بررسی رفتار تاندون ها و سکوی پایه کششی در حالت صدمه دیده

محمدسعید سیف[۱*]، محمدرضا تابش‌پور[۲]

[۱] استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu
[۲] استادیار، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ tabeshpour@sharif.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰
تاریخ انتشار مقاله:۱۳۹۲/۱۲/۲۸

کلمات کلیدی:
سکوی ISSC TLP
المان مرزی
پارگی تاندون
تئوری تفرق

چکیده

در این مقاله به آنالیز هیدرودینامیکی سکوی ISSC TLP در حالت صدمه دیده ناشی از انقطاع یک تاندون پرداخته شده‌است. هدف از این مهم، پرداختن به رفتار سکو در حین قطع یک تاندون ناشی از شرایط نامناسب دریایی می‌باشد. در بخش اول این مقاله به مدل‌سازی سکو و شرایط محیطی پرداخته شده و با قطع یک تاندون، اثرات گذرا روی تاندون‌های دیگر ارزیابی شده و نتایج نیروهای پایدار نیز با نتایج تحلیلی صحت سنجی شده‌است. در ادامه نیز، تاریخچه زمانی ۶ درجه آزادی، شتاب سرج و هیو و تغییرات نیروی تاندون‌ها، در امواج با پریود و ارتفاع مشخص استخراج شده است. به منظور انجام آنالیز هیدرودینامیکی این سازه شناور، از یک نرم افزار المان مرزی چندمنظوره استفاده گردید. نتایج نشان می-دهد مدل‌سازی بنحو مناسب صورت پذیرفته و تعیین الگوی رفتار سکو در حالت صدمه‌دیده در امواج منظم امکان‌پذیر می‌باشد.

Investigation of tendons and TLP behavior in damaged condition

Mohammad Saeid Seif [1*], Mohammad Reza Tabeshpour[2]

[1] Professor, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles, Sharif University of Technology; seif@sharif.edu
[2]Assistant Professor, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles, Sharif University of Technology; Tabeshpour@sharif.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 19 Dec. 2013
Accepted: 11 Mar. 2014
Available online: 19 Mar. 2014

Keywords:
ISSC TLP
Tendon Disconnection
Boundary Element
Diffraction theory

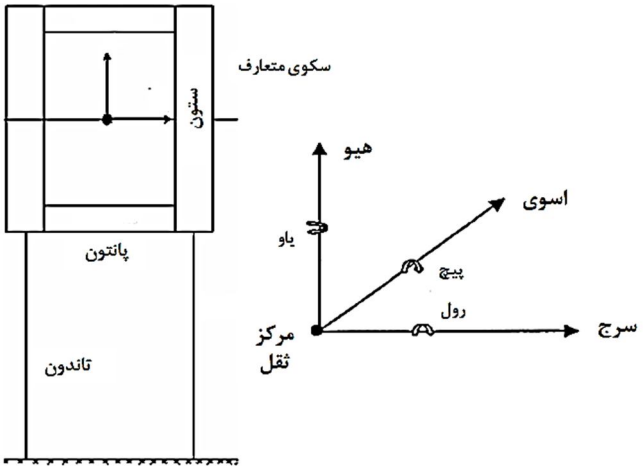
ABSTRACT

This paper evaluates the hydrodynamic performance of a damaged ISSC TLP which is caused by a tendon disconnection. Performance evaluation of a TLP with a disconnected tendon in a rough sea state is the major aim of this paper. First off, modeling of a platform in a proper sea state is carried out and then after disconnecting one of the tendons, the transient effect on the other tendons is assessed. Also, the steady state forces are validated using analytical results. Additionally, time history of heave and surge accelerations, TLP six degree of freedom motions and also tendon forces are determined in regular waves. In order to assess the hydrodynamic performance of the platform, a numerical simulation is conducted, using multipurpose boundary element software. At last the analysis shows that the modeling of a damaged platform is carried out properly and also the conclusion can be drawn that it is possible to evaluate the performance of a damaged platform in Regular waves.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]

۱ - مقدمه

از آنجا که جستجوی منابع نفت و گاز به سوی آب های عمیق (بیش از ۴۰۰ متر) پیش رفته است، استفاده از سکو های ثابت به علت ممان خمشی زیاد ناشی از افزایش طول اعضا، عملا در آب عمیق غیر ممکن می باشد. از این رو با توجه به افزایش روند طراحی سازه های فراساحلی جدید، استفاده از سکوهای پایه کششی و نیمه شناور و اسپار در اعماق زیاد پیشرفت چشم گیری کرده است. حرکت سکوهای پایه کششی در راستای سه درجه آزادی به صورت تطبیقی بوده (هیو، یاو، اسوی) که پریود طبیعی این حرکات زیاد می باشد و در راستای سه درجه آزادی دیگر (رول، پیچ، هیو) سخت بوده و پریود طبیعی کم می باشد. این فرایند ناشی از پیش کشیدگی اعمال شده توسط تاندون ها می باشد. ایده کلیدی در سازه های تطبیقی، کمینه کردن مقاومت سازه در برابر بارهای محیطی، از طریق انعطاف پذیر کردن سازه می باشد. سازه های تطبیقی باید به صورت دینامیکی طراحی شوند. نکته مهم آن است که در اینگونه سازه ها اثرات غیر خطی شدیدی وجود دارد. شکل ۱ سکوی پایه کششی چهار ستونه همراه با درجات آزادی آن را نشان می دهد.



شکل ۱- سکوی پایه کششی چهار ستونه همراه با درجات آزادی آن

با توجه به این که سکوهای متعارف[1]، سکوهای چهارگوشی هستند که از ستونهای دایره‌ای و پانتونهای دایره‌ای یا مستطیلی تشکیل شده‌اند، ISSC TLP نوع خاصی از سکوهای متعارف می‌باشد که توسط کمیته بین‌المللی سازه کشتی[2] معرفی شده‌است. در پروژه حاضر سعی شد با استفاده از امکانات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی یک نوع بسته نرم افزاری چند منظوره مدل‌سازی سازه های فراساحلی به مطالعه رفتار سکوی پایه کششی ISSC TLP در امواج در حالت صدمه دیده ناشی از پارگی (قطع) یک تاندون و تأثیر گذاری این رفتار در نیروی تاندون های دیگر پرداخت. این نرم افزار از روش المان مرزی به استخراج نتایج و تحلیل آن می پردازد که در ادامه شرح مختصری از تحلیل هیدرودینامیکی سکو و حرکات و عملگرهای دامنه پاسخ نیز ارائه شده است. هدف از مقاله حاضر روش شناسی و بررسی رفتار سکوی پایه کششی بهنگام پارگی یک تاندون از ۱۲ تاندون ناشی از شرایط بد محیطی یا اشکال در اتصالات احتمالی تاندون می باشد. علاوه بر آن به آنالیز شتاب سرج و هیو ، نیروی تاندون ها و بررسی رفتار نوسانی این نیروها در حین پارگی یک تاندون و مقایسه این نیروها با مقادیر تحلیلی محاسبه شده نیز در ستون های مختلف پرداخته شده است. در راستای فرایند مدل‌سازی سکوی پایه کششی چه با استفاده از نرم افزار و چه به صورت آزمایشگاهی و تحلیل این سازه در شرایط آسیب دیده فعالیتهای پژوهشی مختلفی سرتاسر جهان صورت پذیرفته است که به تعدادی از آنها اشاره می شود.

