

## تحلیل عددی اثر چیدمان خطوط مهار بر پاسخ دینامیکی سکوی اسپار خربایی در امواج دریا

محمدجواد کتابداری<sup>۱</sup>، محمد بختیاری<sup>۲</sup>، حسن قاسمی<sup>۳</sup>

ketabdar@aut.ac.ir

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استاد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

در چند دهه گذشته بشر با افزایش تقاضای سوخته‌های هیدرو کربنی مانند نفت و گاز جهت کشف و استخراج منابع دور از ساحل به سمت آبهای عمیق گرایش پیدا کرد. این حرکت منجر به استفاده از سکوه‌های شناور و تکنولوژی‌های جدید آب عمیق شد. یکی از این تکنولوژی‌ها، سکوی اسپار است. اسپار یک سکوی شناور است که در آب‌های عمیق و فوق عمیق بکار گرفته می‌شود. در این مقاله، آثار چیدمان خطوط مهار بر روی پاسخ دینامیکی سکوی اسپار خربایی در مقیاس واقعی در موج منظم و نامنظم به صورت عددی و در حوزه زمان با استفاده از تئوری تفرق مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از یک سکوی اسپار خربایی که اخیراً در ساحل مالزی در میدان نفتی Kikeh در نزدیکی Saba نصب شده است استفاده شد. در ابتدا، کد Aqwa بکار گرفته شده در این مطالعه برای حرکات سه درجه آزادی سکو، با نتایج آزمایشگاهی موجود همین سکو معتبر گردید. سپس نتایج با کد DATspar که بر اساس تئوری موریسون کار می‌کند مقایسه شد. نتایج نشان داد که برای اپراتور دامنه پاسخ حرکات، کد آکوا با در نظر گرفتن تفرق تطابق بهتری نسبت به کد DATspar نسبت به آزمایشگاهی دارد. مفهوم این تطابق بهتر اینست که حذف تفرق در مدلسازی این سکوها باعث جوابهای غیر واقعی می‌گردد و مدلسازی انجام شده در این تحقیق دقیقتر از کارهای قبلی است. پس از اطمینان از صحت و دقت نتایج، حرکات سکو در سه درجه آزادی سرج، هیو و پیچ در سه چیدمان مختلف از یک مهار چهارتایی شامل زوایای خطوط مهار ۰، ۲۲،۵ و ۴۵ درجه نسبت به موج بررسی شد. نتایج نشان داد که آثار چیدمانهای مختلف مهار بر روی دامنه حرکات سکو در موج منظم، در پریودهای کوچک ناچیز و در پریودهای بزرگتر قابل ملاحظه است. بطور کلی، دامنه حرکات با افزایش زاویه مهار نسبت به موج منظم افزایش می‌یابد. مطالعه حرکات سکو در موج نامنظم نشان داد که با افزایش زاویه مهار از ۰ تا ۲۲،۵ درجه و سپس از ۲۲،۵ تا ۴۵ درجه، ابتدا دامنه متوسط حرکات کاهش و سپس افزایش می‌یابد و کمترین دامنه متوسط حرکات در زاویه ۲۲،۵ درجه رخ می‌دهد.

واژگان کلیدی: سکوی اسپار خربایی، چیدمان خطوط مهار، پاسخ دینامیکی، تحلیل در حوزه زمان، تئوری تفرق، روش عددی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۱/۲۹

## ۱- مقدمه

آغاز کشف منابع نفتی و گازی در آب‌های عمیق باعث شد سکوهای مختلفی متناسب با این آب‌ها ابداع شوند. یکی از انواع پر کاربرد این سکوهای آب عمیق سکوی اسپار است. در میان انواع گوناگونی از سکوهای فراساحلی که در طول چند دهه گذشته برای بهره برداری از میدین فراساحلی طراحی و ساخته شده اند، به جرأت می‌توان سکوی اسپار را بزرگترین شاهکار مهندسی، در صنعت فراساحل توصیف نمود. این سکوها در حال حاضر نقش مهمی در توسعه میدین آب‌های عمیق خلیج مکزیک دارند. علاوه بر اینکه رکورددار فعالیت در عمیق‌ترین عمق آبی هستند که تاکنون شرکت‌های نفتی بدان دست یافته‌اند و سهم قابل توجهی از پیشرفت‌های این صنعت در آینده را نیز به خود اختصاص خواهند داد. در واقع با تکمیل و توسعه تکنولوژی‌های به کار رفته در این سکوها، آن‌ها از هم اکنون به کلید بهره‌برداری از میدین واقع شده در آب‌های فوق عمیقی تبدیل شده‌اند. مناطقی که هر ساله شاهد بزرگترین طوفان‌ها و بدترین شرایط آب و هوایی کره زمین هستند. ولی علی‌رغم فعالیت در چنین مناطقی، آن‌ها بدون هیچ مشکلی قادر به تداوم فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده هستند.

سکوهای اسپار هر چند امروزه به نامی آشنا برای شرکت‌های فعال در آب‌های عمیق تبدیل شده‌اند ولی تمامی سکوهای ساخته شده از نوع اسپار، در خلیج مکزیک مشغول به فعالیت هستند. تنها یک مدل از این سکو در بیرون از خلیج مکزیک در کشور مالزی مشغول به فعالیت است. اسپار یک سکوی شناور استوانه‌ای است که به منظور انجام عملیات حفاری، تولید و ذخیره نفت طراحی شده است. تا به امروز سه نوع مختلف از سکوهای اسپار ساخته شده است: اسپار کلاسیک<sup>۱</sup>، اسپار خرپایی<sup>۲</sup> و اسپار سلولی<sup>۳</sup> (شکل (۱)).

