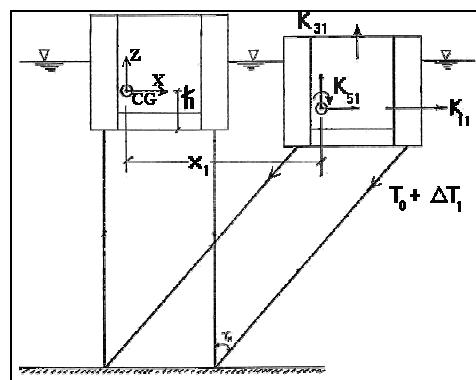
به همین ترتیب  $k_{51}, k_{31}$  نیز محاسبه می‌شوند.

$$k_{31} = 4 \frac{T_o(\cos \gamma_x - 1) + \Delta T_1 \cos \gamma_x}{x_1} \quad (34)$$

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

$$k_{51} = -k_{11} \bar{h} \quad (35)$$

که  $\bar{h}$  فاصله عمودی مرکز جرم با محل اتصال خطوط مهار کف ستونها می‌باشد.



شکل ۵- جابجایی طولی سکو

می‌گردد. در هر گام زمانی این مرحله سعی و خطای جایی که خطای محاسبه کمتر از مقدار  $\epsilon$  مورد نظر شود ادامه یافته و پس از حصول جواب مورد نظر به گام بعدی می‌رویم. حدس اولیه برای هر گام زمانی بردار سرعت گام قبلی بوده و حدس اولیه گام نخست بردار سرعت صفر می‌باشد. با این روش ملاحظه شد که تقریباً پس از ۱۰ تا ۲۰ جایگذاری در هر گام زمانی می‌توان به خطای کمتر از  $0.05\%$  رسید. برای یافتن دامنه حرکات سکو در هر فرکانس موج، لازم است آنقدر در زمان حرکت کنیم تا دامنه حرکات به مقدار ثابت برسد (در صورتی که شرایط تشدید رخ ندهد). ملاحظه شد که تقریباً پس از ۵۰ تا ۵۰ سیکل کامل حرکت سکو، می‌توان دامنه حرکات را ثابت در نظر گرفت.

از آنجا که معادله دیفرانسیل بدست آمده غیر خطی می‌باشد، نمی‌توان برای یافتن جابجایی سکو بر اثر امواج نامنظم، از اصل جمع آثار پاسخ به امواج ساده متعدد، استفاده نمود. برای یافتن پاسخ سکو به امواج نامنظمه، ابتدا می‌توان طیف موج مورد نظر را به امواج سینوسی تشکیل دهنده آن تجزیه نموده و سپس در هر مرحله، برای یافتن بردار نیروهای خارجی، از جمع آثار فشارها، سرعتها و شتابهای تمامی مؤلفه‌های موج استفاده کرد. پاسخ بدست آمده، جابجایی سکو بر اثر امواجی نامنظم خواهد بود که می‌توان آنرا با کمک تابع انتقال فوریهٔ سریع<sup>۱۶</sup> به حوزهٔ فرکانس برده و طیف حرکت را استخراج نمود. باید دقیق نمود که با توجه به غیر خطی بودن این سیستم، تبدیل مجدد طیف حاصل به حوزهٔ زمان اشتباه بوده و نمی‌توان این طیف را به حوزهٔ زمان تبدیل نمود.

## نتایج اجرای مدل بر یک سکوی نمونه سکوی نمونه

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

راستای عمودی و خطوط مهار تحت کشش بر اثر غلتچ سکو می‌باشد.

### جرم افزوده کف ستونها در حرکت عمودی

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

$$M_h = \frac{2}{3} \rho \pi \left( \frac{D_c}{2} \right)^3 \quad (40)$$

در این مدل  $M_h$  مستقیماً با درایه  $M_{33}$  جمع می‌شود.

### نیروی درگ اعمال شده بر کف ستونها بر اثر حرکت عمودی

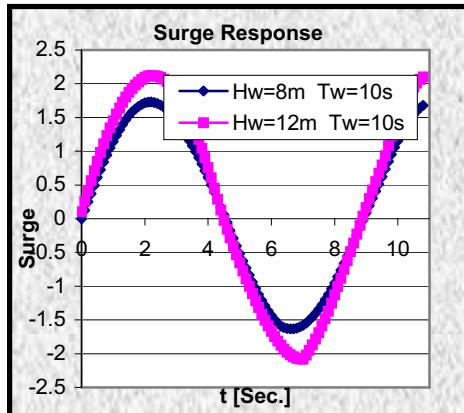
در بخش ۳-۶ کل نیروی درگ وارد شده بر کف یک ستون بر اثر حرکت عمودی نشان داده شد. در آنجا سرعتهای ذرات آب و سکو از یکدیگر جدا شده و درگ حاصل از سرعت ذرات آب با چشم پوشی از باقیمانده جداسازی، مورد مطالعه قرار گرفت. درست چپ معادله نیز همانند قسمت قبل می‌توان  $F_{DB}$  را محاسبه کرده و مستقیماً به عناصر شرکت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

