

بررسی اثرات ناشی از خستگی در اتصالات سکوی جک آپ در دریای خزر

علی یقطین^۱، حسن صیادی^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

تحلیل خستگی یکی از مهمترین بخش‌های طراحی سازه‌های فراساحلی است. این تحلیل با توجه به وجود نیروهای متناوب ناشی از موج، جریانات دریایی، باد و غیره در محیط دریا از اهمیت ویژه‌ای در طراحی اولیه برخوردار است. همچنین، در نظر گرفتن اثرات ناشی از خستگی، یکی از مؤلفه‌های مهم در تخمین عمر سکوها به شمار می‌رود.

در این مقاله، در ابتدا و با در نظر گرفتن شرایط محیطی محل عملیات (دریای خزر) سکوی جک آپ ایران خزر توسط نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی شده است. با توجه به آمارهای موجود از شرایط محیطی دریای خزر ارتفاع موج مشخصه برابر ۱۲ متر و سرعت جریانات دریایی برابر ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه، از فنرهای الاستیکی استفاده گردید که سختی آنها بر اساس آیین‌نامه API در آب‌های کم‌عمق استخراج شده است. پس از انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی در تمامی جهت‌های تابش موج، راستای موج غالب و اتصال بحرانی سکو مشخص شده است. این اتصال با درنظر گرفتن طول مؤثر عصوها و تکیه‌گاه‌های مناسب، مدل‌سازی شده و پس از اعمال بارهای سه‌گانه (نیروی محوری، لنگر خمی درون‌صفحه و لنگر خمی برون‌صفحه) تحت تحلیل خستگی قرار گرفته است. سپس، با در نظر گرفتن قانون ترکیب تنش ارائه شده توسط آیین‌نامه API، تنش نقطه حاد محاسبه شده و گره بحرانی نیز مشخص شده است. تحلیل خستگی برای این گره، با در نظر گرفتن دیاگرام S-N توصیه شده توسط آیین‌نامه API انجام شده و خسارت سالیانه و در نهایت عمر تقریبی سکو بدست آمده است. در ادامه بر اساس روش توزیع تجمعی انرژی موج اثر راستاهای مختلف موج در تحلیل خسارت سالیانه اتصال بحرانی، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در این مقاله، سعی شده تا با ساده‌سازی محاسبات و نیز اعمال تقریب‌های قابل قبول، روش آسانی به منظور یافتن اتصال بحرانی سکوی جک آپ پیشنهاد شده و سپس از روی تنش بحرانی در اتصالات این سکو عمر تقریبی آن را محاسبه کرد.

کلمات کلیدی: جک آپ، تحلیل دینامیکی، خستگی، اتصال بحرانی، خسارت سالیانه

Studying of Fatigue Effects in Jack up Tubular Joints in Caspian Sea

Abstract

One of the important items in offshore structure design is fatigue analysis. Because of existence of periodic loads derived by wave, sea current, wind, etc. this analysis has become one of the major analysis in basic design. Estimation of structure's life that is generated from fatigue analysis is more important in operation of the offshore unit.

In this paper according to the environmental conditions of Caspian Sea, a jack up was modeled by use of ANSYS. According to available statistics of this specified region the wave by 12 m significant height and sea current by the speed of 1 (meter/second) is exerted on the structure. API rules are considered in modeling of soil and spudcan interaction and the stiffness of the elastic springs also selected by this standard. After that, nonlinear dynamic analysis has been

carried out for all directions of wave motion so that the dominant wave direction and critical joint has been detected.

This critical joint has been modeled by considering the effective length of members and appropriate support condition. The design loads (axial loads, out-of-plane bending, in-plane bending) have been exerted, and Hot Spot Stress "HSS" which had calculated by API formula has provided for stress combination in order to indicate the critical node. After that fatigue analysis has been done for this node by considering S-N curves in API recommendation. Finally the roughly life of the jack up rig has been determined.

In addition to that analysis the effect of fatigue damage in each wave direction has been investigated and compared by using wave-energy distribution method. In this paper we try to generate a simple method for detecting the critical joint in order to calculate the structure's life approximately.

Keywords: Jack Up, Dynamic Analysis, Fatigue, Critical Joint, Annual Damage

در این مقاله، سعی شده تا با استفاده از نرم‌افزار ANSYS سکوی جک‌آپ ایران خزر مدل‌سازی شود. پس از مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی غیر خطی اتصال بحرانی شناسایی شده است. پس از آن با استفاده از منحنی‌های مرتبط خستگی در آیین‌نامه API تحلیل عمر، برای بحرانی‌ترین گره صورت گرفت که در نهایت احتمالاتی توزیع تجمعی انرژی موج اثرات خستگی در راستاهای مختلف انتشاری امواج مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- نیروهای واردہ بر سکوی جک‌آپ

اصلًا نیروهای وارد بر سکوی جک‌آپ را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم نمود: دسته اول نیروهایی هستند که در زمان بهره‌برداری به سکو وارد می‌شوند و دسته دوم، نیروهایی مستقل از عملیات سکوست. دسته اخیر شامل نیروهای ثقلی و نیروهای ناشی از شرایط محیطی مثل باد، موج و جریان آب دریا، زلزله، برف، بیخ و همچنین تغییرات هیدرولاستاتیکی و تأثیر نیروی شناوری بر اعضاء به واسطه تغییرات در سطح آب در اثر جذر و مد است.^[۳] از آنجا که طبق آیین‌نامه DNV سهم نیروی باد کمتر از ۴۰ درصد نیروهای هیدرودینامیکی است^[۴]، و سهم عمدۀ اثر این نیرو بر سازه بالای سطح آب وارد می‌شود در این مطالعه برای تحلیل اثرات خستگی در پایه سکو از اثرات نیروی باد صرف‌نظر شده است.