تان و گای (۱۹۸۱) به بررسی مدل یک سکوی پایه کششی چهار ستونه ISSC TLP در عمق ۴۵۰ متر در امواج منظم و نامنظم پرداختند. هدف از این آزمایشات تصدیق نتایج محاسبات صورت گرفته برای سکوی پایه کششی با استفاده از تئوری پتانسیل سه بعدی بوده است. حل عددی این سکو بر پایه تئوری پتانسیل خطی صورت پذیرفته است. مقایسه بین تحلیل عددی و آزمایشگاهی در این مقاله منوط به حرکت نوسانی سکوی پایه کششی ناشی از فرکانس برخورد موج و نیروهای موجود در تاندون های مهار می باشد[۱]. رویتمن و آندرید و باتیستا (۱۹۹۰) در ریو د جنیرو برزیل به آنالیز مدل سکوی پایه کششی چهار ستونه با مقیاس کوچک برای تعیین پاسخ دینامیکی سازه در امواج پرداختند[۲]. ضریب تشابه ابعادی در این آزمایشات برابر ۱/۱۷۹ در مدل‌سازی آب عمیق برای این مدل کوچک در نظر گرفته شد. مقایسه حل عددی و آزمایشگاهی برای تست ضربه و موج، تعیین ضرایب درگ و اینرسی مناسب، از جمله اهداف این آزمایشات، بوده است. زنگ ژایو و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی تحلیلی رفتار غیر خطی سکوی پایه کششی ISSC TLP برای عمق ۴۵۰ متر پرداختند[۳]. این بررسی منوط به امواج منظم بوده و اثرات درگ ویسکوز و کوپل ۶ درجه آزادی مدنظر قرار گرفته است. زهرا تاجعلی (۲۰۰۸) به بررسی رفتار هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی اسکله های شناور زنجیره ای با استفاده از نرم افزار Moses و Wamit پرداخت[۴]. در نهایت تأثیر پارامتر های مختلف بر اسکله تک بدنه، رفتار اسکله چند بدنه و تأثیر اتصالات روی رفتار اسکله شناور در نرم افزارهای نام برده بررسی شد. محمدرضا تابش پور و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثر میراگر جرمی تنظیم شده بر روی نوسانات قائم سکوی پایه کششی با استفاده از نرم افزار Moses پرداختند[۵]. این بررسی در نهایت به کاهش ۲۰ تا ۵۰ درصدی مقدار جابجایی قائم در هنگام اعمال بارگذاری موج هارمونیک شده است. آقای یانگ و همکاران (۲۰۱۰) به تحلیل عددی اثرات ناشی از پارگی یک تاندون بر رفتار سکوی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]

پایه کششی از نوع گسترش یافته با توجه به شرایط بد دریایی در خلیج مکزیک پرداختند. در این تحلیل عددی با در نظر گرفتن کوپل سازه، مهار و رایزر و لحاظ کردن اثرات مرتبه دوم موج، به بررسی اثرات انتقالی در شش درجه آزادی سکوی پایه کششی از نوع گسترش یافته صدمه دیده پرداخته شده‌است[۶]. در تحقیق حاضر سکوی پایه کششی متعارف تنها تحت تاثیر موج قرار گرفته و اثرات پارگی تاندون بر دینامیک سکو و رفتار ۶ درجه آزادی آن بررسی می شود. از اثرات مرتبه دوم موج صرفنظر شده و رایزر در نرم افزار مدل‌سازی نشده است.

۲ – مدل‌سازی عددی

نرم افزار چند منظوره مدل‌سازی سازه های فراساحلی به روش المان مرزی، جرم افزوده، دمپینگ تشعشعی و نیروهای هیدرودینامیکی را از فشار هیدرودینامیکی روی سطح تعیین می کند. به علاوه برای تعیین نیروهای هیدرودینامیکی مرتبه دوم از فشار مرتبه اول استفاده می کند. این نیروهای مرتبه دوم برای اکثر مدل‌سازی ها قابل صرف نظر کردن می باشد و اهمیت زیادی ندارد اما در سازه هایی که دارای خطوط مهار می باشد این نیروها نیز حائز اهمیت می باشد. جهت تحلیل دینامیکی سکوی ISSC TLP و بمنظور محاسبه نیروی موج وارد بر سازه در این نرم افزار از تئوری تفرق استفاده شده است. با تشکیل المان های سازه ای در تعریف مدل ISSC TLP در نرم افزار و اعمال مش المان مرزی، ترمهای مختلف دمپینگ، جرم افزوده و نیرو بصورت زیر محاسبه می شوند.

- دمپینگ تشعشعی: مش تفرق
- جرم افزوده: مش تفرق
- دمپینگ ویسکوز: دمپینگ تاناکا در مش تفرق(فقط برای تحلیل تاریخچه زمانی بدلیل عدم اعمال ویسکوزیته)
- بویانسی: المان های سازه ای، مش تفرق
- نیروی باد: المان های سازه ای
- وزن: المان های سازه ای
- نیروهای مرتبه دوم موج: مش تفرق

۲ – ۱ - اتصالات و خطوط مهار

اتصالات، به المان‌هایی در نرم افزار، الحاق می شود که کار اتصال شناور و سکو به اسکله یا سازه ساحلی و فراساحلی دیگر را بر عهده دارند. این اتصالات توسط کاربر با فرمان‌ها و کلاس های مختلف مدل‌سازی می شود. کلیه اتصالات در این نرم افزار عبارتند از خطوط مهار، خطوط مهار مقلد (خطوط مهار کشیده شده، خطوط مهار فشرده شده، خطوط مهار با قابلیت کششی و فشاری)، اتصالات مربوط به یدک کش ها، شمع ها، فنرها، اتصالات ثابت، اتصالات با درجات آزادی مختلف، اتصالات تسمه ای، اتصالات مربوط به آب اندازی شناورها و سازه های فراساحلی، اتصالات مربوط به خطوط انتقال نفت از سازه به یدک کش یا از سازه به کف دریا و ساحل.

خطوط مهار از جمله زیرگروه های این اتصالات می باشد که اصولا برای مهار سکوهای نیمه شناور، اسکله های شناور، سکوهای پایه کششی، اسپار و ..... مورد استفاده قرار می گیرد و به کف دریا متصل می شود. برای سکوهای پایه کششی نیز باید از المان تاندون استفاده نمود. مدول الاستیسته در این المان، برابر مدول الاستیسیته فولاد، که جهت مهار سکوی پایه کششی در واقعیت استفاده می‌شود، در نظر گرفته شده‌است. تاندون باید طوری تعریف شود که نقاط ابتدایی و انتهایی اتصال آن (به ترتیب روی سازه و در عمق آب) دقیقا روی همدیگر قرار گیرند. برای تاندون می توان قطر خارجی، ضخامت، مقادیر پیش کشیدگی و کلیه الزامات مدل-سازی تاندون را لحاظ نمود. آنالیزهای طراحی اعم از آنالیز پارگی، آنالیز تنش، آنالیز خستگی روی این خطوط مهار می تواند صورت پذیرد. خروجی های هیدرودینامیکی و سازه‌ای عبارتند از:

- ضرایب جرم افزوده و ضرایب میرایی در ۶ درجه آزادی
- دامنه پاسخ و فازهای حرکات در شش درجه آزادی برای فرکانس ها و جهات مختلف امواج به صورت اپراتور دامنه پاسخ
- مقادیر نیروها در خطوط مهار و اتصالات
- موقعیت و شتاب و سرعت ۶ درجه آزادی نقاط مرجع سازه در حالت سالم و صدمه دیده
- تراز سطح آب و دامنه حرکات نقاط نسبت به هم

۳ - معادلات اساسی حاکم

۳-۱ - تئوری تفرق سه بعدی[۳](مبنای تحلیل المان مرزی)

در تئوری تفرق نیروی موج توسط محاسبه انتگرال فشار روی سطح خیس شده جسم بدست می آید. این روش زمانی قابل استفاده است که اولا ابعاد جسم در مقایسه با دامنه حرکت موج بزرگ باشد و بتوان از نیروهای ناشی از ویسکوزیته سیال صرف نظر کرد، ثانیا جسم آنقدر بزرگ باشد که ابعاد آن در برابر طول موج دریا قابل توجه بوده و میدان موج را در اثر تفرق و انتشار موج تحت تأثیر قرار دهد. در تئوری تفرق، میدان جریان سیال توسط تابع پتانسیل جریان بیان می شود. بنابراین باید تابع پتانسیل در معادله لاپلاس صدق کند و همچنین شرایط مرزی اعم از شرط مرزی سطح جسم، شرط مرزی سطح آزاد و بستر دریا و شرط مرزی بینهایت، ارضا شوند[۹]. با استفاده از اصل برهم نهی پتانسیل ها می توان اظهار داشت که پتانسیل کلی از سه ترم پتانسیل موج برخوردی، پتانسیل موج متفرق شده و پتانسیل حاصل از ۶ درجه آزادی جسم در آب ساکن به وجود می آید. جمع پتانسیل امواج و پتانسیل حاصل از تفرق موج، بیانگر پتانسیل فرود-کریلف[۴] می‌باشد:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]

$$\phi_t = \phi_I + \phi_D + \sum_{R=1}^{6} \phi_R \qquad (۱)$$

ϕ_I پتانسیل موج برخوردی، ϕ_D پتانسیل موج متفرق شده و ϕ_R پتانسیل ناشی از حرکت سازه در هر یک از درجات آزادی شش گانه سکو می باشد.