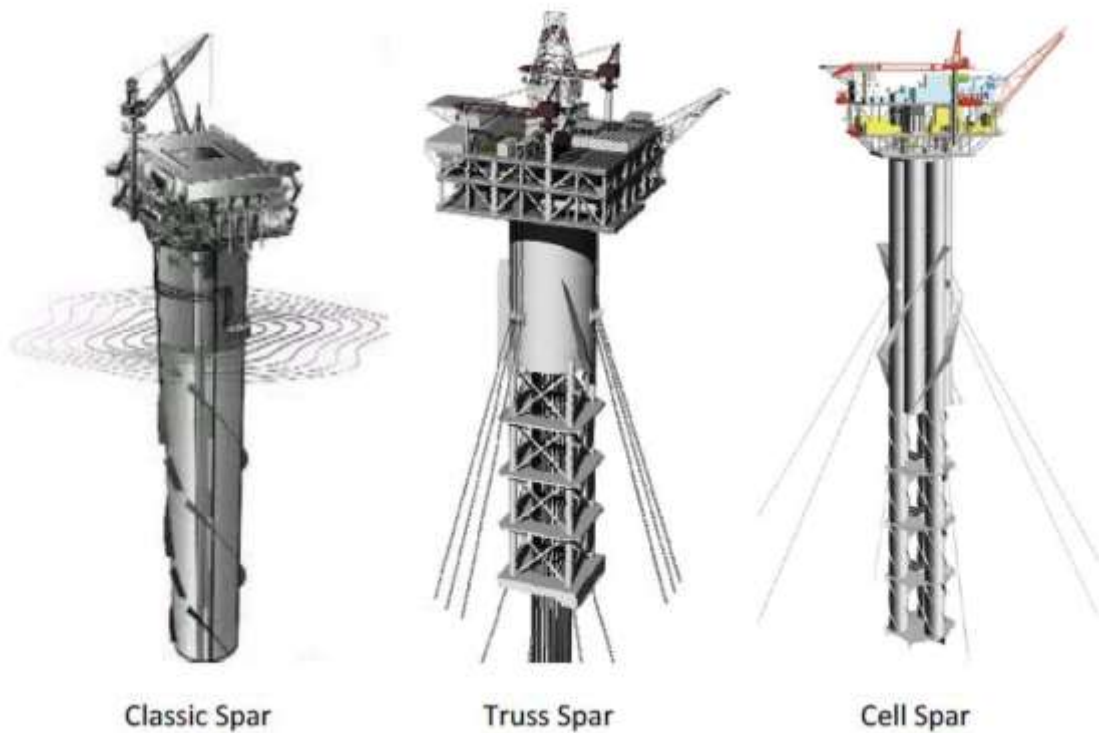
در این میان، سکوی اسپار خرپایی و سپس سکوی اسپار کلاسیک بیشترین کاربرد را داشته‌اند. سکوی اسپار خرپایی دارای یک مخزن سخت<sup>۴</sup> استوانه‌ای در قسمت بالایی و یک مخزن نرم<sup>۵</sup> در قسمت کیل<sup>۶</sup> است که توسط یک بخش میانی خرپایی از هم جدا شده‌اند. مطالعات نشان می‌دهند که

سکوی اسپار خرپایی عملکرد بهتری از سکوی اسپار کلاسیک دارد، چرا که دارای وزن کمتر، هزینه ساخت کمتر، زمان ساخت کمتر، حرکات هیو میرا شده، نیروی پسی کمتر ناشی از بخش خرپایی و بارهای مهار کوچک تر در محیط‌های دارای جریان‌های دریایی شدید است [۱-۵].

سکوهای اسپار توسط خطوط مهار گسترده در محل خود در محیط اقیانوسی مهار می‌شوند. هزینه سیستم مهار حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از کل هزینه پروژه را شامل می‌شود. بنابراین پیدا کردن بهترین چیدمان ممکن برای خطوط سیستم مهار به گونه‌ای که بتواند حرکات سکو را تا حد قابل توجهی کاهش دهد، ضروری است. روش‌های تحلیلی و عددی مختلفی را می‌توان برای محاسبه پاسخ دینامیکی سکوی اسپار در موج بکار گرفت.

مستقیم‌ترین روش، تحلیل در حوزه زمان است که در آن سری زمانی تغییرات سطح آب به عنوان ورودی استفاده شده و پاسخ سازه بصورت عددی در زمان محاسبه می‌شود. در این روش می‌توان خطوط مهار و ریزرها را به عنوان فنر در نظر گرفت و سختی آن‌ها را بطور جداگانه به سختی هیدرو استاتیکی سیستم اضافه نمود. روش دیگر تحلیل در حوزه فرکانس است. این روش در مقایسه با تحلیل در حوزه زمان ساده تر بوده و زمان کمتری می‌برد، چرا که در این روش می‌توان پاسخ سکو را با استفاده از روش طیف موج تخمین زد. تاکنون مطالعات محدودی بر روی پاسخ سکوی اسپار دارای سیستم مهار در موج صورت گرفته است. میخا<sup>۷</sup> و همکاران، در سال ۱۹۹۵، رفتار یک اسپار در آب عمیق را در سه درجه آزادی در حوزه زمان مورد تحلیل قرار دادند و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند [۶]. آن‌ها همچنین در سال ۱۹۹۶ آثار نیروهای تفرق مرتبه دوم بر روی پاسخ اسپار را بررسی کردند [۷]. در سال ۲۰۰۳، آگاروال و جین<sup>۸</sup> پاسخ دینامیکی یک سکوی اسپار در موج را همراه با سیستم مهار با استفاده از تئوری موريسون در شش درجه آزادی در حوزه زمان مدل سازی کردند [۸]. آنام<sup>۹</sup> و همکاران در همین سال، دو روش تحلیل در حوزه زمان و فرکانس را به کمک تئوری موريسون به سکوی اسپار مهار شده اعمال کردند.

<sup>۶</sup> Keel<sup>۷</sup> Mekha<sup>۸</sup> Agarwal and Jain<sup>۹</sup> Anam<sup>۱</sup> Classic Spar<sup>۲</sup> Truss Spar<sup>۳</sup> Cell Spar<sup>۴</sup> Hard Tank<sup>۵</sup> Soft Tank



شکل (۱) انواع مختلف سکوی اسپار [۱].

در مطالعه حاضر، آثار چیدمان خطوط مهار بر روی پاسخ هیدرودینامیکی یک سکوی اسپار خربایی در ابعاد واقعی بصورت عددی به کمک تئوری تفرق در حوزه زمان مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از یک سکوی اسپار خربایی که اخیراً در ساحل مالزی نصب شده است استفاده گردید. حرکات این اسپار بصورت یک جسم صلب در سه درجه آزادی (سرج، هیو و پیچ) به کمک کد تجاری Aqwa شبیه سازی گردید.