۱- مقدمه

امروزه در صنعت فراساحل، برای حفاری‌های تا عمق ۱۵۰ متر از سکوهای خودبالابر که به جک‌آپ مشهورند، استفاده می‌شود. معمولاً این سکوها از یک عرشه مثلثی تشکیل شده‌اند که بر روی سه پایه بادبندی شده جدا از هم، قرار می‌گیرد. سکوی جک‌آپ، با بدنه شناور و پایه‌های خارج از آب، تا محل حفاری یدک می‌شود. وقتی سکو به محل حفاری و عملیات رسید، پایه‌های آن تا بستر دریا پایین برده شده و این عمل تا زمانی که عرشه در فاصله مناسب از سطح دریا قرار گیرد، ادامه می‌یابد.^[۲]

تاکنون تحقیقات مختلفی در رابطه با مدل‌سازی سازه جک‌آپ توسط افراد مختلف انجام شده است. (1992) Brekke و همچنین (1990) Hoyle ساده را فقط با شش گره در هر پایه در مقایسه با اندازه‌گیری‌های سازه‌ای یک سکوی خودبالابر در دریای شمال در شرایط ماسه‌ای سخت ارائه داد. همچنین (1997) Daghighی یک مدل اجزاء محدود سه بعدی با پایه‌های مجزا را با چهارده گره در هر پایه ارائه داد و (1996) Manuel & Cornel یک قاب صفحه‌ای با بارگذاری در محور تقارن سازه پیشنهاد داد.^[۵] نتیجه تحقیقات یاد شده منجر به معرفی نرم‌افزارهای MARC، ABAQUS، SACS، PATRAN و SACS همچون در زمینه تحلیل سازه‌های دریایی شده است.

المان‌های تیرصلب به منظور مدل‌سازی آن استفاده شده است که جرم آن به صورت مرکزی در کوردهای پایه (عضوهای اصلی) لحاظ شده است. در مدل‌سازی تیرهای صلب از المان 188 BEAM استفاده شده است.^[۵]

۵- مدل‌سازی پایه

هندسهٔ یک پایه سکوی خودبالابر از یک قاب فضایی تشکیل شده که شامل وترها، مهارهای افقی، N قائم و مورب به قطرهای مختلف به صورت اتصالات K و K شکل و یا ترکیبی از آنها است. شکل اتصالات پایه‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای برای سیستم‌های بالابری مختلف فرق می‌کند.^[۶]

به منظور مدل‌سازی پایه سکو که تحت اثر نیروهای امواج، هیدرواستاتیکی، هیدرودینامیکی و اثرات امواج، هیدرواستاتیکی، هیدرودینامیکی، اثرات جرم افزوده است، از المان 59 PIPE، استفاده شده است. با توجه به اینکه المان مذکور یک المان خطی است، باید تحقیق شود که تمامی المان‌های پایه در محدوده الاستیک قرار دارد. با مدل‌سازی، انجام تحلیل و مشخص شدن محدوده تنش تمامی المان‌های پایه سکوی مورد مطالعه شرط فوق ارضاء شد.

۶- مدل‌سازی اتصال عرشه به پایه

در اتصال‌هایی که دارای مکانیزم قفل شونده هستند، اثر متقابل بدنه-پایه را می‌توان به صورت یک اتصال صلب در نظر گرفت. زیرا در حالت واقعی، لقی بین پایه و عرشه به طور کامل توسط سیستم قفل شونده حذف می‌گردد. با توجه به اینکه جک آپ مورد نظر نیز دارای سیستم قفل‌کننده است، حرکات سه رأس عرشه با حرکات گره‌های مختلف پایه با هم کوپل شده است. این عمل، شرط انتقال کامل نیرو عرشه به سه پایه را به طور کامل ارضاء می‌کند.^[۶]

۷- مدل‌سازی اسپادکن

اسپادکن‌های سکوهای جک آپ دارای شکل‌های مختلفی هستند. اسپادکن سکوی حاضر به صورت مخروطی با قاعده مثلث شکل است. به منظور مدل-

۳- مدل‌سازی سکوی جک آپ

یک سکوی جک آپ از چهار قسمت اصلی (۱- عرشه^۱، ۲- پایه‌ها^۲، ۳- اتصال بدنه به پایه یا سیستم بالابری^۳، ۴- اتصال پایه به خاک^۴) تشکیل شده است. در مدل‌سازی سکوی جک آپ مورد مطالعه، از نرم‌افزار ANSYS 8 استفاده گردیده است (شکل ۱). المان‌های پایه‌ها از نوع المان‌های لوله‌ای می‌باشند که در ارتباط مستقیم با آب دریا هستند و نیروهایی از قبیل نیروهای هیدرواستاتیکی، هیدرودینامیکی، اثرات جرم افزوده و نیروهای امواج بر این المان‌ها وارد می‌شوند. تمام المان‌هایی که به منظور مدل‌سازی سکو در نرم‌افزار ANSYS مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارتند از:

۱) المان 188 BEAM به منظور مدل‌سازی عرشه

۲) المان 21 MASS به منظور مدل‌سازی جرم‌های مرکزی عرشه

۳) المان لوله‌ای 59 PIPE به منظور مدل‌سازی پایه‌های سکوی جک آپ

۴) المان لوله‌ای 20 PIPE به منظور مدل‌سازی اسپادکن

۵) المان فر 39 COMBIN به منظور مدل‌سازی تکیه‌گاه‌ها

۶) المان پوستمای 63 SHELL به منظور مدل‌سازی اتصال بحرانی

در ادامه به جزئیات هر یک از موارد یاد شده در مدل‌سازی سکو پرداخته شده است.