### روش حل استفاده شده برای مدل حاضر

برای حل مدل ساخته شده از روش نیومارک -  $\beta$  استفاده شد. اما برای اجتناب از برخورد با معادلات جبری درجه ۲ پس از بسط مشتقات جابجایی، به دلیل وجود جملات شامل  $\Delta$  در معادله دیفرانسیل، بردار  $\Delta$  به صورت زیر در نظر گرفته شد.

$$[\Delta^2]_{6 \times 1} = [D\Delta]_{6 \times 6} [\Delta]_{6 \times 1} \quad (41)$$

ماتریس  $[D\Delta]$ ، یک ماتریس  $6 \times 6$  بوده که مقادیر بردار  $\Delta$  بر روی درایدهای قطر اصلی آن گذاشته شده اند با کمک این تعریف و حدس یک مقدار اولیه در هر گام زمانی برای ماتریس  $[D\Delta]$ ، معادله حل شده و سپس برای تصحیح هر چه بهتر جوابهای بدست آمده مقدار بدست آمده برای بردار  $\Delta$  در ماتریس  $D\Delta$  جایگزین

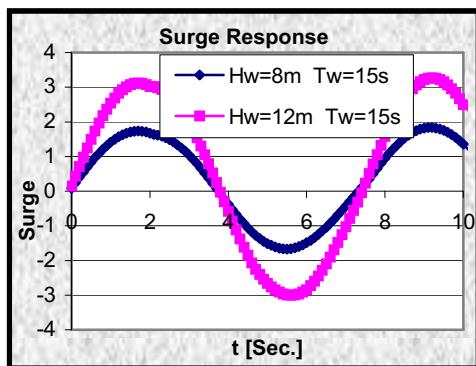


شکل ۸- پاسخ وابسته حرکت طولی با ارتفاع موج ۸ و ۱۲ متر و پریود ۱۰ ثانیه و زاویه بر خورد ۰ درجه

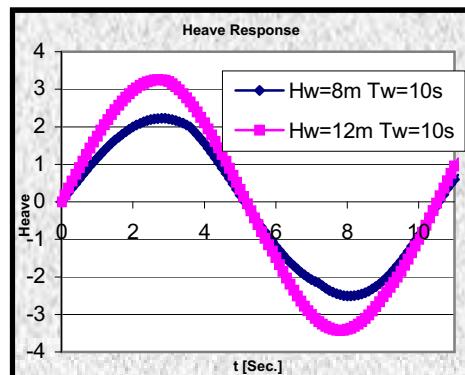
جدول ۱: مشخصات سکوی نمونه

$W (KN)$	۳۳.....	$A/E (KN / m)$	۳۴۰۰
$F_B (KN)$	۴۶۵۵۰۰	$P_D (m)$	۷۵۶۶
$T_o (KN)$	۱۳۵۰۰	$D = D_c (m)$	۱۶۸۹
$L_o (m)$	۲۶۹	$I_{xx}$	۳۵۸
$d (m)$	۳۰۰	$I_{yy}$	۳۵۸
$KG (m)$	۲۷/۴۷	$I_{zz}$	۴۲۴

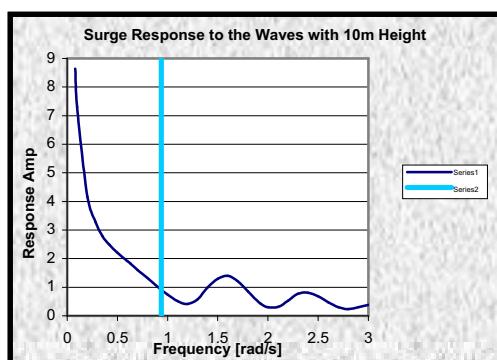
نتایج تحلیل مدل در حوزه زمان برای دو ارتفاع موج ثابت با دو پریود برای درجات آزادی حرکت طولی و عمودی ارائه شده اند. زاویه پیشروی موج صفر درجه بوده است. در ادامه پاسخ طیفی سکو به امواج ۱۰ متری برای درجات آزادی حرکت طولی، عمودی و غلتش عرضی یا تاب، ارائه شده اند.