تابع پتانسیل برای جریان نامتراکم، غیر ویسکوز و غیر چرخشی از حل معادله لاپلاس بدست می آید که به صورت معادله (۲) بیان می شود:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad or \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \qquad (۲)$$

به منظور استفاده از روش المان مرزی در این نرم افزار علاوه بر در نظر گرفتن معادله لاپلاس و شرایط مرزی ، از خاصیت دوم گرین نیز استفاده می شود. این خاصیت، شرایط خاص حل مسئله المان مرزی را از فضای سه بعدی به فضای دو بعدی منتقل می‌کند.

شرط مرزی بستر با فرض اینکه مبدا مختصات روی سطح آب قرار دارد برابر معادله (۳) می باشد.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad in \quad z = -h \qquad (۳)$$

شرط مرزی روی سطح آزاد از معادله (۴) پیروی می‌کند.

$$g \frac{\partial \phi}{\partial z} - \omega^2 \phi = 0 \qquad (۴)$$

ω فرکانس برخورد موج می باشد. شرط مرزی سینماتیکی روی بدنه نیز مطابق با معادله (۵) می باشد.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \vec{v} . \vec{n} \qquad (۵)$$

$\vec{n}$ بردار نرمال سطح می‌باشد. $\vec{v}$ برای تعیین ترم پتانسیل تشعشعی برابر بردار سرعت جسم بوده و در تعیین پتانسیل امواج منظم، سرعت سیال در برخورد با سازه است. شرط منطقه دور (شرط انتشار) برای معادله لاپلاس به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$|\nabla \phi| \to 0 \quad when \ z \to -\infty \qquad (۶)$$

معادله (۷) ساده شده خاصیت دوم گرین برای معادله لاپلاس می باشد.

$$\varepsilon_{(P)} \phi = -\int_{\Gamma} \left(\nu \ \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial \nu}{\partial n} \right) ds \qquad (۷)$$

$\varepsilon_{(P)}$ نماد تابع گرین و مقدار آن، هنگامی که نقطه p درون دامنه بررسی باشد برابر ۱، روی مرز باشد برابر ۰/۵ و در نقاط دیگر صفر است. بار موج، جرم افزوده و دمپینگ نیز از معادلات (۸) و (۹) تعیین می شود.

$$\overrightarrow{F_j} = i\,\omega\rho \iint_S \phi \overrightarrow{n_j} dS \qquad (۸)$$

$$R(\omega) + i\,\omega m_r(\omega) = -i\,\omega\rho \iint_S \phi_j \frac{\partial \phi_j}{\partial n} dS \qquad (۹)$$

$\overrightarrow{F_j}$ بردار نیروی موج المان jام، مقدار $R(\omega)$ مقدار دمپینگ و $m_r(\omega)$ جرم افزوده می باشند.

فشار سیال روی سازه در نرم افزار از دو ترم فشار هیدرواستاتیکی و فشار هیدرودینامیکی تشکیل شده است. تغییرات زمانی پتانسیل، عامل ایجاد نیروهای هیدرودینامیکی می باشد. با عنایت به این موضوع، فشار کلی از طریق معادله (۱۰) بدست می آید:

$$\frac{p}{\rho} = -gz - \frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad (۱۰)$$

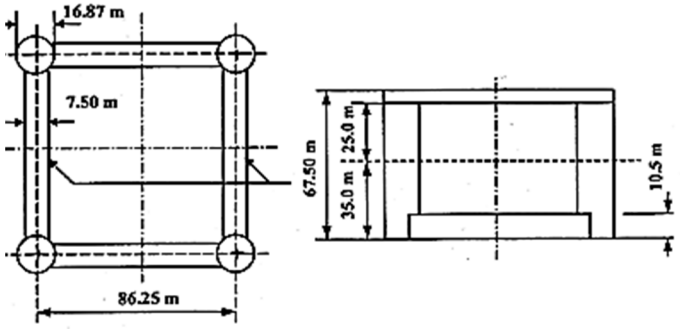
فشار هیدرودینامیکی نیز با توجه به معادله (۱۱) قابل محاسبه می باشد.

$$p_h = -i\,\omega\rho\phi \qquad (۱۱)$$

نرم افزار، تمامی ضرایب هیدرودینامیکی مانند جرم افزوده، ماتریس میرایی و دیگر مشخصات هیدرودینامیکی را بدست آورده و ذخیره می نماید. در نهایت با در نظر گرفتن کلیه نیروهای حاصل از موج و کوپلینگ حرکات ۶ درجه آزادی و حل معادلات حرکت کوپل، تاریخچه زمانی حرکات قابل استحصال است.

۴ - ملاحظات ابعادی سکوی پایه کششی ISSC TLP

جدول ۱، مشخصات سکوی ISSC TLP به همراه تاندون های متصل به آن را نشان می دهد. شکل ۲ به ترتیب از چپ به راست پلان و نمای این سکو را ارائه می دهند.



شکل ۲- ابعاد سکوی ISSC TLP

مشخصات سکوی ISSC TLP در جدول ۱ ارائه شده‌است.

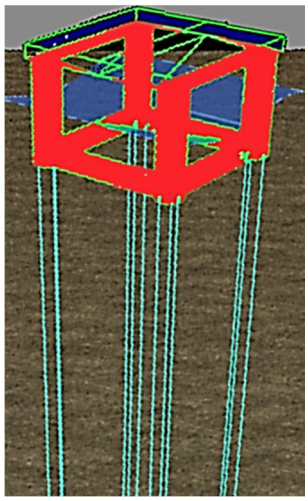
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]

جدول ۱- مشخصات سکوی ISSC TLP به همراه تاندون

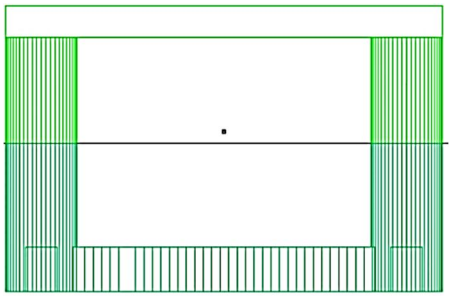
آبخور $[m]$	۳۵
جابجایی $[kg]$	$۵۴/۵\times۱۰^{۶}$
جرم $[kg]$	$۴۰/۵\times۱۰^{۶}$
ممان اینرسی roll $[kg.m^2]$	$۸۲/۳۷\times۱۰^{۹}$
ممان اینرسی pitch $[kg.m^2]$	$۸۲/۳۷\times۱۰^{۹}$
ممان اینرسی yaw $[kg.m^2]$	$۹۸/۰۷\times۱۰^{۹}$
ارتفاع مرکز ثقل $[m]$	۳۸
تعداد تاندون ها زیر هر ستون	۳
شعاع خارجی تاندون $[m]$	۰/۳
شعاع داخلی تاندون $[m]$	۰/۲۱۲
طول تاندون $[m]$	۴۱۵
پیش کشیدگی هر تاندون $[N]$	$۱/۱۴۴۵\times۱۰^{۷}$
مدول یانگ تاندون $[N.m^{-2}]$	$۲/۱\times۱۰^{۱۱}$
سختی محوری هر تاندون $[N.m^{-1}]$	$۰/۷\times۱۰^{۸}$

شکل ۳، سکو به همراه ۱۲تاندون را نشان می دهد.



شکل ۳- نمای سه بعدی ISSC TLP همراه با تاندون ها در نرم‌افزار

شکل ۴ نیز پنل های تشکیل دهنده TLP را نشان می دهد.



شکل ۴- پنل‌های تشکیل‌دهنده سازه TLP درنرم افزار

جدول ۲ پریود طبیعی حرکات ۶ درجه آزادی سکوی ISSC TLP را ارائه می دهد.