۴- مدل‌سازی عرشه

با توجه به اینکه در تحقیق حاضر عرشه و تغییر شکل‌های موضعی آن مورد نظر نمی‌باشد، مجموعه‌ای از

¹ Hull

² Legs

³ Fixation System

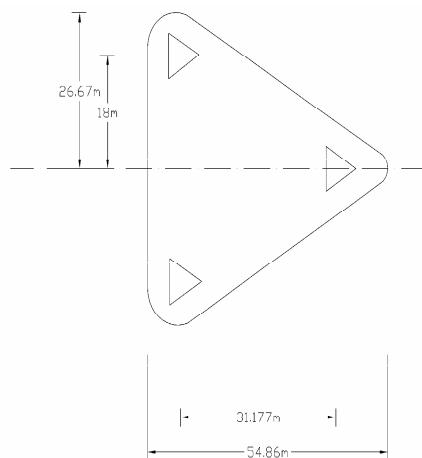
⁴ Spudcan

۹- معرفی جک آپ مورد مطالعه و شرایط محیطی

مشخصات اصلی سکوی جک آپ ایران خزر که دارای سه پایه مستقل است، به همراه شرایط محیطی در شکل (۲)، (۳) و جدول (۱) ارائه شده است [۵]. ضرایب پسا و اینرسی که در جدول ذیل آورده شده است به عنوان ورودی نرم افزار و به منظور حل معادله موج استفاده خواهد شد.

جدول ۱- خلاصه شرایط محیطی و ضرایب هیدرودینامیکی

مقدار	مشخصه
91 [m]	عمق آب
$H_{100} = 12$ [m]	ارتفاع موج صد ساله
10 Sec	پریود موج صد ساله
1 m/s	سرعت حدنهایی جریان در سطح آب
1.0	ضریب پسا
1.8	ضریب اینرسی



شکل ۲- فاصله بین پایه‌های جک آپ مورد مطالعه

سازی اسپادکن با توجه به صلب بودن آن باید از المان SOLID استفاده شود. اما با توجه به زیاد شدن تعداد المان‌های اسپادکن پس از مشبندی، حجمیم بودن المان SOLID و همچنین محدودیت‌های محاسباتی رایانه‌های معمول، می‌توان از المان 20 PIPE استفاده نمود. در این مدل‌سازی، المان 20 PIPE با توجه به خصوصیات واقعی اسپادکن (جرم و صلابت) مدل‌سازی شده است. المان 20 PIPE توانایی مدل‌سازی مصالح غیرخطی را دارد. ذکر این نکته لازم است که نیروی موج، فشارهای هیدرودینامیکی و اثرات جرم‌افزوده به این المان وارد نمی‌شود.

۸- مدل‌سازی اتصال پایه- خاک

مدل فنر الاستیک به منظور مدل‌سازی اتصال پایه به خاک در سال ۱۹۹۰ توسط Brekkle پیشنهاد گردید. او سختی فنر خطی را با اندازه‌گیری‌های فراساحلی کالیبره نمود و کاهش تنش‌های بحرانی را در مقایسه با استفاده از مفصل در این اتصال گزارش داد. اگر چه این روش پیچیدگی‌های رفتار اندرکنشی را نشان نمی‌دهد، اما نتایج منطقی‌ای ارائه می‌نماید [۷]. در این تحقیق نیز از روش مذکور برای مدل کردن اندرکنش خاک و سازه استفاده شده و به منظور تعیین سختی از روابط موجود در آیین‌نامه API RP2A در آبهای با عمق کم استفاده گردیده است [۸].



شکل ۱- نمایی از سکوی جک آپ مدل شده مورد مطالعه

$$\beta = 2(\zeta_j \omega_j - \zeta_i \omega_i) / (\omega_j^2 - \omega_i^2) \quad (2)$$

مقدار نسبت میرایی سازه را که نیز، طبق آییننامه API برابر با ۰/۰۲ است [۳].

با انجام تحلیل ارتعاش آزاد و بدست آوردن مدهای ارتعاش آزاد سازه، دوره‌های تنابوت طبیعی سازه بدست می‌آید:

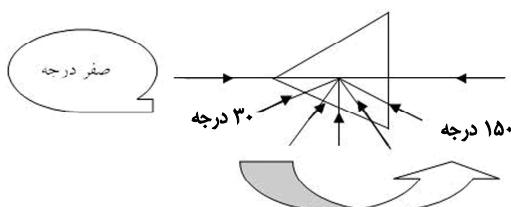
$$\begin{aligned} T_1 &= 7.51 \text{ sec} \\ T_2 &= 7.49 \text{ sec} \end{aligned} \quad (3)$$

با محاسبه فرکانس‌های طبیعی از روی مقادیر فوق و سپس تعیین سرعت‌های زاویه‌ای، مؤلفه‌های α و β با توجه به روابط (۱) و (۲) بدست می‌آیند:

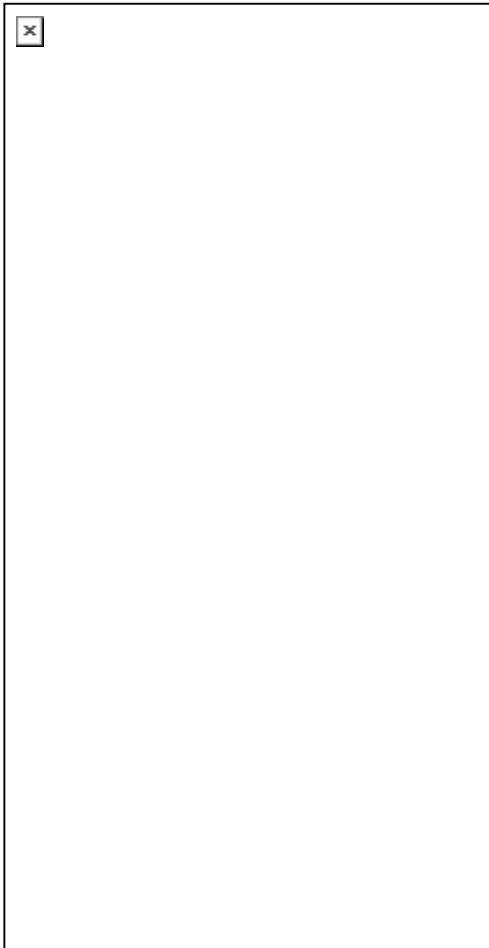
$$\alpha = 0,01675 \quad (4)$$

$$\beta = 0,0238$$

در این مرحله، سکو تحت اثر نیروهای ناشی از موج و جریان، تحلیل می‌شود. در تحلیل انجام گرفته تئوری استوکس مرتبه پنجم به منظور مدلسازی اثر موج در نرم‌افزار ANSYS مورد استفاده قرار گرفته و تحت زوایای مختلف بر روی سازه اعمال گردیده است. پس از انجام تحلیل‌ها و محاسبه تنش‌های واردہ بر اعضای سکو در زوایای مختلف تابش موج، راستای ۹۰ درجه به عنوان راستای موج غالب، (راستایی که بیشترین تنش-ها را در سازه ایجاد می‌کند) تعیین گردید (شکل ۴). در این راستا المان ۴۹۹ المان بحرانی (المان با بیشترین مقدار تنش) سکوست (شکل ۸). امواج در ۶ زاویه برخورد مختلف شامل ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.



شکل ۴- زاویه‌های برخورد موج به پایه سکو

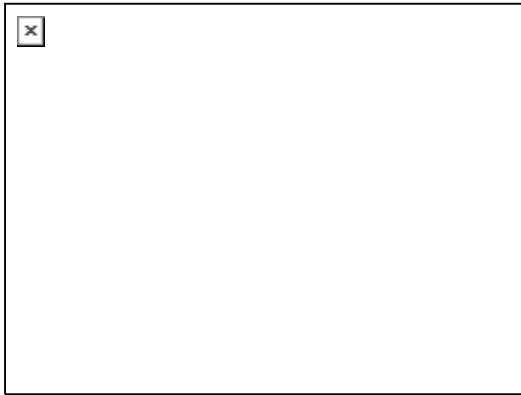


شکل ۳- مقطع پایه جک‌آپ مورد مطالعه

۱۰- تحلیل دینامیکی غیر خطی سکو

انجام تحلیل غیرخطی، به منظور بررسی محدوده تنش (قرار گرفتن در محدوده الاستیک و یا پلاستیک) ضروری است. منظور از این نوع تحلیل، غیرخطی بودن بارگذاری و مصالح است. در تحلیل دینامیکی سکو دو مؤلفه میرایی α و β ، به عنوان اطلاعات ورودی نرم‌افزار لازم است. برای تعیین این دو مؤلفه، باید به تحلیل ارتعاش آزاد بر روی سازه پرداخت. بدین ترتیب فرکانس‌ها و پریودهای طبیعی سازه مشخص می‌شود. با محاسبه فرکانس‌های سازه از روی مقادیر فوق و سپس تعیین سرعت‌های زاویه‌ای (ω)، مؤلفه‌های α و β بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$\alpha = 2\omega_i \omega_j (\zeta_i \omega_j - \zeta_j \omega_i) / (\omega_j^2 - \omega_i^2) \quad (1)$$



شکل ۷- توزیع تنش در سازه برای ثانیه ۴۰ از تحلیل دینامیکی

به طور کلی در زاویه برخورد ۹۰ درجه، اتصالات واقع بر روی ۳ پایه اصلی سکو در زیر عرشه، حالت بحرانی-تری دارند. از میان این اتصالات، اتصال NN، که شامل المان ۴۹۹ بوده و در شکل (۸) نشان داده شده است، به عنوان اتصال بحرانی مشخص گردیده است.



شکل ۸- موقعیت المان بحرانی و همینطور اتصال بحرانی

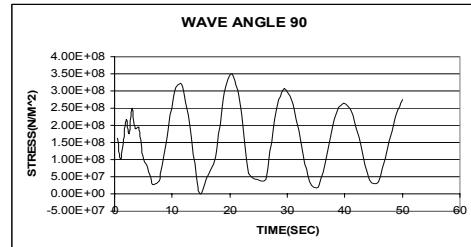
به منظور اطمینان از صحت مدل سازی و نتایجی که از تحلیل‌ها استخراج می‌شد، یک سکوی مشخص که پاسخ آن در برابر نیروهای محیطی موجود است، با روشی که در این تحقیق پیشنهاد شده است، مدل-سازی شد و نتایج حاصله با نتایج موجود برای سکو مقایسه گردید[۶]. ارزیابی اطلاعات بدست آمده بیانگر امکان استفاده از روش مذکور است.