لذا در این مقاله ابتدا، معادلات حاکم بر مسئله بیان شده سپس، مدل هندسی و شبکه محاسباتی (پنل) تولید شده توضیح داده شده اند. در ادامه، قبل از بکارگیری روش عددی حاضر برای تحلیل پاسخ سکو تحت چیدمان‌های مختلف مهار، نتایج این روش با نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود ([۱۲]) مقایسه و اعتبارسنجی گردیده اند. در پایان، نتایج حاصل از تحلیل سکو در حوزه زمان در موج منظم و نامنظم ارائه شده اند.

## ۲- معادلات حاکم

در این قسمت معادلات مربوط به برآورد نیروی موج روی سکو و نیروی حاصل درمهار آمده است.

آن‌ها این دو روش را با هم مقایسه و محدودیت‌های روش تحلیل در حوزه فرکانس را در محاسبه نیروهای غیر خطی نشان دادند [۹]. در سال ۲۰۰۵، اسپانوس<sup>۱</sup> و همکاران پاسخ یک سکوی اسپار مهار شده را در حوزه زمان به روش عددی مورد تحلیل قرار دادند [۱۰]. کتابداری و میرزایی صفت در سال ۲۰۱۱، یک روش عددی تفاضل محدود را برای پیش بینی حرکات سکوی اسپار در موج با استفاده از تئوری تفرق توسعه دادند [۱۱].

با وجود مطالعات محدود انجام شده بر روی پاسخ سکوی اسپار مهار شده در موج، آثار چیدمان خطوط مهار بر روی حرکات سکوی اسپار بسیار به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال می‌توان به تحلیل عددی انجام شده توسط مونتاسیر<sup>۲</sup> و همکاران اشاره کرد. آنها آثار چیدمان‌های مختلف سیستم مهار گسترده را بر روی پاسخ دینامیکی یک سکوی اسپار خربایی با فرضیات ساده کننده و صرف نظر از تفرق با استفاده از تئوری موريسون به روش عددی در حوزه زمان مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه به کمک یک کد عددی توسعه یافته انجام شد و نتایج این کد را با نتایج تست مدل مقایسه گردید [۱۲].

<sup>2</sup> Montasir

<sup>1</sup> Spanos

## ۱-۲- نیروی موج

$$(۶) \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega n_j \text{ تشعشی} \\ \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \text{ تفرقی} \end{cases} \text{ برای پتانسیل}$$

که در آن،  $n_j$  مولفه بردار واحد عمود بر سطح جسم در راستای حرکت ز است. شرط مرزی در عمق  $d$  برای بستر نفوذ ناپذیر:

$$(۷) \quad \frac{\partial \phi}{\partial Z} = 0 \quad \text{on} \quad Z = -d$$

یک شرط مرزی شعاعی میدان دور دست نیز باید به این معادلات اضافه شود بطوریکه وقتی  $\sqrt{X^2 + Y^2} \rightarrow \infty$  اغتشاش ایجاد شده در موج از بین می‌رود. در نرم افزار Aqwa از روش انتگرال مرزی در حل معادلات بالا استفاده می‌شود. در این روش از یک تابع گرین که از شرایط مرزی خطی سطح آزاد، بستر دریا و شرط میدان دور دست تبعیت می‌کند استفاده شده است. در نهایت، با اعمال تابع گرین،  $G$ ، جواب پتانسیل سرعت برای امواج تفرقی و تشعشی در هر نقطه در داخل دامنه سیال یا روی سطح جسم از انتگرال مرزی زیر روی سطح جسم بدست می‌آید:

$$(۸) \quad \phi(\vec{X}) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \sigma(\vec{\xi}) G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega) ds$$

برای حل معادله انتگرالی بالا در نرم افزار Aqwa از روش پنل استفاده می‌شود که در آن سطح خیس جسم شناور به پنل‌های مثلثی یا مستطیلی تقسیم‌بندی می‌شود و حاصل انتگرال بالا بصورت عددی محاسبه می‌گردد. پس از محاسبه پتانسیل سرعت مختلط کل، توزیع فشار هیدرودینامیک خطی را می‌توان با استفاده از معادله خطی شده برنولی بدست آورد:

$$(۹) \quad p = -\rho \frac{\partial \phi(\vec{X}, t)}{\partial t} = i\omega \rho \phi(\vec{X}) e^{-i\omega t}$$

سپس، با انتگرال گیری از توزیع فشار بر روی سطح خیس سکو، نیروهای موج محاسبه می‌شود. برای بیان فرم کلی نیروها و ممان‌های وارد شده بر سکو، بردار واحد عمود بر سطح بدنه سکو بصورت ۶ مولفه متناظر با ۶ درجه آزادی سکو در نظر گرفته می‌شود:

$$(۱۰) \quad \begin{aligned} (n_1, n_2, n_3) &= \vec{n} \\ (n_4, n_5, n_6) &= \vec{r} \times \vec{n} \end{aligned}$$

که در آن،  $\vec{r} = \vec{X} - \vec{X}_g$  بردار مکان هر نقطه روی سطح بدنه نسبت به مرکز ثقل در دستگاه مختصات ثابت است. بنابراین، مولفه‌های نیرو و ممان هیدرودینامیکی مرتبه اول را می‌توان به فرم کلی زیر نوشت:

در این مطالعه، از تئوری تفرق بر پایه پتانسیل مرتبه اول برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارده از موج به سکو استفاده شده است. بر اساس این تئوری نیروی موج شامل نیروی موج برخوردی (نیروی فرود کریلوف)، نیروی تفرق القا شده از موج اغتشاشی ناشی از حضور سکو و نیروی موج تشعشی ناشی از حرکات سکو است.