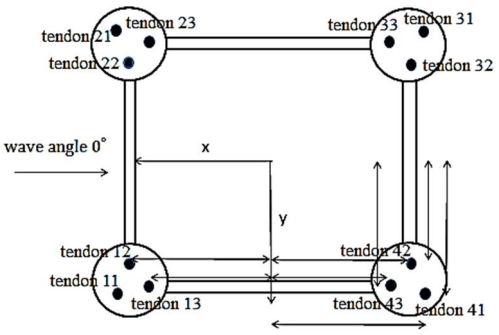
جدول ۲- پریود طبیعی حرکات ۶ درجه آزادی سکوی ISSC TLP برای عمق ۴۵۰ متر

حرکات سکوی پایه کششی ISSC TLP	پریود طبیعی
$[s]$ surge	۱۱۵
$[s]$ sway	۱۱۵
$[s]$ heave	۱/۸
$[s]$ roll	۱/۹
$[s]$ pitch	۱/۹
$[s]$ yaw	۸۹

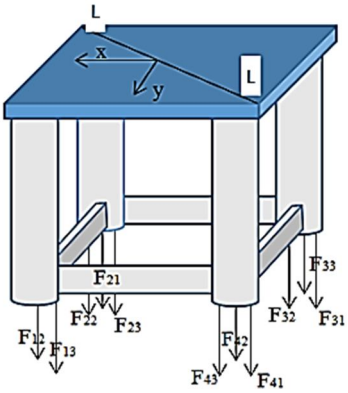
۵ – نتایج

۵ – ۱ - اثرات پارگی تاندون بر نیروی تاندون ها در آب آرام

جهت بررسی اثر پارگی (قطع) تاندون[5] در نیروی تاندون ها و رفتار سکوی پایه کششی، ابتدا به آنالیز سکوی پایه کششی در اثر پارگی تاندون ۱۱ بدون برخورد موج بصورت تحلیلی پرداخته شده است. بعد از پارگی تاندون ۱۱ سکو توسط ۱۱ تاندون دیگر مهار می شود و با توجه به متقارن بودن در راستای x و y و محور L_L با توجه شکل ۶ روی ستون متصل به تاندون ۳۱ می نشیند. بدین صورت کشش در تاندون های ستون های دیگر افزایش می یابد که به صورت استاتیکی با تقریب خوبی قابل تعیین است. با عنایت به شکل ۵ و شکل ۶ و محاسبات صورت پذیرفته، نیروهای تاندون‌ها را در حالت استاتیکی پس از پایداری سکو می‌توان تخمین زد.



شکل ۵- سکوی ISSC TLP بهمراه تاندون ۱۱



شکل ۶- سکوی ISSC TLP پس از پارگی تاندون ۱۱

جهت تعیین مقادیر نیروها در تاندون های دیگر ابتدا با فرض پایدار شدن سکو به برقراری تعادل لنگر حاصل از نیروهای تاندون پس از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]

پارگی تاندون حول محور x گذرنده از مرکز ثقل سکو و به صورت مشابه برای محورy بنا بر معادله (۱۲) پرداخته می شود:

$$\sum M)_x = 0 \rightarrow F_{21}r_1 + F_{22}r_3 + F_{23}r_2 + F_{33}r_2 + F_{31}r_1 + F_{32}r_3 = F_{12}r_3 + F_{13}r_2 + F_{42}r_3 + F_{43}r_2 + F_{41}r_1 \quad (۱۲)$$

چون با توجه به شکل ۶ دوران سکو پس از پارگی تاندون حول محور L-L اتفاق می افتد، نیروهای ایجاد شده در تاندون های زیر ستونهای دو طرف این محور، با هم برابر است و همینطور نیروهای ایجاد شده در تاندون های دو ستون دیگر پس از پارگی تاندون برای هر ستون به صورت جداگانه با هم تقریباً برابر خواهند بود:

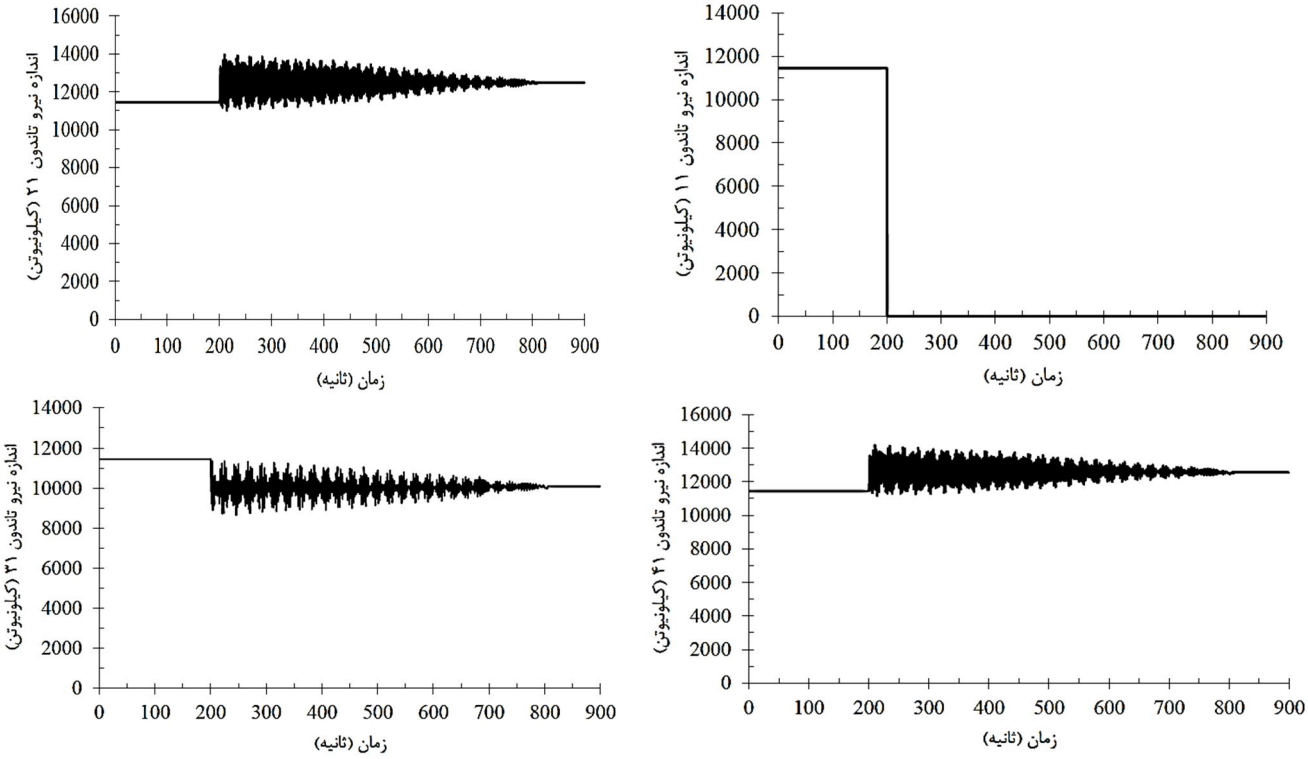
$$\begin{aligned} &F_{21} = F_{22} = F_{23} = F_{43} = F_{42} = F_{41} = F \\ &F_{33} = F_{31} = F_{32} = F_3 \\ &F_{12} = F_{13} = F_1 \end{aligned} \quad (۱۳)$$

مقادیر r_1 و r_2 و r_3 به ترتیب برابر ۴۷/۳ و ۴۴/۶ و ۳۷/۳ متر می باشند. از طرف دیگر همانطور که گفته شد باید توجه داشت که سکو پس از پارگی تاندون حول محور L_L می چرخد و در آبخور سکو تغییر زیادی ایجاد نمی شود و فقط در نیروی تاندون ها تغییر حاصل می گردد[۶]. چون یک تاندون حذف می شود، می توان فرض کرد که سکو توسط ۱۱ تاندون تحت پیش کشیدگی قرار می گیرد و نیروی هر کدام از این ۱۱ تاندون در این حالت با نیروی ۶ تاندون در دو ستون دو طرف محور L-L پس از پارگی، تقریباً برابر است. در نهایت با توجه به این که اختلاف بین وزن جابجایی و وزن سازه (نیروی شناوری معادل کشش تاندونها) برابر با ۱۴ تن جرمی می باشد:

$$11F = 14\times10^6 \times 9.81 = 137340\,kN \rightarrow F = 12485.4\,kN \quad (۱۴)$$

بنابراین با لحاظ کردن معادلات (۱۲)، (۱۳) و (۱۴)، نیرو در تاندون ۳۱ (tendon 31) برابر۱۰۱۶۷/۳ کیلو نیوتن و در تاندون ۴۱ و تاندون ۲۱ (tendon 41&tendon 21) برابر ۱۲۴۸۵/۴۵ کیلونیوتن می باشد. شکل ۷ نمودار تغییرات نیروی ۴ تاندون از ۱۲ تاندون را به طوری که هر کدام از تاندون ها زیر یک ستون قرار گرفته باشند در ۹۰۰ ثانیه اجرای نرم افزار نشان می دهد. در ثانیه ۲۰۰ تاندون ۱۱ (tendon 11) پاره می شود.