۱۱- تحلیل خستگی اتصال بحرانی

۱-۱۱- تعریف خستگی

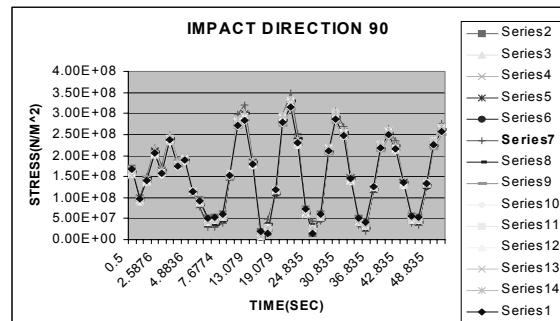
تکرار بارگذاری و باربرداری، حتی اگر تنش‌ها به محدوده پلاستیک نیز نرسد، می‌تواند باعث خرابی

شکل (۵) تغییرات تنش المان ۴۹۹ در راستای غالب تاباندن موج در طول زمان نشان می‌دهد:



شکل ۵- تغییرات تنش المان ۴۹۹ در اثر برخورد موج با زاویه ۹۰ درجه

همینطور در شکل (۶) مشاهده می‌شود، تنش در المان ۴۹۹ از تمامی المان‌های مجاور با این المان در زاویه تابش ۹۰ درجه بیشتر است. منظور از سری‌ها در شکل (۶) سایر المان‌های مجاور المان ۴۹۹ (سری ۷) است.



شکل ۶- تغییرات تنش المان ۴۹۹ در برابر سایر المان‌های مجاور در اثر برخورد موج با زاویه ۹۰ درجه

با توجه به آنکه امواج با زاویه برخورد ۹۰ درجه، بیشترین تنش را در سازه ایجاد می‌نماید، اتصال بحرانی سکو نیز با در نظر گرفتن معیار تنش (Von Mises) در همین زاویه بدست آمده است. در شکل (۶) نیز تنش‌های کل سازه در ثانیه ۴۰ از تحلیل دینامیکی به عنوان نمونه نشان داده شده است.

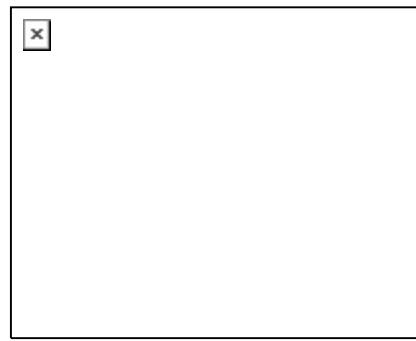
که مشخصات کامل آنها، پیشتر و در اشکال (۲) و (۳) آورده شده است.



شکل ۱۰- نمایی از اتصال بحرانی NN

مصالح گردد. پدیده کم شدن مقاومت تحت تأثیر نیروهای تکرارشونده را خستگی مصالح^۱ نامند.

یک سکوی جک آپ از اتصالات لوله‌ای جوش داده شده در اشکال، ابعاد و ظرفیت‌های باربری مختلف تشکیل می‌شود. این اتصالات می‌توانند تحت تأثیر ترکیب‌های مختلف بارگذاری شامل سه مؤلفه اصلی نیروی محوری، لنگر خمشی درون صفحه‌ای (IPB) و لنگر خمشی برون صفحه‌ای (OPB) مطابق شکل (۹) قرار گیرد [۱۰].



شکل ۹- مؤلفه‌های مختلف نیروهای واردہ بر یک اتصال لوله‌ای در سکوی جک آپ

پس از چندین بار شبکه‌بندی اتصال نمایش داده شده در شکل (۱۰)، این نتیجه بدست آمد که اگر محل تقاطع اعضای فرعی و اصلی به ۳۲ قسمت تقسیم‌بندی شود، نتایج حاصل از مقادیر تنش Von Mises با خطای ناچیزی به یکدیگر نزدیک می‌شوند. با توجه به تفاوت ناچیز قطر اعضای فرعی با یکدیگر و برای اجتناب از خطا در تحلیل خستگی محیط دایره‌های محل تقاطع اعضای فرعی با کورد به ۴۰ قسمت مساوی تقسیم‌بندی شد. شکل (۱۱) شبکه‌بندی انجام شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- شبکه‌بندی اتصال بحرانی

به منظور مدل‌سازی اعضای اتصالات در تحقیق حاضر، از المان پوسته‌ای نازک Shell 63 استفاده شده است. این المان قابلیت رفتار خمشی^۲ و غشایی^۳ در محدوده الاستیک را دارد. المان ۴ گرهی یاد شده، دارای ۶ درجه آزادی در هر بوده و از قابلیت ضخامت متغیر و امکان بارگذاری روی صفحه پوسته و عمود بر آن برخوردار می‌باشد.