در امواج دامنه کوتاه می‌توان از تئوری پتانسیل موج مرتبه اول برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی موج استفاده کرد. بنابراین می‌توان روش جمع آثار خطی را برای فرمول‌بندی پتانسیل سرعت در داخل دامنه حل بکار گرفت. میدان جریان سیال ناشی از موج منظم در اطراف سکوی شناور با یک پتانسیل سرعت مختلط بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$(۱) \quad \phi(\vec{X}, t) = a_w \phi(\vec{X}) e^{-i\omega t}$$

که در آن، پتانسیل سرعت را می‌توان بصورت حاصل جمع سه ترم موج تشعشی (ناشی از ۶ درجه آزادی سکو)، موج برخوردی و موج تفرقی نوشت:

$$(۲) \quad \phi(\vec{X}) e^{-i\omega t} = \left[ (\phi_I + \phi_a) + \sum_{j=1}^6 \phi_{rj} x_j \right] e^{-i\omega t}$$

که در آن،  $\phi_I$  پتانسیل موج برخوردی،  $\phi_a$  پتانسیل موج تفرقی متناظر و  $\phi_{rj}$  پتانسیل موج تشعشی ناشی از حرکت درجه آزادی  $j$  ام در دامنه واحد است. پتانسیل سرعت مختلط برای موج برخوردی مرتبه اول در موقعیت  $\vec{X} = (X, Y, Z)$  در دستگاه مختصات ثابت از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$(۳) \quad \phi_I(\vec{X}, t) = \phi_I(\vec{X}) e^{-i\omega t} = \frac{ig a_w \cosh[Z+d]}{\omega \cosh(kd)} e^{i[-\omega t + k(X \cos \mu + Y \sin \mu) + a]}$$

که در آن،  $d$  عمق آب و  $g$  شتاب گرانش است. با استفاده از تئوری هیدرودینامیک خطی برای امواج تفرقی و تشعشی، تداخل سازه-موج را می‌توان توسط معادلات و شرایط مرزی مربوطه توصیف کرد. معادله لاپلاس:

$$(۴) \quad \nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} = 0$$

شرط مرزی سطح آزاد:

$$(۵) \quad -\omega^2 \phi + g \frac{\partial \phi}{\partial Z} = 0 \quad \text{on} \quad Z = 0$$

شرایط مرزی سطح جسم:

$$(M + M_a)\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (17)$$

$$= F_w + F_m$$

که در آن،  $F(t)$  نیروهای خارجی وارد بر سکو در هر لحظه از زمان است. این نیرو شامل نیروی موج  $F_w$  و نیروی مهار  $F_m$  است، که روابط آن در بخش‌های قبلی ارائه شد.  $M$  ماتریس جرم سکو است.  $M_a = [A_{jk}]$  و  $C = [B_{jk}]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم اضافه و میرایی هیدرودینامیکی و  $K$  ماتریس سختی هیدرواستاتیکی است.  $X(t)$ ،  $\dot{X}(t)$  و  $\ddot{X}(t)$  به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب مرکز ثقل سکو در شش درجه آزادی هستند.

### ۳- مدل هندسی سکو و شبکه محاسباتی تولید شده

در این مطالعه محاسبات عددی بر روی یک سکوی اسپار خرپایی واقعی که اخیراً در ساحل مالزی در میدان نفتی Kikeh در نزدیکی Saba نصب شده است انجام گردید. ابتدا هندسه این سکو در ابعاد واقعی مدل سازی شد. سپس، کل سطح بدنه سکوی اسپار توسط ابعاد واقعی ترکیبی مثلثی و مستطیلی گسسته سازی گردید.

حساسیت حل به تعداد المان‌های محاسباتی با شبکه‌های ۹۰۰۰ و ۱۱۰۰۰ سلول محاسباتی بررسی شد و با ریزترین کردن شبکه تا جایی که جوابها تغییر چندانی نکنند ادامه یافت. نهایتاً شبکه محاسباتی تولید شده شامل حدود ۱۳۰۰۰ المان تفرق برای محاسبه نیروی موج وارد شده به سطح خیس سکو با استفاده از تئوری تفرق انتخاب گردید. مشخصات سکوی مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین نمایی از سکوی واقعی و مدل هندسی تولید شده آن همراه با شبکه محاسباتی در شکل (۲) نشان داده شده است.

### ۴- اعتبارسنجی مدل عددی

قبل از استفاده از کد تجاری Aqwa برای بررسی آثار چیدمان خطوط مهار بر روی سکوی اسپار خرپایی Kikeh، ابتدا نتایج این کد با نتایج آزمایشگاهی موجود و نتایج عددی یک کد معتبر به نام DATspar مقایسه شده است. همانطور که در مقدمه ذکر شد موتاسیر و همکاران کد DATspar را بر پایه حل تئوری موریسون در متلب برای محاسبه پاسخ دینامیکی سکوی اسپار خرپایی توسعه دادند.

$$F_j e^{-i\omega t} = - \int_{S_0} p n_j ds \quad (11)$$

$$= [-i\omega \rho \int_{S_0} \varphi(\vec{X}) n_j dS] e^{-i\omega t}$$

که در آن،  $S_0$  سطح خیس بدنه است. با توجه به معادله (۲)، نیروی هیدرودینامیکی کل را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$F_j = \left[ (F_{Ij} + F_{Aj}) + \sum_{k=1}^6 F_{rjk} x_k \right] \quad j = 1, \dots, 6 \quad (12)$$

در معادله بالا، نیروی موج برخوردی، موج تفرق و موج تشعشی از انتگرال‌های زیر بدست می‌آیند:

$$F_{Ij} = -i\omega \rho \int_{S_0} \varphi_I(\vec{X}) n_j dS$$

$$F_{Aj} = -i\omega \rho \int_{S_0} \varphi_a(\vec{X}) n_j dS \quad (13)$$

$$F_{rjk} = -i\omega \rho \int_{S_0} \varphi_{rk}(\vec{X}) n_j dS$$

پتانسیل موج تشعشی را می‌توان به دو قسمت حقیقی و موهومی تقسیم کرد. در نهایت ضرایب میرایی (A)، و جرم اضافه (B)، را می‌توان از قسمت‌های حقیقی و موهومی پتانسیل مختلط موج تشعشی بدست آورد:

$$A_{jk} = \frac{\rho}{\omega} \int_{S_0} Im[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS \quad (14)$$

$$B_{jk} = -\rho \int_{S_0} Re[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS$$

### ۲-۲- نیروی سیستم مهار

برای بررسی آثار مهار در تحلیل در حوزه زمان، از سیستم مهار گسترده شامل خطوط کابل الاستیک خطی استفاده شده است. از جرم کابل نیز صرف نظر می‌شود. اگر  $K$  سختی خطی کابل و  $L_0$  طول کشیده نشده اولیه و  $\vec{X}_1(t)$  و  $\vec{X}_2(t)$  نقاط اتصال ابتدایی و انتهایی کابل در هر لحظه از زمان باشند، نیروی کشش خط مهار از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T = \begin{cases} K(L - L_0) & \text{if } L > L_0 \\ 0 & \text{if } L \leq L_0 \end{cases} \quad (15)$$