همان‌طور که ملاحظه می شود، به محض پاره شدن تاندون ۱۱ نیرو در تاندون ها به علت نامتعادل شدن سکو با تغییرات ناگهانی زیاد مواجه می شود و در نهایت بعد از ۷۵۰ ثانیه اجرای نرم افزار سکو به حالت پایدار می رسد و نیروها در تاندون به مقدار ثابت میل می کنند. باید ذکر شود که کلیه نیروها در این چهار تاندون بدون لحاظ کردن دمپینگ ویسکوز و تنها با لحاظ کردن دمپینگ تشعشعی بدست آمده است. همانطور که انتظار می رفت، نیروها در تاندون ۲۱ و تاندون ۴۱ افزایش پیدا کرده است و به مقدار ۱۲۵۱۰ کیلو نیوتن در حالت پایدار رسیده است که نزدیک مقدار محاسبه شده در حالت استاتیکی بعد از قطع تاندون می باشد (۱۲۴۸۵/۴۵ کیلو نیوتن). نیرو در تاندون ۳۱ نیز به علت نشست سکو روی



شکل ۷- تاریخچه زمانی نیروها در تاندون های شماره گذاری شده قبل و بعد از قطع تاندون ۱۱ در آب آرام

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]

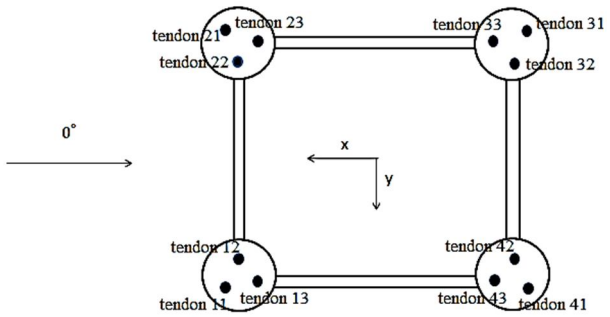
۱۰۱۰۰ ستون متصل به این تاندون کاهش پیدا کرده است و به مقدار کیلونیوتن در حالت پایدار رسیده است که نزدیک مقدار محاسبه شده در حالت استاتیکی بعد از قطع تاندون می باشد (۱۰۱۶۷/۳ کیلونیوتن). همانطور که مشاهده می شود، تاریخچه زمانی نیروها در تاندون ۲۱ و ۴۱ نیز به علت تقارن سکو با تقریب خوبی از یکدیگر مطابقت می کنند. نیروهای ۱۱ تاندون دیگر با پریود نزدیک به پریود heave سکو نوسان می کنند.

۵ – ۲- بررسی سکو در حالت صدمه دیده در امواج

یکی از مهمترین پدیده هایی که در این پروژه به آن پرداخته شده است بحث پارگی تاندون در در شرایط بد دریایی می باشد. در امواج با ارتفاع زیاد و پریود های کم، سکو به علت نیروی زیاد ناشی از امواج و شرایط بد جوی با پارگی تاندون روبرو می شود. این شرایط بد جوی و دریایی بیشتر در ناحیه خلیج مکزیک قابل رؤیت است و در این ناحیه نیز از سکوهای پایه کششی متعارف و گسترش یافته اعم از سکوی اسنور و ... استفاده شده است. اصولا این پدیده به علت ناپایداری لحظه ای سازه و ممان ناگهانی ایجاد شده در حین پارگی تاندون از اهمیت بسیار بالایی جهت آنالیز برخوردار می شود زیرا عدم بررسی این موارد به علت ممان زیاد نیروی امواج منجر به ناپایدار شدن و غرق شدن سکو می شود.

همان‌طور که اشاره شده سکوی ISSC TLP همراه با ۱۲ تاندون مدل‌سازی شده است. این سکو در برابر امواج منظم با پریود ۸ ثانیه و ارتفاع ۸ متر و زاویه برخورد صفر درجه مطابق با شکل ۸ قرار گرفته است و از جریان و باد نیز صرفنظر شده است.

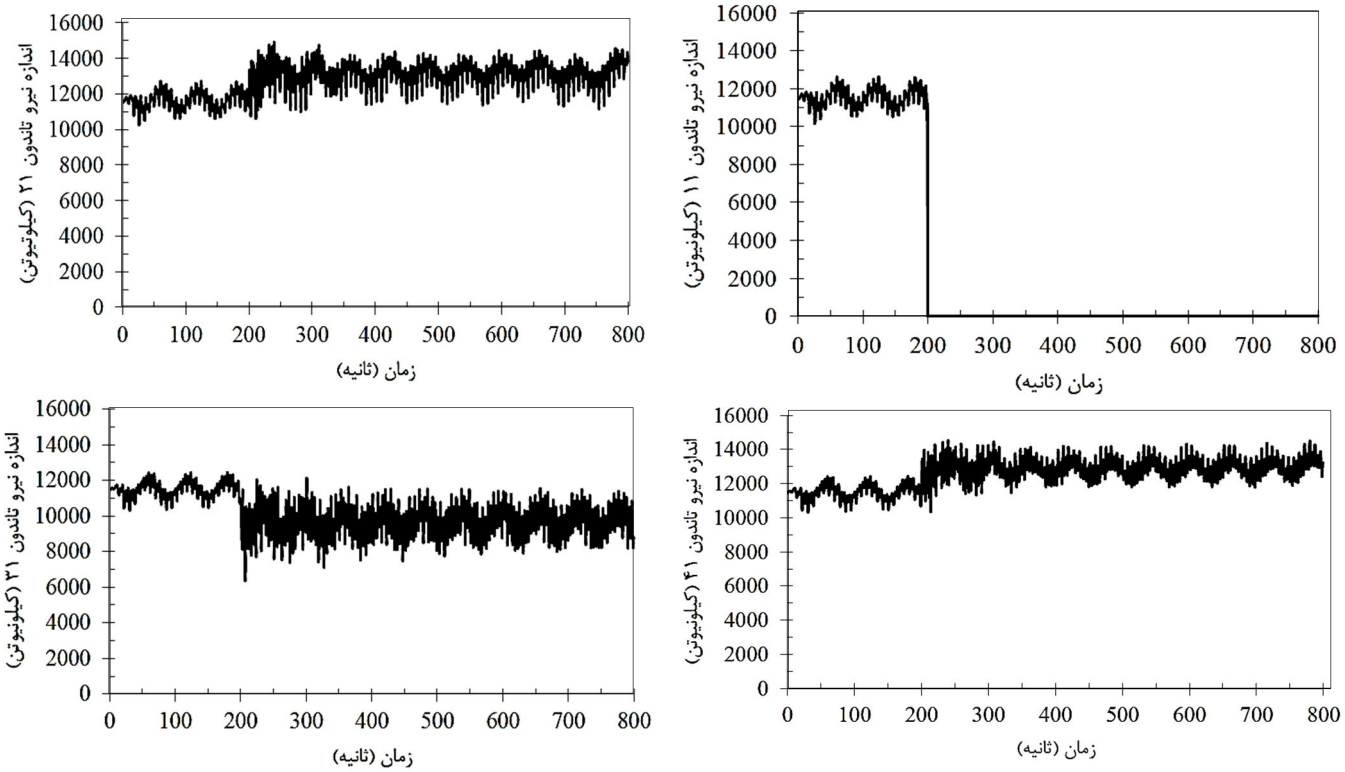
در ثانیه ۲۰۰ تاندون ۱۱ (tendon 11) پاره می شود ولی همچنان موج تا ثانیه ۸۰۰ ادامه دارد.



شکل ۸- نحوه قرار گیری سکو و جهت برخورد موج

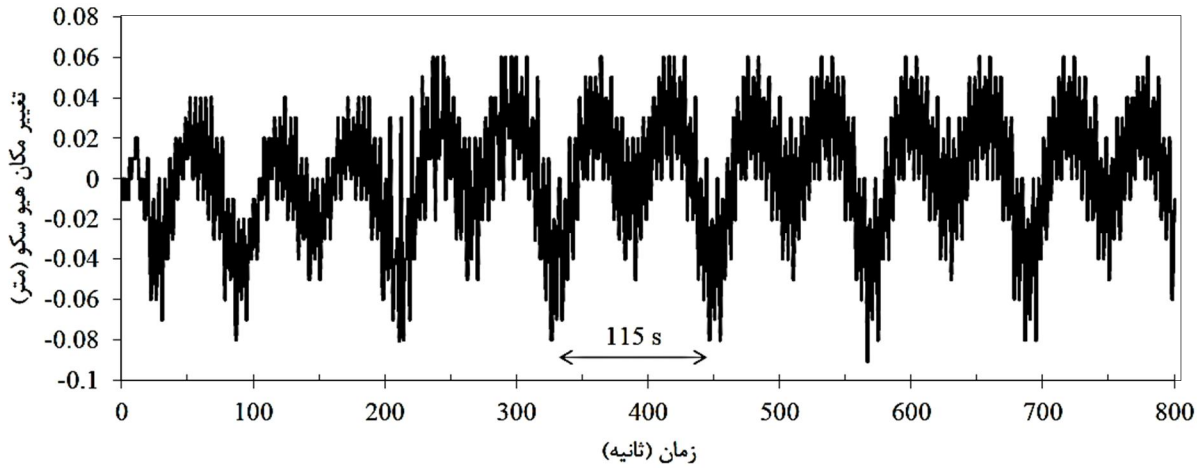
شکل ۹ نمودار تغییرات نیروی ۴ تاندون از ۱۲ تاندون در امواج منظم را نشان می دهد.