۲-۱- مدل‌سازی اتصال NN

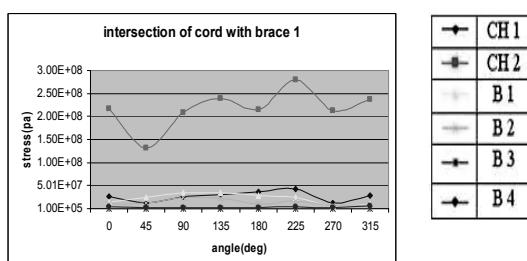
اتصال بحرانی مورد بررسی، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این اتصال از ۴ عضو فرعی تشکیل شده

¹ Fatigue
² Bending
³ Membranous

که در آن SCF_{OPB} , SCF_{IPB} و SCF_{ax} ضرایب تمرکز تنش برای نیروهای محوری، لنگر خمشی درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای است. σ_{ax} , σ_{IPB} و σ_{OPB} به ترتیب عبارتند از مؤلفه‌های تنش ناشی از نیروی محوری، لنگر خمشی درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای. بدین ترتیب تنش بحرانی معادل S_{HS} بست می‌آید. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر، تنش‌های بحرانی ناشی از نیروی محوری (σ'_{ax}) و لنگر خمشی درون صفحه‌ای (σ'_{IPB}) و برون صفحه‌ای (σ'_{OPB}), مستقیماً از تحلیل خستگی اتصال بست می‌آیند، نیازی به محاسبه ضرایب تمرکز تنش نبوده و رابطه (۵) بصورت زیر ساده می‌شود[۳]:

$$S_{HS} = \sigma'_{AX} + \sqrt{\sigma'_{IPB}^2 + \sigma'_{OPB}^2} \quad (6)$$

با توجه به الگوهای مختلف بارگذاری، محل تقاطع عضو فرعی ۱ با عضو اصلی در حالت بارگذاری عضو اصلی ۲، دارای بیشترین تنش است. با توجه به آنکه بارگذاری‌ها به صورت جداگانه به اتصال وارد شده‌اند، می‌توان با تقریب قابل قبولی از قانون ترکیب تنش API به منظور محاسبه تنش نقطه بحرانی حاصل از ترکیب بارگذاری‌ها استفاده نمود. در صورتیکه با استفاده از این قانون، تنش بحرانی برای ۸ گره واقع در محل تقاطع عضو فرعی ۱ با عضو اصلی محاسبه شود، گره 1010^6 دارای بیشترین تنش خواهد بود. گره مذکور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، موقعیت ۲۲۵ درجه‌ای بر روی محیط دایره محل تقاطع واقع شده است. بر این اساس تحلیل خستگی بر روی این گره انجام می‌شود.



شکل ۱۲- مقادیر تنش برای گره‌های مختلف در محل تقاطع ۱ BRACE با CHORD در بارگذاری‌های مختلف

۵-۵- بارگذاری و شرایط مرزی

در تحقیق صورت گرفته در این مقاله از روش بارگذاری تکعضوی و الگوهای بارگذاری مختلف محوری، لنگر خمشی درون و برون صفحه‌ای در هر یک از حالات نیروهای اعمال شده بر انتهای عضوهای اصلی^۱ و فرعی^۲ اتصال، استفاده شده است. همچنین با اعمال نیرو بر روی هر یک از عضوهای اتصال، انتهای سایر عضوها توسط تکیه‌گاه‌های گیردار، نگه داشته شده است. به منظور بدست آوردن نتایج دقیق‌تری از تحلیل تنش اتصال، طول هر یک از اعضای بارگذاری شده برابر با طول واقعی عضوهای اتصال بر روی سازه است، که مقادیر نیروهای داخلی مربوط به آن‌ها در تحلیل دینامیکی استخراج شده است. به علاوه، طول سایر عضوها به گونه‌ای است که تکیه‌گاه‌های انتهایی آنها از نظر تنش هیچ اثری بر روی محل اتصال اعضا با یکدیگر نداشته باشند. در این تحقیق، طول یاد شده چهار برابر قطر عضو در نظر گرفته شده است[۱۱]. نحوه اعمال نیروهای مربوط به عضوهای اتصال به این صورت است که یک جفت نیرو بر اساس حداکثر و حداقل مقدار بدست آمده از تحلیل دینامیکی، در هر الگوی بارگذاری بر روی عضو وارد شده و تحلیل خستگی انجام می‌شود. محدوده بارگذاری یاد شده، بزرگترین محدوده ممکن برای نوسان نیرو بوده که منجر به بیشترین آسیب خستگی در اتصال می‌شود.

۶- تحلیل خستگی اتصال

به منظور ترکیب تنش‌های حاصل شده از سه حالت بارگذاری فوق (محوری، لنگر خمشی درون و برون صفحه‌ای) از روش ارائه شده در آیین نامه API استفاده شده است[۹].

فرمول مربوط به این حالت ترکیب تنش عبارتند از:

$$S_{HS} = SCF_{ax} \cdot \sigma_{ax} + \sqrt{(SCF_{IPB} \cdot \sigma_{IPB})^2 + (SCF_{OPB} \cdot \sigma_{OPB})^2} \quad (5)$$

¹ Chord

² Brace

راستای موج غالب دارای بیشترین مقدار است. در صورتی که آسیب این گره با استفاده از ترکیب تنش API و در شرایط بارگذاری عضو اصلی ۲ محاسبه شود، با توجه به فرمول عمر خستگی (Fatigue.Life = $\frac{1}{d}d : damage$) عمر این اتصال در حدود ۳۷ سال خواهد شد. در نظر گرفتن این مطلب

که عمر اتصال بحرانی سکو در حدود دو برابر عمر کل سازه سکو است [۱۲]، نشان می‌دهد که عمر سکوی مدل شده توسط نرم‌افزار ANSYS در حدود ۱۸ سال است.

از آنجا که عمر سکوی جک آپ ایران‌خزر توسط نرم‌افزار SACS، در حدود ۲۰ سال تخمین زده شده است [۱۴]، مقایسه عمرهای بدست آمده از این دو نرم‌افزار، خطای ۷/۵ درصدی را نشان می‌دهد که قابل قبول است.