که در آن  $L$  طول کابل در هر لحظه از زمان بوده و از رابطه (۱۶) بدست می‌آید:

$$L = |\vec{X}_1(t) - \vec{X}_2(t)| \quad (16)$$

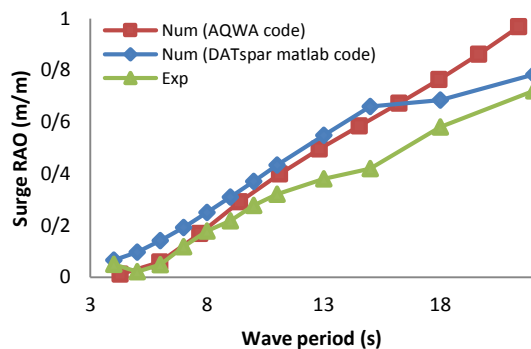
### ۲-۳- معادلات حرکت سکو

معادلات حرکت سکو، بصورت زیر است:

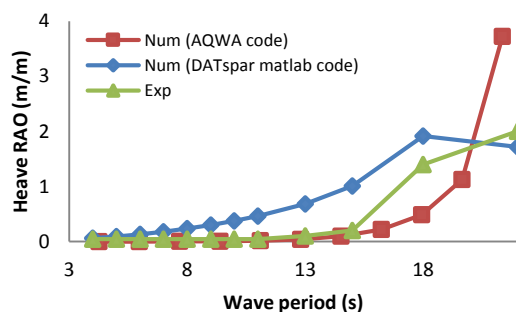
استفاده شده است که هر فنر نماینده یکی از این گروه‌های مهار با سختی معادل است. بنابراین، در اینجا مدل سکوی واقعی با اضافه کردن سختی سیستم مهار به ماتریس سختی هیدرواستاتیکی در نرم افزار Aqwa در امواج منظم با پریودهای مختلف شبیه سازی شده است. سپس نتایج بدست آمده برای مدل، به سکوی واقعی تعمیم داده شده و با نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی کد DATspar مقایسه شده است. این مقایسه‌ها در شکل‌های (۳) تا (۵)، برای اپراتور دامنه پاسخ<sup>۱</sup> سکو نشان داده شده است. می‌توان دید که انطباق خوبی بین نتایج کد Aqwa و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.

### ۵- نتایج و بحث

به منظور بررسی آثار چیدمان مهار بر حرکات سرج، هیو و پیچ سکو، سه چیدمان مختلف از یک سیستم مهار چهار تایی متقارن شامل چهار کابل خطی الاستیک در نظر گرفته شد و حرکات سکو در امواج منظم و نامنظم در این چیدمان‌ها در حوزه زمان تحلیل و مورد بررسی قرار گرفت.



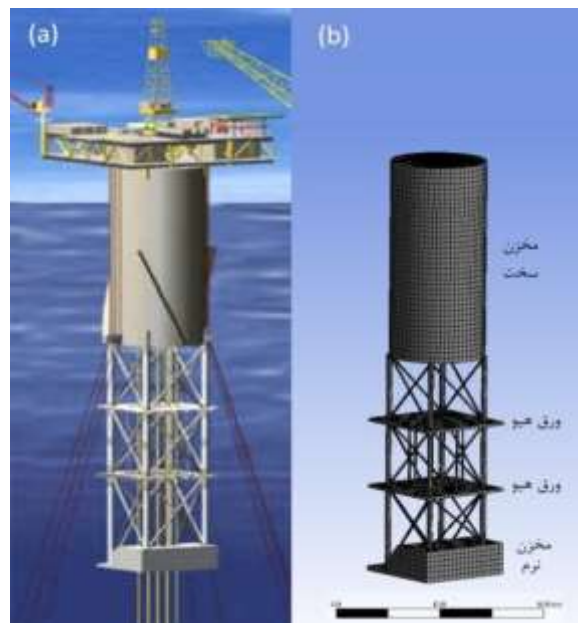
شکل (۳) مقایسه نتایج کد Aqwa با نتایج آزمایشگاهی و نتایج کد DATspar برای اپراتور دامنه پاسخ حرکت سرج.



شکل (۴) مقایسه نتایج کد Aqwa با نتایج آزمایشگاهی و نتایج کد DATspar برای اپراتور دامنه پاسخ حرکت هیو.

جدول (۱) مشخصات سکو.

| مقدار    | پارامتر                                       |
|----------|---|
| ۱۳۳۰     | عمق آب (m)                                    |
| ۱۳۱,۱۵   | آب‌خور کل (m)                                 |
| ۳۲,۳۳    | قطر مخزن سخت (m)                              |
| ۶۷       | ارتفاع مخزن سخت (m)                           |
| ۵۶,۴۲    | آب‌خور مخزن سخت (m)                           |
| ۱۰,۶۷    | ارتفاع مخزن نرم (m)                           |
| ۲        | تعداد ورق‌های هیو                             |
| ۳۲,۳۳    | اندازه ورق‌های هیو (m)                        |
| ۷۴,۶۸    | ارتفاع کل بخش خریایی (m)                      |
| ۵,۴۹     | فاصله نقاط اتصال مهار به بدنه از کف مخزن سخت  |
| ۴۷e۳     | جرم سکو (kg)                                  |
| ۴۰,۱۲۹   | فاصله مرکز ثقل از سطح متوسط آب (m)            |
| ۱,۱۶۵e۱۱ | ممان اینرسی جرمی حرکت پیچ (kgm <sup>۲</sup> ) |



شکل (۲) نمایی از (a) اسپار Kikeh، (b) مدل هندسی تولید شده همراه با شبکه محاسباتی (پنل).