در این نمودارها، علاوه بر پریود موج برابر با ۸ ثانیه، پریود جرکت heave سکو و پریود طبیعی حرکت surge سکو که کوپل حرکت heave می باشد تأثیرگذار می‌باشد که تقریباً نوسان ناهماهنگ ایجاد کرده است.

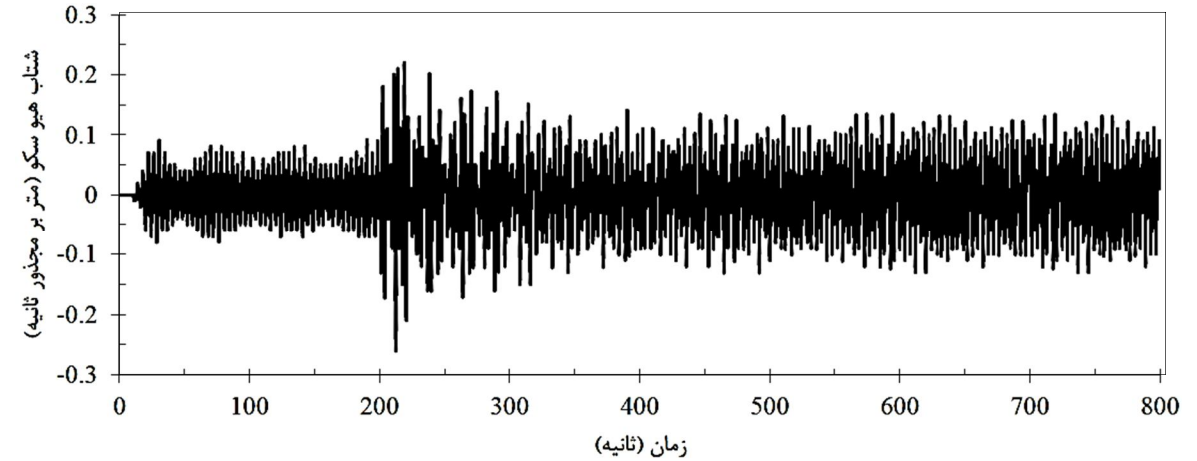


شکل ۹- تاریخچه زمانی نیروها در تاندون های شماره گذاری شده، قبل و بعد از قطع تاندون ۱۱ در برابر امواج منظم با پریود ۸ ثانیه و ارتفاع ۸ متر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]



شکل ۱۰- تاریخچه زمانی موقعیت heave سکو



شکل ۱۱- تاریخچه زمانی شتاب heave سکو

نمودار تاریخچه زمانی موقعیت سکو در راستای heave و تاریخچه زمانی شتاب heave سکو در برخورد با امواج منظم با پریود ۸ ثانیه و ارتفاع ۸ متر و زاویه برخورد صفر درجه همراه با پارگی تاندون در ثانیه ۲۰۰ به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در دو شکل بالا رؤیت می شود شتاب حرکت heave پس از پارگی تاندون در ثانیه ۲۰۰ با تغییر ناگهانی روبرو است که سبب تغییر ناگهانی منحنی موقعیت حرکت heave در ثانیه ۲۰۰ می شود.

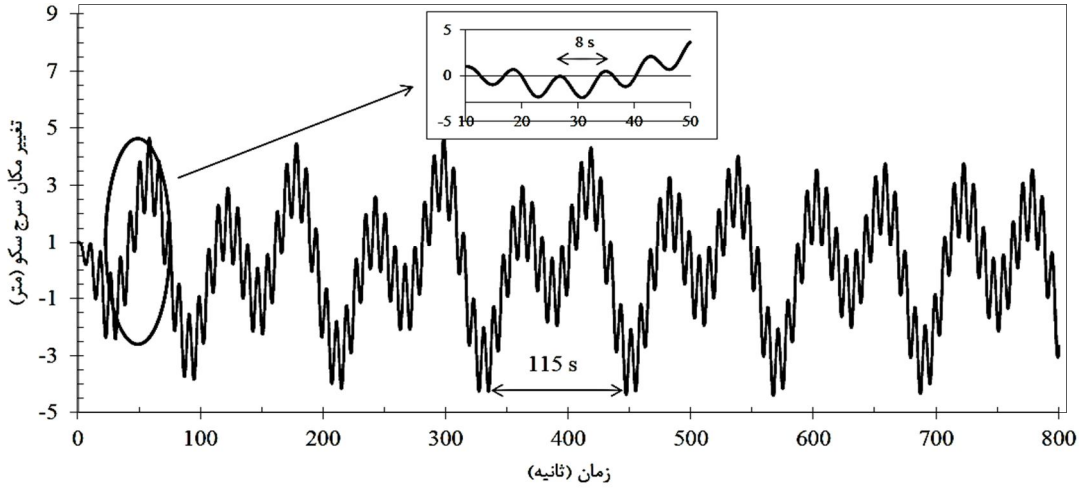
با پارگی تاندون ۱۱ و از بین رفتن سختی آن مقدار heave سکو افزایش می یابد که این روند به خوبی در شکل ۱۰ از ثانیه ۲۰۰ به بعد مشهود است.

در منحنی مربوط به موقعیت heave سکو، پریود ۱۱۵ ثانیه ای حرکت surge نیز رؤیت می شود.

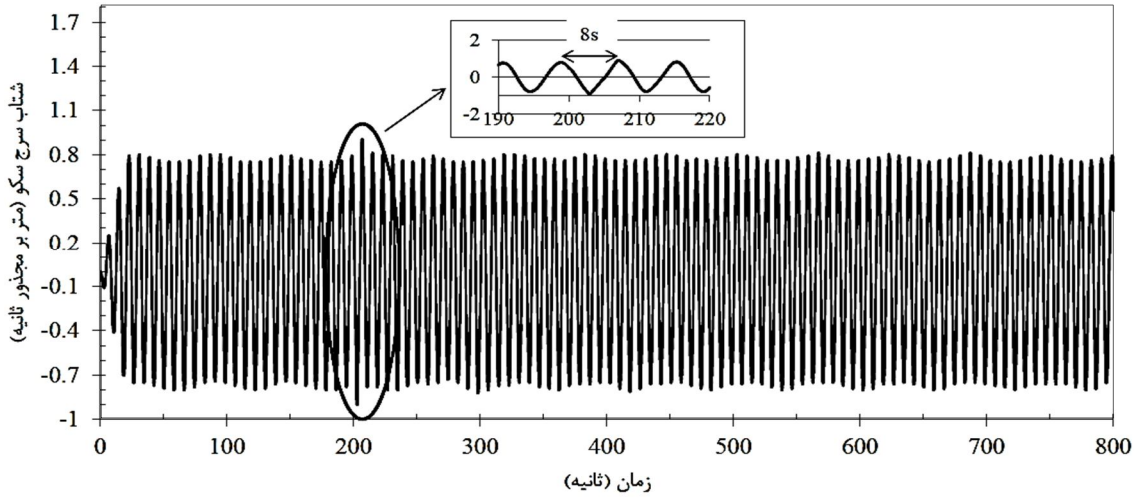
نمودار تاریخچه زمانی موقعیت سکو در راستای surge و تاریخچه زمانی شتاب surge سکو در برخورد با امواج منظم با پریود ۸ ثانیه و ارتفاع ۸ متر و زاویه برخورد صفر درجه همراه با پارگی تاندون در ثانیه ۲۰۰ به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]



شکل ۱۲- تاریخچه زمانی موقعیت surge سکو



شکل ۱۳- تاریخچه زمانی شتاب surge سکو

همان‌طور که در شکل ۱۳ ملاحظه می شود پارگی تاندون در ثانیه ۲۰۰ تأثیر اندکی روی شتاب surge متحمل می شود که محسوس است اما پس از مدت زمان کم، شتاب surge روند قبلی خود را تکرار می کند و به الگوی قبل از پارگی تاندون باز می گردد.

در شکل ۱۲ پریود حرکت surge سکو برابر با ۱۱۵ ثانیه رؤیت می شود و پریود ۸ ثانیه ای موج نیز وجود دارد. در نمودار شتاب surge نیز پریود غالب ۸ ثانیه ای موج قابل رؤیت است.