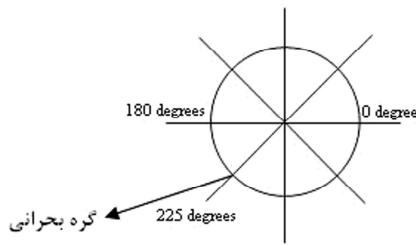
۱۲- بررسی تأثیر امتداد انتشاری امواج بر پاسخ سکوی خودبالابر تحت نیروی موج
امواج طبیعی دریا مجموعه نامحدودی از امواج با فرکانس‌ها و امتدادهای پیشروعی مختلف می‌باشند. بطوریکه هر یک از کمیت‌های مرتبط با امواج تصادفی دریا، با در نظر گرفتن مجموع تمام مولفه‌های امواج (امواج منظم) حاصل می‌شود.
تابع توزیع تجمعی انرژی موج در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۳]:

$$P_E(\theta) = \frac{1}{m_0} \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \int_0^\infty S(f, \theta) df d\theta \quad (7)$$

که در آن:

θ زاویه نسبت به امتداد پیشروعی موج و $S(F, \theta)$ تابع چگالی طیف امتدادی موج بوده و مقدار m_0 به عنوان مشخصه انرژی کل موج نزدیک شونده به سازه بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$m_0 = \int_0^\infty \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} S(f, \theta) df d\theta \quad (8)$$



شکل ۱۳- موقعیت گره بحرانی (گره ۱۰۱۰۶)

در شکل (۱۲) تنش بحرانی حاصل از رابطه پیشنهادی API برای گره‌های مختلف واقع در محل برخورد عضو فرعی ۱ با عضو اصلی (زوایای مختلف روی محیط دایره محل تقاطع)، ناشی از بارگذاری عضوهای اتصال نشان داده شده است.

۷-۱۱- تعیین میزان آسیب سالیانه و عمر خستگی

از آنجا که تحلیل‌های انجام شده برای موج طراحی صد ساله با ارتفاع ۱۲ متر انجام شده است، نیاز به داشتن تعداد سیکل‌های وقوع آن در سال، در محل عملیات سکو است. با توجه به اطلاعات ثبت شده در مرکز ملی اقیانوس‌شناسی، تعداد سیکل‌های وقوع این موج در سال برابر با ۴۵۰ عدد ثبت شده است. با توجه به این مطلب و قانون Palmgren-Miner، نتایج حاصل از تحلیل‌های خستگی برای گره بحرانی در بارگذاری عضو اصلی ۲ - که بیشترین خسارت را ناشی می‌شود- در جهت موج غالب، در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- آسیب سالیانه ناشی از خستگی تحت بارگذاری عضو ۲ CH برای گره ۱۰۱۰۶

الگوهای بارگذاری	میزان آسیب سالیانه (cycle/year) ترکیب تنش API
نیروی محوری	0.0275
مان درون صفحه	2.8E-8
مان برون صفحه	1.8E-10

با توجه به نتایج بدست آمده، میزان آسیب سالیانه گره ۱۰۱۰۶ تحت اثر بارگذاری محوری عضو اصلی ۲ در

منحنی توزیع انرژی در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در این منحنی θ زاویه تابش موج غالب است [۱۰].

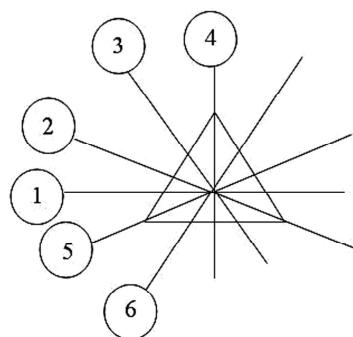


شکل ۱۴- نمودار توزیع تجمعی انرژی موج

با مقایسه شکل (۱۵) و (۴) زاویه موج غالب برابر نود درجه و میزان سهم انرژی انتقال یافته در سایر امتدادهای پیشروی امواج با استفاده از شکل (۱۴) بصورت جدول (۳) خواهد بود:

جدول ۳- درصد انتقال انرژی امواج در امتدادهای مختلف

امتداد	درصد انتقال انرژی %
۱	۳۴
۲	۲۳
۳	۹
۴	۲
۵	۲۳
۶	۹
مجموع	۱۰۰



شکل ۱۵- امتدادهای مختلف پیشروی امواج

شکل (۱۴) مقادیر $P_E(\theta)$ در S_{MAX} های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به مفهوم توزیع تجمعی انرژی موج، میزان تنفس حداکثر در اتصال بحرانی با در نظر گرفتن درصد انرژی انتقال یافته در هر یک از جهات پیشروی موج به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$(S_{stress})_{eff} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\Delta E)_{ij} (s_{stress})_{ij} \quad (9)$$

در این رابطه $(\Delta E)_{IJ}$ میزان انرژی انتقال یافته توسط موجی با فرکانس I ام درجهت (امتداد) پیشروی J ام، $(s_{stress})_{ij}$ میزان تنفس ناشی از پیشروی موجی با فرکانس I ام درجهت پیشروی J ام می‌باشد. با توجه به اینکه $\theta = 0$ راستای موج غالب است، سهم انرژی انتقال یافته در سایر امتدادهای پیشروی امواج بصورت جدول (۳) ارائه شده است. روش اساسی دیگر جهت توصیف کمیت‌های مختلف مربوط به امواج تصادفی، استفاده از رابطه ریاضی زیر است [۱۳]:

$$(10)$$

$$(x)_{eff} = \left[\frac{1}{m_{so}} \int_0^\infty \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S(f, \theta) X^2(f, \theta) d\theta df \right]^{\frac{1}{2}}$$

که در آن x_{eff} ، کمیت معادل مربوطه، به موج تصادفی بوده و X کمیت‌های مختلفی از موج، ضریب پیچش موج k_r ، جایجاپی، تنفس و ... است. مقدار m_{so} نیز از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$m_{so} = \int_0^\infty \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S(f, \theta) d\theta df \quad (11)$$

با در نظر گرفتن رابطه‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) برای محاسبه تنفس خواهیم داشت:

$$(S_{max})_{eff} = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\Delta E)_{ij} (s_{max})_{ij}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

که در آن $(\Delta E)_{IJ}$ و $(s_{max})_{ij}$ کمیت‌هایی است که پیشرت توضیح داده شد.