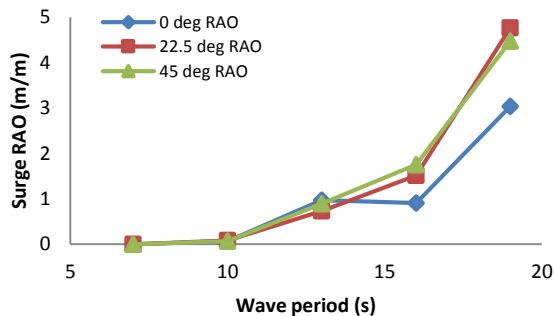
آن‌ها نتایج کد خود را، برای سکوی اسپار ارائه شده در جدول (۱) و شکل (۲)، با نتایج تست مدل اعتبارسنجی کردند [۱۲]. سکوی اسپار واقعی دارای ۱۰ خط مهار است که در چهار گروه مختلف حول سکو گسترش یافته‌اند. برای مدل سازی این سیستم مهار در آزمایشگاه از چهار فنر

<sup>۱</sup>Response Amplitude Operator

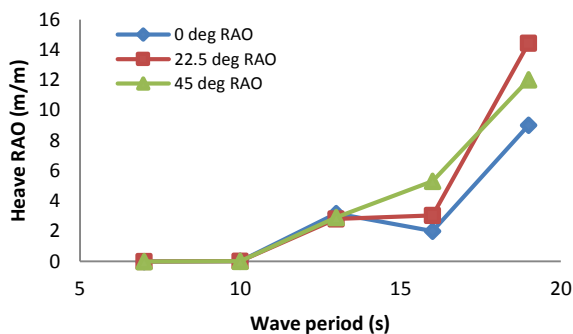
جدول (۳) مشخصات امواج منظم برخوردی.

| موج | دامنه (m) | پریود (s) |
|-----|-----------|-----------|
| ۱   | ۶         | ۷         |
| ۲   | ۶         | ۱۰        |
| ۳   | ۶         | ۱۳        |
| ۴   | ۶         | ۱۶        |
| ۵   | ۶         | ۱۹        |

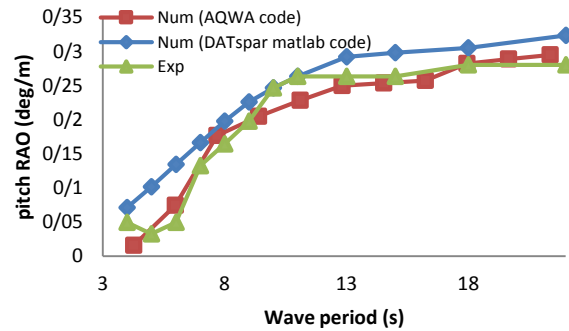
حرکات سرج، هیو و پیچ سکو در هر یک از امواج منظم در حوزه زمان محاسبه شده است. محاسبات در مدت زمان ۳۰۰۰ ثانیه و گام زمانی ۰,۰۱ ثانیه انجام شده است. نمودارهای RAO برای چیدمان‌های مختلف مهار در شکل‌های (۶) تا (۸) نشان داده شده است. می‌توان دید که تغییر زاویه مهار در پریودهای کوچک موج (در اینجا حدوداً تا ۱۳ ثانیه) تاثیر ناچیزی بر روی دامنه حرکات دارد. اما در پریودهای بزرگتر این اثر قابل ملاحظه است. بطور کلی با افزایش زاویه مهار از ۰ تا ۴۵ درجه دامنه حرکات افزایش می‌یابد. در شکل (۹)، تغییرات موقعیت متوسط عمودی مرکز ثقل سکو در پریودهای مختلف نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش پریود موج، فاصله موقعیت متوسط سکو از سطح آزاد افزایش می‌یابد.



شکل (۶) دامنه پاسخ حرکت سرج در چیدمان‌های مختلف مهار.



شکل (۷) دامنه پاسخ حرکت هیو در چیدمان‌های مختلف مهار.



شکل (۸) مقایسه نتایج کد Aqwa با نتایج آزمایشگاهی و نتایج کد DATspar برای اپراتور دامنه پاسخ حرکت پیچ.

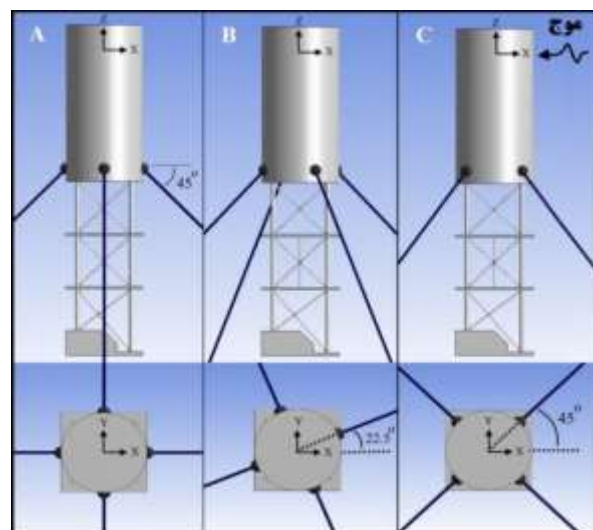
زوایای خطوط مهار نسبت به جهت موج در این سه چیدمان، در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین نمایی از چیدمان‌های مهار مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است.

### ۵-۱- تحلیل در امواج منظم

برای محاسبه دامنه پاسخ حرکات سرج، هیو و پیچ، از امواج منظم با پریودهایی معادل با شرایط عملیاتی سکو در دریا استفاده گردید. مشخصات امواج منظم در جدول (۳) آورده شده است.

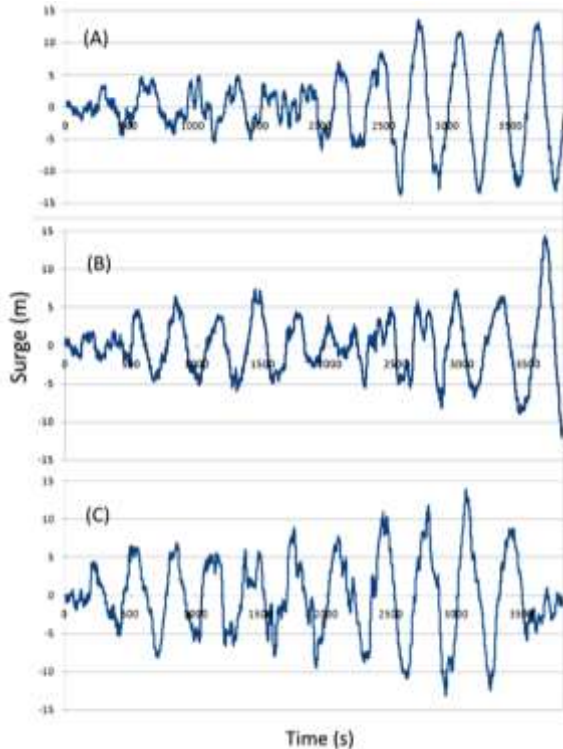
جدول (۲) زوایای خطوط مهار در چیدمان‌های مختلف

| چیدمان‌ها | زوایای خطوط مهار (deg)    |
|-----------|---------------------------|
| چیدمان A  | ۰, ۹۰, ۱۸۰, ۳۶۰           |
| چیدمان B  | ۲۲,۵, ۱۱۲,۵, ۲۰۲,۵, ۲۹۲,۵ |
| چیدمان C  | ۴۵, ۱۳۵, ۲۲۵, ۳۱۵         |