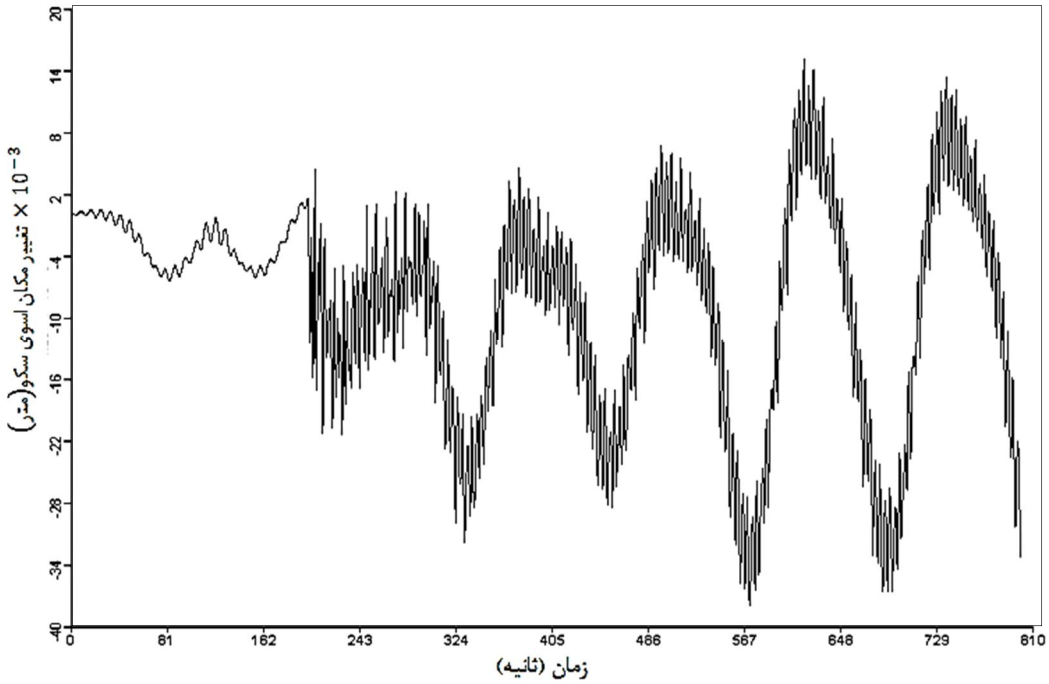
علاوه بر این به محض پارگی تاندون ۱۱، چون مقدار کشش تاندون ها زیر ستون متصل به این تاندون (۱۱) کاهش پیدا می‌کند، همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، سکوی متقارن دقیقا حول محور L-L در شکل ۶ می‌چرخد و آبخور ستون متصل به تاندون ۱۱ کاهش و نیروی این تاندون افزایش می‌یابد. متعاقباً نیروی تاندون ۳۱ کاهش پیدا می‌کند.

بدین سان با چرخش روی ستون متصل به تاندون ۳۱، مرکز ثقل به اندازه ۰/۰۱۵ متر، خلاف جهت y جابجا می‌شود و نوسان sway سکو حول آن صورت می پذیرد (شکل۱۴).

شکل ۱۴ حرکت sway سکو در ۸۰۰ ثانیه اجرای نرم افزار با لحاظ پارگی تاندون در ثانیه ۲۰۰ را نشان می‌دهد که اثرات گذرای پارگی تاندون در این ثانیه کاملاً مشخص است.

شایان ذکر است که پس از پارگی تاندون ۱۱ و نشست سکو روی ستون متصل به تاندون ۳۱، مقدار اندکی دوران به سمت این ستون حول محور x (roll) و y (pitch) صورت می پذیرد که این دوران تقریباً برابر ۰/۰۰۳ درجه می باشد.

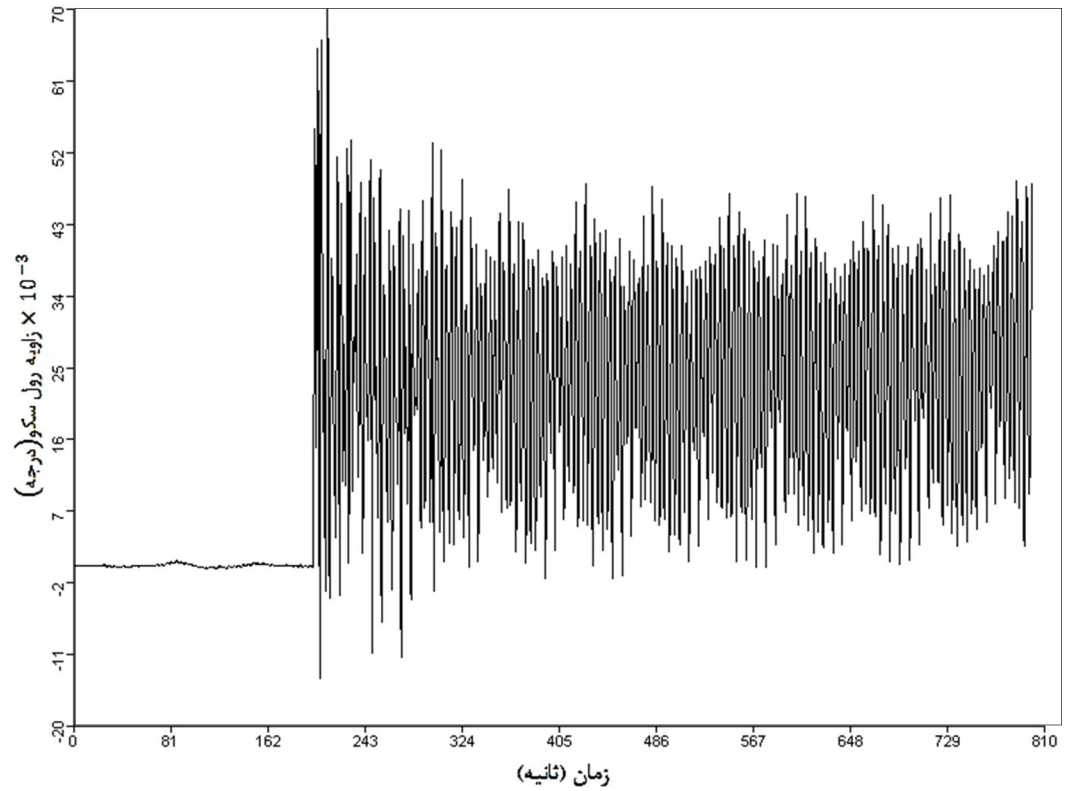
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]



شکل ۱۴- تاریخچه زمانی sway سکو

شکل ۱۵ و شکل ۱۶ به ترتیب نمودارهای تاریخچه زمانی دوران roll و pitch سکو را نشان می دهد.

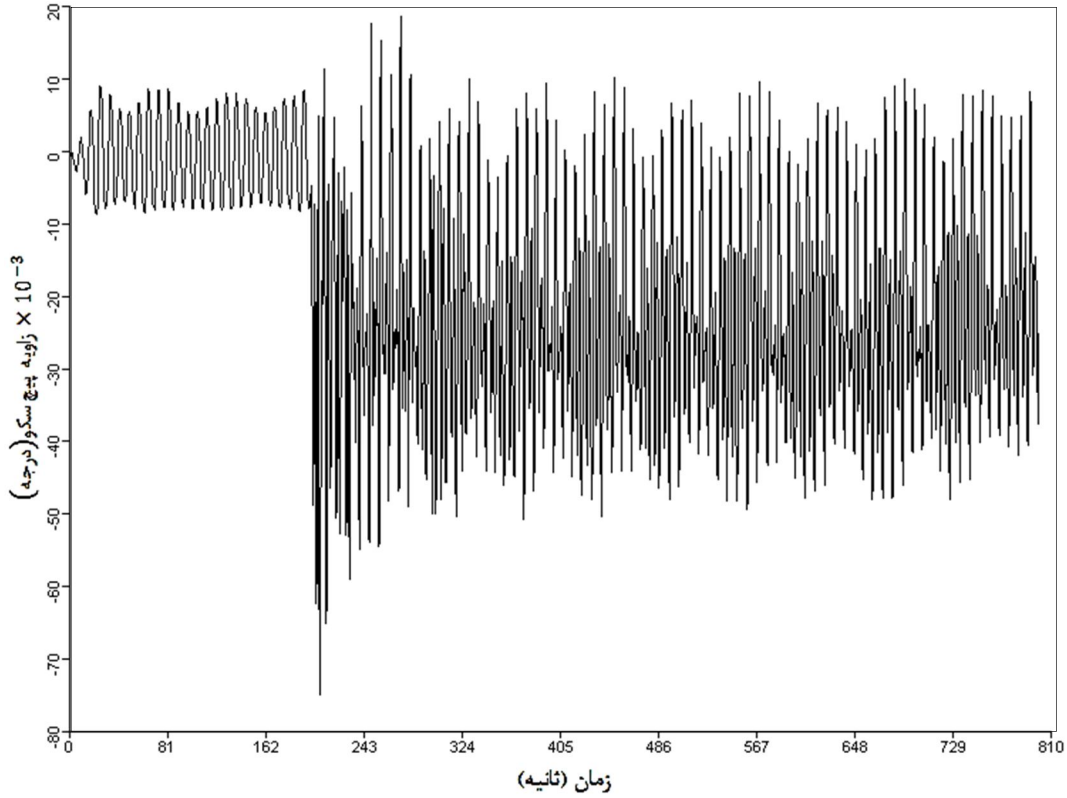
همانطور که مشخص است بدلیل برخورد موج با زاویه صفر درجه مقدار تغییرات roll سکو تا ثانیه ۲۰۰ (قبل از پارگی تاندون) صفر می باشد. شکل ۱۷ تاریخچه زمانی yaw سکو را نشان می دهد که بعد از برخورد موج و قبل از پارگی تاندون، سکو با پربود طبیعی yaw دوران می کند.