عمرهای بدست آمده از این دو نرم افزار، خطای ۷/۵ در محاسبات ظاهر می شود.

-۲- آسیب خستگی ناشی از درنظر گرفتن تمامی امتدادها برابر با $d = 0.0206$ است. در حالی که با درنظر گرفتن راستای موج غالب این آسیب به $d = 0.0275$ تغییر یافته است. این مطلب نشان می دهد که آسیب ناشی از خستگی راستای موج غالب به تنها ۰.۲۵ درصد بیشتر از آسیب بدست آمده از در نظر گرفتن سایر راستاهاست.

-۳- در طراحی سکوی حاضر در نظر گرفتن راستای موج غالب به تنها ۰.۲۵ درصد شرایط طراحی را ارضاء نماید.

۱۴- مراجع

1-Williams M., Thompson R.G., Houlsby G., "Nonlinear Dynamic Analysis of Offshore Jack Up Unit Computers and Structures", 1998.

2-Boswell L. F., "The Jack Up Drilling Platform and Operation", Gulf publishing Company, 1986.

3-API-RP-2A-1993, "Recommended Practice for Planning, Design, Construction and Inspection of Offshore Structures-Working Stress Design".

4-Det Norske Veritas (DNV), "Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures", 1981.

5- دقیق، محمد و گلزاره باشیز، رضا "بررسی انتقال بار بین سکوی حفاری جک آپ و یک سکوی ثابت دریایی"، چهارمین همایش ملی صنایع دریایی، تهران، بهمن ماه ۸۱.

6-Boswell L. F. and Dmello, C. A. and Edwards, A. G., "Mobile Offshore Structure, Elsevier Applied Science London and New York, 1998.

7-Grundlehner G.J. The Development of a Simple Model for Deformation Behavior of Leg to Hull Connections of Jack Up", Thesis, TU Delft, August 1989.

حال، با استفاده از روش تعیین کمیت های مؤثر تبدیلات مربوط به پدیده های امواج تصادفی تأثیر امتداد انتشاری بر آسیب سالیانه سازه تحت موج با توجه به این موضوع که امتداد یک در شکل (۱۵) امتداد غالب انتخاب شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۴- روش تعیین پارامترهای مؤثر تبدیلات مربوط به پدیده های تصادفی برای آسیب خستگی بیشینه

امتداد (درجه)	درصد انتقال انرژی %	آسیب خستگی گره ۱۰۱۰۶	(حاصل ضرب انرژی در آسیب) ضربدر قدر مطلق آسیب
(۱) امتداد (۰)	34 %	0.0275	2.57e^-4
(۲) امتداد (۳۰)	23 %	0.00312	2.24e^-6
(۳) امتداد (۶۰)	9 %	0.00011	1.09e^-9
(۴) امتداد (۹۰)	2 %	0.00198	7.84e^-8
(۵) امتداد (-۳۰)	23 %	0.0243	1.36e^-4
(۶) امتداد (-۶۰)	9 %	0.01847	3.07e^-5
مجموع	100 %		4.26e^-4 $(d_{\max})_{eff} = 0.0206$

با توجه به رابطه عمر خستگی، در صورتی که راستای مختلف امواج در نظر گرفته شود، عمر اتصال در حدود ۴۹ سال خواهد شد. حال آنکه عمر بدست آمده از تحلیل خستگی برای راستای موج غالب برابر با ۳۷ سال بوده است.

۱۳- نتیجه گیری

۱- عمر سکوی مدل شده توسط نرم افزار ANSYS در حدود ۱۸ سال است. از آنجا که عمر این سکو توسط نرم افزار SACS، ۲۰ سال فرض شده، با مقایسه

- 11-Lee M.M.K. and Wilmshurst S.R., "Numerical Modeling of CHs Joints with Multiplanar Double K configuration", journal of Const. Steel Research, No. 32, 1995.
- 12- هوشیاری، ایرج، پایان نامه کارشناسی ارشد سال ۱۳۶۸، "تحلیل تنش و بررسی خستگی در اتصالات لوله‌ای سکوهای دریایی"، دانشگاه صنعتی شریف.
- 13-Goda Y., "Random Sea and Design of Maritime Structures". World Scientific, Singapore, 2000.
- 14- مستندات موجود در شرکت صدرا - واحد نکاء و شرکت نفت خزر در خصوص جک آپ ایران خزر
- 8-Brekke J.N. et all, "Calibration of a Jack Up Structural Analysis Procedure Using Field Measuremant from a North Sea Jack Up proc, Offshore Technology Conference, 1990.
- 9-API – RP-2A-1993, "Recommended Practice for Planning, Design, Construction and Inspection of Offshore Structures- Working Stress Design".
- 10-Etube L.S., "Fatigue and Fracture Mechanics of Offshore Structures", Professional Engineering Publishing, 1998.