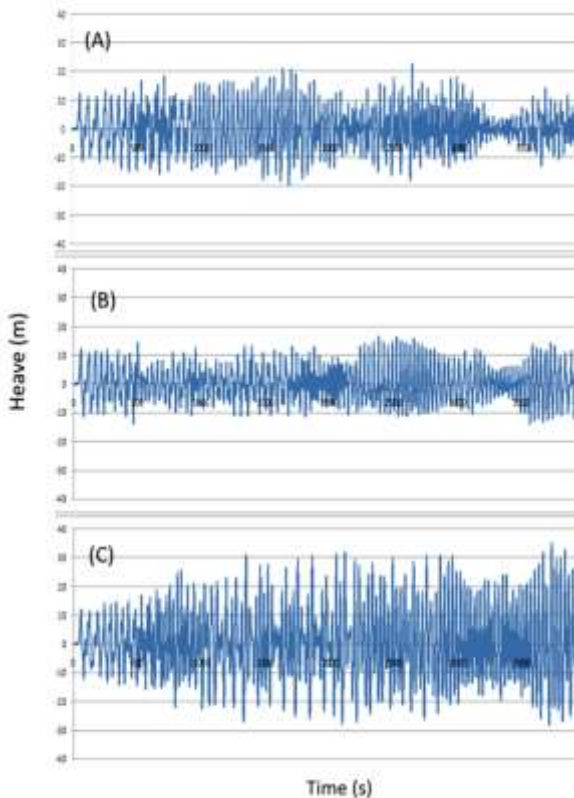


شکل (۵) چیدمان‌های مورد مطالعه سیستم مهار

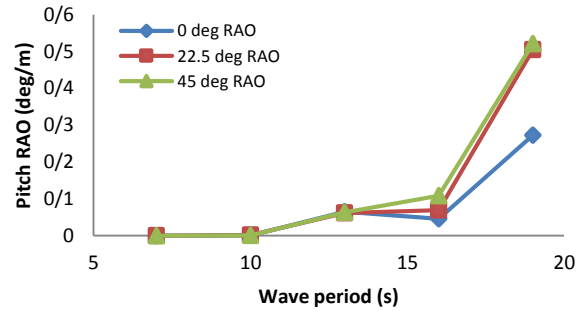




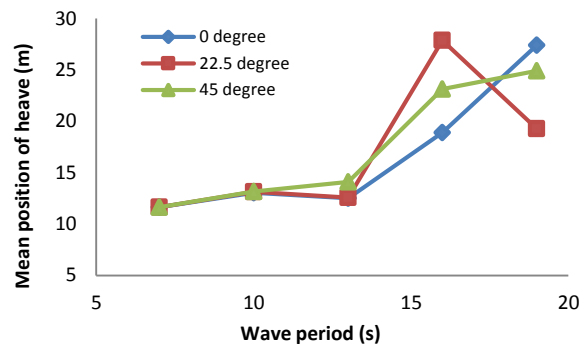
شکل (۱۰) پاسخ زمانی حرکت سرچ در موج نامنظم برای چیدمان‌های مختلف مهار.



شکل (۱۱) پاسخ زمانی حرکت هیو در موج نامنظم برای چیدمان‌های مختلف مهار.



شکل (۸) دامنه پاسخ حرکت پیچ در چیدمان‌های مختلف مهار.



شکل (۹) فاصله موقعیت متوسط عمودی سکو از سطح آب در چیدمان‌های مختلف مهار.

همچنین، در پریودهای کوچک، تاثیر زاویه مهار بر روی موقعیت متوسط سکو ناچیز است. این اثر در پریودهای بزرگ قابل توجه است و تغییرات آن بستگی به پریود موج دارد.

## ۵-۲- تحلیل در موج نامنظم

پاسخ دینامیکی سکو در یک موج نامنظم، برای چیدمان‌های مهار ارائه شده در جدول (۲) مورد تحلیل قرار گرفت. موج نامنظم انتخاب شده، یک موج با طیف جانسواپ<sup>۱</sup> با ارتفاع مشخصه ۶ متر و پریود پیک ۱۳ ثانیه (منطبق بر موج طراحی سکوی مورد نظر در ساحل مالزی) است. تحلیل در حوزه زمان با گام زمانی ۰,۰۱ ثانیه و مدت زمان ۱۰۰۰۰ ثانیه انجام شد، بطوریکه سری زمانی موج نامنظم تولید شده، حداقل شامل ۱۰۰ مولفه موج منظم باشد. پاسخ زمانی حرکات سرچ، هیو و پیچ برای چیدمان‌های مختلف A, B و C به ترتیب در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) برای ۴۰۰۰ ثانیه اول نشان داده شده است. مقادیر متوسط دامنه حرکات نیز در جدول (۴) ارائه شده است.

<sup>۱</sup> JONSWAP



گرفت. مدلسازی به کمک کد تئوری تفرق Aqwa انجام شد. ابتدا کد تجاری Aqwa با نتایج آزمایشگاهی موجود و نتایج یک کد عددی معتبر مقایسه و اعتبار سنجی شد. سپس حرکات سکو در سه درجه آزادی سرج، هیو و پیچ در سه چیدمان مختلف از یک مهار چهارتایی (شامل زوایای خطوط مهار ۰، ۲۲،۵ و ۴۵ درجه نسبت به موج) بررسی شد. بطور کلی نتایج زیر را می توان از این تحقیق بدست آورد:

سازگاری خوب بین نتایج عددی بدست آمده از کد تجاری Aqwa و نتایج آزمایشگاهی نشان داد که کد تفرق Aqwa را می توان با دقت خوبی برای محاسبه حرکات سکوی اسپار خرابایی در موج بکار گرفت.