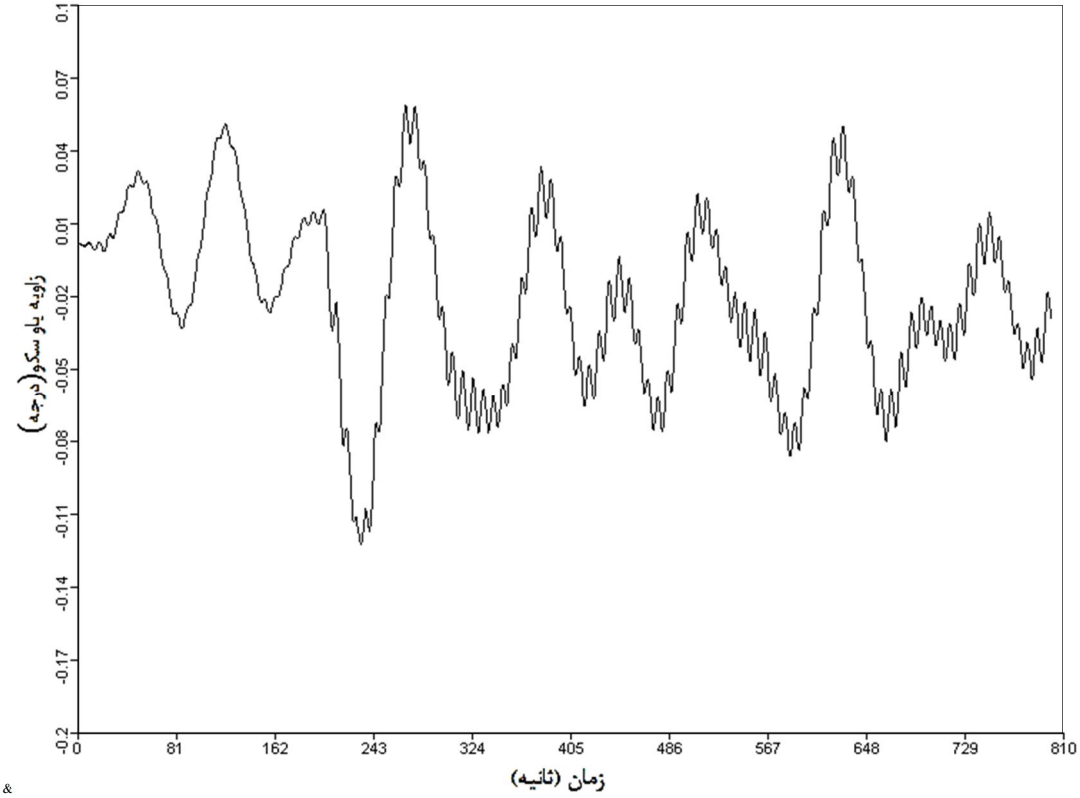
شکل ۱۵- تاریخچه زمانی roll سکو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]



شکل ۱۶- تاریخچه زمانی pitch سکو



شکل ۱۷- تاریخچه زمانی yaw سکو

۶ - نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی رفتار سکوی ISSC TLP در حالت صدمه دیده پرداخته شده‌است. منظور از بررسی حالت صدمه دیده اثرات پارگی تاندون در رفتار سکوی پایه کششی در حین شرایط دریایی نامناسب می باشد. کلیه تحلیل ها در امواج منظم صورت پذیرفته است. پارگی ناگهانی تاندون در TLP باعث ایجاد رفتار ناگهانی و گذرا در حرکات صفحه قائم شده است که افزایش و کاهش ناگهانی نیرو در تاندون های دیگر را در پی داشته است. تشدید ناگهانی نیروها در تاندون های دیگر و پایداری سکو در این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]

حین نیز امکان‌سنجی شده است. نتایج بدست آمده بدین شرح می باشد:

۱- پارگی ناگهانی یک تاندون در رفتار سکو در صفحه افقی تأثیر خاصی نمی گذارد و با توجه به کاهش سختی قائم، حرکات صفحه قائم اعم از حرکت heave را تحت تأثیر قرار می دهد و دامنه حرکت heave را افزایش می دهد.

۲- پارگی یک تاندون در سکوی ISSC TLP اگرچه پایداری سکو را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار نمی دهد اما باعث ایجاد یک تغییر دائمی بسیار اندک در حرکت heave می شود به این صورت که میانگین heave سکو نسبت به حالت سالم افزایش می یابد که در شکل ۱۰ مشخص است.

۳- پارگی ناگهانی یک تاندون در سکوی ISSC TLP، roll و pitch دائمی اندکی در سکو ایجاد می کند که این مقادیر با هم برابر هستند. درنهایت با پاره شدن یک تاندون، علارغم تأثیرات گذرا، ناپایداری در سکو اتفاق نمی‌افتد و به جز حرکت surge دامنه نوسان سکو در تمامی درجات آزادی افزایش می یابد.

کلید واژگان

1- Conventional TLP
2- International Ship Structures Committee (ISSC)
3- Three Dimensional Diffraction Theory
4- Froude-Krylov Potential
5- Tendon Disconnection

۶ – مراجع

1- Tan, S. and Gie, W.C., (1981), *The Wave Induced Motion of Tension Leg Platform in Deep Water*, Offshore Technology Conference. May 4th-7th.

2- Roitman, N. and Ricardo, F.M., (1992), *Dynamic Response Analysis of Small-Scale Model Tension Leg Platform*, Elsevier Science Publishers Ltd. England, Vol.5, p.491-513

3- Xiao, Z. and Xiao, S., (2007), *Governing equation and numerical solution of tension leg platform with finite amplitude motion*, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol.28, p28-49

4- Tajali, Z. and Shafi Far, M. (2008), *The Hydrostatic and Hydrodynamic Behavior of floating Quay*, M.S thesis in Civil engineering, Tehran, Tarbiat Modarres University. (In Persian)

5- Tabeshpour, M.R and Dehkharghanian, V., (2010), 12th Marine Industries conference, Zibakenar. (In Presian)

6- Yang, C.K. and Kim, M.H., (2010), Transient effects of tendon disconnection of a TLP by hull-tendon-riser coupled dynamic analysis, Elsevier Science Publishers Ltd, Vol.37, p667-677.

7- Taylor, R.E. and Jefferys, E.R., (1986), *Variability of hydrodynamic load prediction for a tension leg platform*, Ocean Engineering, Vol.13, p449-490.

8- Chakrabarti, S.K., (1987*), Hydrodynamics of offshore structures,* Southampton, WIT press, Computaional Mechanics Hardcover.

9- Journee, J.M.J. and Massie, W.W., (2001), *Offshore Hydromechanics*, First edition, Delft University of Technology, Delft, The Netherland.

10- Clauss, G., Lehmann, E. and Ostergaard, C., (1992), *Offshore Structures*, London: Springer-Verlag. lSBN-13: 978-1-4471-2000-1

11- Tabeshpour, M.R., (2006), *Nonlinear and Random Dynamic Analysis of Tension Leg Platforms,* PHD thesis in civil engineering, Sharif University of Technology.

12- Razaghian, A.H., (2013), *Model Test to Evaluate Tension Leg Platform in Waves*, M.S. thesis in mechanical engineering, Sharif University of Technology.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.7.1]