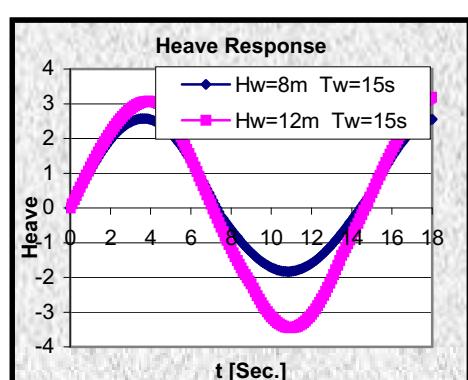
شکل ۹- پاسخ وابسته حرکت طولی با ارتفاع موج ۸ و ۱۲ متر و پریود ۱۵ ثانیه و زاویه بر خورد ۰ درجه



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



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



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

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

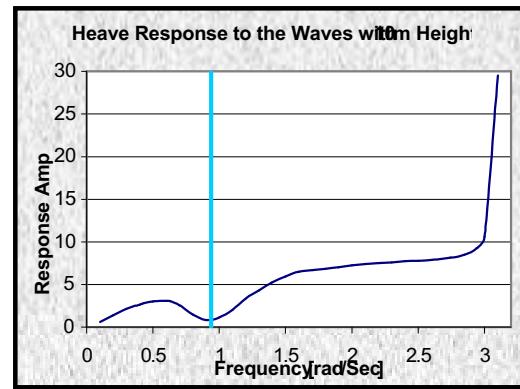
$$\frac{H}{\lambda} < \frac{1}{7} \Rightarrow \sqrt{\frac{14\pi H}{g}} < T \quad \text{or} \quad \sqrt{\frac{2\pi g}{7H}} > \omega$$

$$\xrightarrow[H=10m]{} T > 6.7 \quad \text{or} \quad \omega < 0.94$$

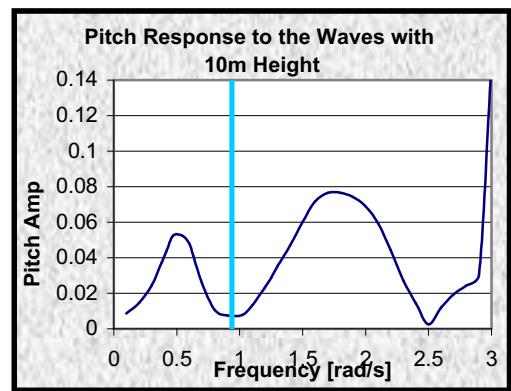
این مقدار حداقل فرکانس فیزیکی ممکن برای امواجی با ارتفاع ۱۰ متر می باشد، که با یک خط عمودی مشخص شده است.

### نتیجه گیری

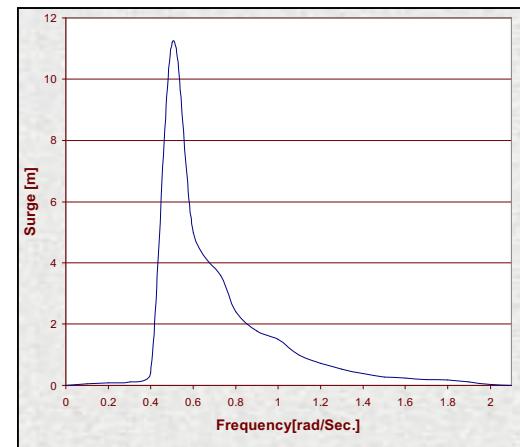
در بخش‌های گذشته به روش تحلیل حرکات سکوهای شناور با پایه های کششی، با کمک معادله موریسن و بدون خطی سازی نیروی درگ پرداخته شد. مقایسه نتایج این تحلیل با نتایج مدل‌سازی مشابه دیگر که توسط Jain و Chandrasekaran [۸] انجام شده تطبیق خوبی نشان داده و تفاوت‌های موجود را باید به دلیل در نظر گرفته شدن نیروی جرم افروده، درگ و فشار دینامیکی بر کف ستوнаها 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 دقیقترا می باشد. در نهایت الگوریتم حل عددی در روش حاضر کمی با کارهای مشابه تفاوت دارد.



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



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



شکل ۱۳- پاسخ حرکت افقی سکو به طیف P-M با  $\omega_p = +7/4$

## 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 DYNAMCS 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 NONLINEAR WAVE FORCES: PART II (RESPONDING CYLINDER)" , University of Salford , UK ,1997