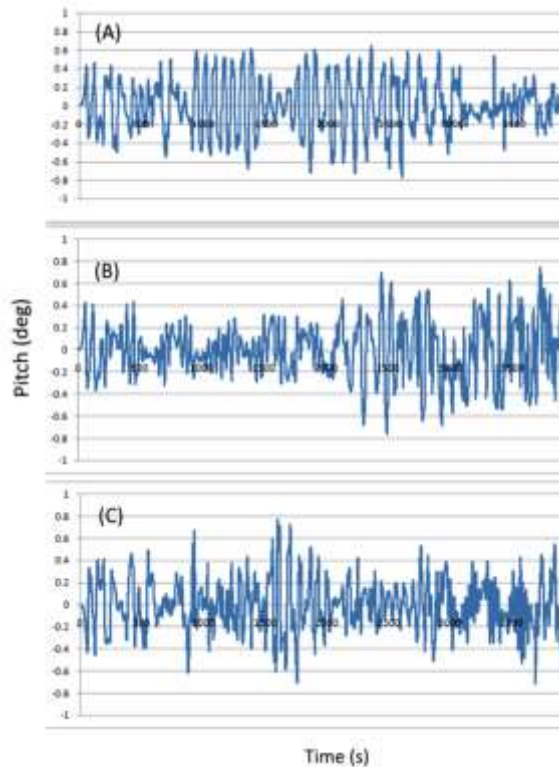
کد آکوا که با بکارگیری تئوری تفرق این پدیده را در نظر می گیرد تطابق بهتری نسبت به کد DATspar برای اپراتور دامنه پاسخ حرکات نسبت به آزمایشگاهی دارد. مفهوم این تطابق بهتر اینست که حذف تفرق در این سکوها باعث ایجاد خطا می گردد. و مدلسازی انجام شده در این تحقیق دقیقتر از کارهای قبلی است.

- بررسی حرکات سکو در موج در چیدمان های مختلف مهار نشان داد که اثر تغییر زاویه مهار نسبت به موج در پرپیادهای کوچک موج بسیار ناچیز است، ولی در پرپیادهای بزرگ قابل ملاحظه است. بطور کلی، دامنه حرکات با افزایش زاویه مهار نسبت به موج افزایش می یابد.

- مطالعه حرکات سکو در موج نامنظم نشان داد که با افزایش زاویه مهار از ۰ به ۲۲،۵ درجه و سپس از ۲۲،۵ به ۴۵ درجه، ابتدا دامنه متوسط حرکات کاهش و سپس افزایش می یابد و کمترین دامنه متوسط حرکات در زاویه ۲۲،۵ درجه رخ می دهد.

#### ۷- مراجع

- [1] Chakrabarti, S.K. "Handbook of Offshore Engineering", Elsevier, Vol.1, No.2, , 2005.  
 [2] Downie, M.J., Graham, J.M.R., Hall, C., Incecik, A., and Nygaard, I., "An Experiment Investigation of Motion Control Devices for Truss Spars", Marine Structures, Vol.13, pp.75-90, 2000.  
 [3] Sadeghi, K., Incecik, A. and Dowine, M.J., "Response Analysis of a Truss Spar in the Frequency Domain", Journal of Marine Science and Technology, Vol.8, pp.126-137, 2004.  
 [4] Wang, J., Berg, S., Luo, H. Y., Sablok, A. and Finn, L., "Structural Design of the Truss Spar: an Overview", Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Stavanger, Norway, pp.354-361, 2001.



شکل (۱۲) پاسخ زمانی حرکت پیچ در موج نامنظم برای چیدمان های مختلف مهار.

جدول (۴) مقادیر متوسط دامنه حرکات در موج نامنظم برای چیدمان های مختلف.

| مقدار متوسط دامنه سرج (m)   |      |       |
|-----------------------------|------|-------|
| A                           | B    | C     |
| 4.26                        | 3.22 | 4.19  |
| مقدار متوسط دامنه هیو (m)   |      |       |
| C                           | C    | C     |
| 6.04                        | 4.95 | 10.51 |
| مقدار متوسط دامنه پیچ (deg) |      |       |
| C                           | C    | C     |
| 0.23                        | 0.19 | 0.21  |

می توان دید که دامنه متوسط حرکات با تغییر زاویه چیدمان از ۰ درجه به ۲۲،۵ درجه، کاهش و از ۲۲،۵ درجه به ۴۵ درجه، افزایش می یابد. بنابراین کمترین دامنه حرکات در چیدمان B (زاویه ۲۲،۵) رخ می دهد.

#### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق آثار چیدمان خطوط مهار بر روی پاسخ هیدرودینامیکی یک سکوی اسپار خرابایی در ابعاد واقعی که اخیراً در ساحل مالزی نصب شده است، در موج منظم و نامنظم به صورت عددی در حوزه زمان مورد بررسی قرار

- [5] Wang, J., Zhang, B. and Berg, S., "Truss Spar Time Domain in Place Structural Strength Analysis", Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2002.
- [6] Mekha, B.B., Johnson, C.P. and Roesset, J.M., "Nonlinear Response of a Spar in Deep Water: Different Hydrodynamics and Structural Models", Proceeding of the 5th International Offshore and Polar Engineering Conference, The Hague, The Netherlands, pp.462-468, 1995.
- [7] Mekha, B.B., Johnson, C.P. and Roesset, J. M., "Effect of Second Order Diffraction Forces on the Global Response of Spars", Proceeding of the 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles, USA, pp.273-280, 1996.
- [8] Agarwal, A. K. and Jain, A.K., "Dynamics Behaviour of Offshore Spar Platform Under Regular Sea Waves", Ocean Engineering, Vol.30, pp.487-516, 2003.
- [9] Anam, I., Rosset, J.M. and Niedzwecki, J.M., "Time Domain and Frequency Domain Analysis of Spar Platforms", Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, pp.240-247, 2003.
- [10] Spanos, P.D., Ghosh, R., Finn, L.D., and Halkyard, J., "Coupled Analysis of a Spar Structure: Monte Carlo and Statictical Linearization Solutions", Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering, Vol.127, pp.11-16, 2005.
- [11] Ketabdari, M.J., Mirzayie S., "Dynamic Analysis of Interaction between Linear Waves and Spar Floating Platform", Civil Engineering Infrastructures Journal, Vol.45, pp.45- 52, 2011.
- [12] Montasir, O.A., Yenduri, A., Kurian, V. J., "Effect of Mooring Line Configurations on the Dynamic Responses of Truss Spar Platforms", Ocean Engineering, Vol.96, pp.161-172, 2015.