

## بررسی اثرات ناشی از خستگی در اتصالات سکوی جک‌آپ در دریای خزر

علی یقین<sup>۱</sup>، حسن صیادی<sup>۲</sup>

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، جریان‌های 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 جک‌آپ 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 جریان‌های دریایی برابر ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه، از فنرهای الاستیکی استفاده گردیده 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 در نظر گرفتن طول مؤثر عضوها و تکیه‌گاه‌های مناسب، مدل‌سازی شده و پس از اعمال بارهای سه‌گانه (نیروی محوری، لنگر خمشی درون‌صفحه و لنگر خمشی 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 جک‌آپ پیشنهاد شده و سپس از روی تنش بحرانی در اتصالات این سکو عمر تقریبی آن را محاسبه کرد. **کلمات کلیدی:** جک‌آپ، 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

## 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 [۱ و ۲].

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

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 عمر سازه بدست آمد. در پایان نیز با استفاده از روش احتمالاتی توزیع تجمعی انرژی موج اثرات خستگی در راس‌های مختلف انتشاری امواج مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- نیروهای وارده بر سکوی جک‌آپ

اصولاً 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، نیروهای مستقل از عملیات سکوست. دسته اخیر شامل نیروهای ثقلی و نیروهای ناشی از شرایط محیطی مثل باد، موج و جریان آب دریا، زلزله، برف، یخ و همچنین تغییرات هیدرواستاتیکی و تأثیر نیروی شناوری بر اعضا 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 عمده 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.

### ۳- مدل‌سازی سکوی جک‌آپ

یک سکوی جک‌آپ از چهار قسمت اصلی (۱- عرشه<sup>۱</sup>، ۲- پایه‌ها<sup>۲</sup>، ۳- اتصال بدنه به پایه یا سیستم بالابری<sup>۳</sup>، ۴- اتصال پایه به خاک<sup>۴</sup>) تشکیل شده است. در مدل‌سازی سکوی جک‌آپ 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 سکوی در نرم‌افزار ANSYS مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارتند از:

- ۱) المان BEAM 188 به منظور مدل‌سازی عرشه
  - ۲) المان MASS 21 به منظور مدل‌سازی جرم‌های متمرکز عرشه
  - ۳) المان لوله‌ای PIPE 59 به منظور مدل‌سازی پایه‌های سکوی جک‌آپ
  - ۴) المان لوله‌ای PIPE 20 به منظور مدل‌سازی اسپادکن
  - ۵) المان فنر COMBIN 39 به منظور مدل‌سازی تکیه‌گاه‌ها
  - ۶) المان پوسته‌ای SHELL 63 به منظور مدل‌سازی اتصال بحرانی
- در ادامه به جزئیات هر یک از موارد یاد شده در مدل‌سازی سکوی پرداخته شده است.

### ۴- مدل‌سازی عرشه

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

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

### ۵- مدل‌سازی پایه

مهندس یک پایه سکوی خودبالابر از یک قاب فضایی تشکیل شده که شامل وترها، مهارهای افقی، قائم و مورب به قطرهای مختلف به صورت اتصالات N و K شکل و یا ترکیبی از آنها است. شکل اتصالات پایه‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای برای سیستم‌های بالابری مختلف فرق می‌کند [۲].

به منظور مدل‌سازی پایه سکوی که تحت اثر نیروهای امواج، هیدرواستاتیکی، هیدرودینامیکی و اثرات جرم‌افزوده است، از المان PIPE 59 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 مشخص‌شدن محدوده تنش تمامی المان‌های پایه سکوی مورد مطالعه شرط فوق ارضا 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 به‌طور کامل توسط سیستم قفل شونده حذف می‌گردد. با توجه به اینکه جک‌آپ 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 ارضا می‌کند [۶].

### ۷- مدل‌سازی اسپادکن

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

<sup>1</sup> Hull

<sup>2</sup> Legs

<sup>3</sup> Fixation System

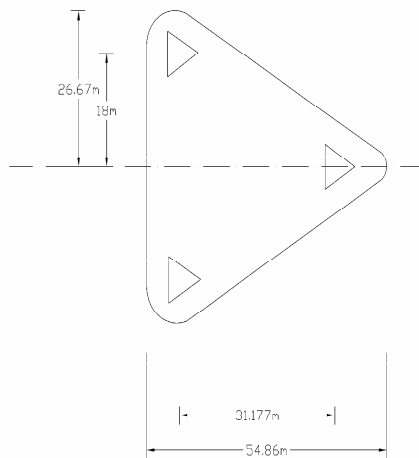
<sup>4</sup> Spudcan

## ۹- معرفی جک‌آپ مورد مطالعه و شرایط محیطی

مشخصات اصلی سکوی جک‌آپ 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 نرم‌افزار 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 حد نهایی جریان در سطح آب
1.0	ضریب پسا
1.8	ضریب اینرسی



شکل ۲- فاصله بین پایه‌های جک‌آپ 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، حجم بودن المان SOLID و همچنین محدودیت‌های محاسباتی رایانه‌های معمول، می‌توان از المان PIPE 20 استفاده نمود. در این مدلسازی، المان PIPE 20 با توجه به خصوصیات واقعی اسپادکن (جرم و صلبیت) مدل‌سازی شده است. المان PIPE 20 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 جک‌آپ 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  $\zeta_j, \zeta_i$  نیز، طبق آیین‌نامه API برابر با ۰/۰۲ است [۳].  
با انجام تحلیل ارتعاش آزاد و بدست آوردن مدهای ارتعاش آزاد سازه، دوره‌های تناوب طبیعی سازه بدست می‌آید:

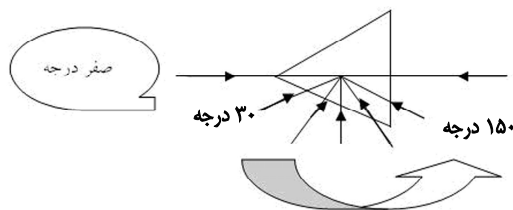
$$\begin{aligned} T_1 &= 7.51 \text{ sec} \\ T_2 &= 7.49 \text{ sec} \end{aligned} \quad (3)$$

با محاسبه فرکانس‌های طبیعی از روی مقادیر فوق و سپس تعیین سرعت‌های زاویه‌ای، مولفه‌های  $\alpha$  و  $\beta$  با توجه به روابط (۱) و (۲) بدست می‌آیند:

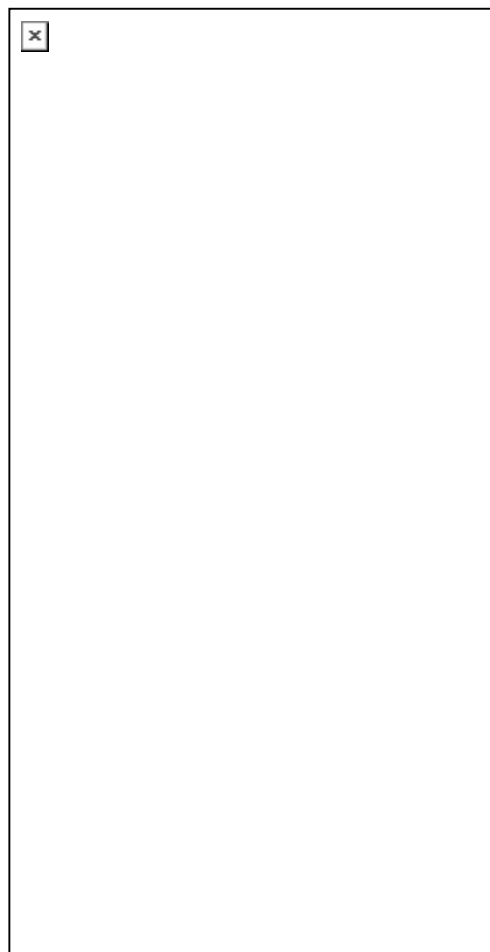
$$\alpha = 0,01675 \quad (4)$$

$$\beta = 0,0238$$

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 وارده 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

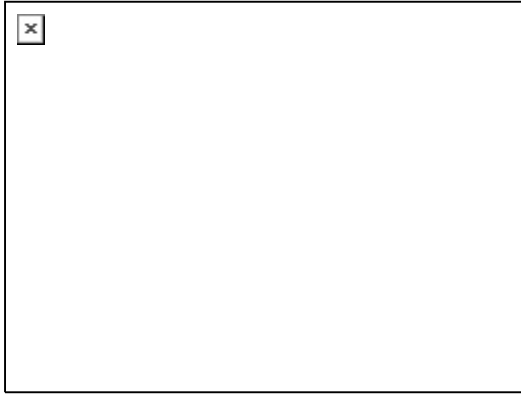


شکل ۳- مقطع پایه جک‌آپ مورد مطالعه

### 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  $\alpha$  و  $\beta$ ، به عنوان اطلاعات ورودی نرم-افزار لازم است. برای تعیین این دو مؤلفه، باید به تحلیل ارتعاش آزاد بر روی سازه پرداخت. بدین ترتیب فرکانس‌ها و پروده‌های طبیعی سازه مشخص می‌شود. با محاسبه فرکانس‌های سازه از روی مقادیر فوق و سپس تعیین سرعت‌های زاویه‌ای ( $\omega$ )، مؤلفه‌های  $\alpha$  و  $\beta$  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

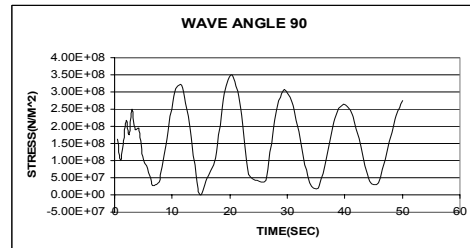
به منظور اطمینان از صحت مدل سازی و نتایجی که از تحلیل‌ها استخراج می‌شود، یک سکوی مشخص که پاسخ آن در برابر نیروهای محیطی موجود است، با روشی که در این تحقیق پیشنهاد شده است، مدل-سازی شد و نتایج حاصله با نتایج موجود برای سکو مقایسه گردید [۶]. ارزیابی اطلاعات بدست آمده بیانگر امکان استفاده از روش مذکور است.

## ۱۱- تحلیل خستگی اتصال بحرانی

### ۱۱-۱- تعریف خستگی

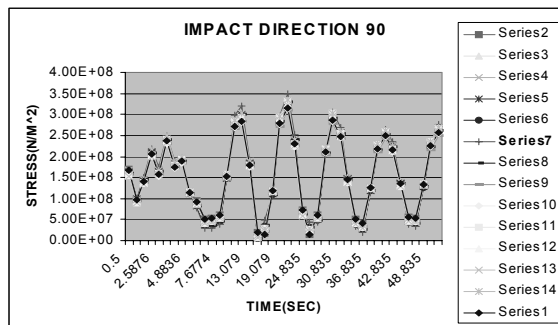
تکرار بارگذاری و باربرداری، حتی اگر تنش‌ها به محدوده پلاستیک نیز نرسد، می‌تواند باعث خرابی

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

#### ۱۱-۴- شبکه بندی اتصال

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



شکل ۱۱- شبکه بندی اتصال بحرانی

مصلح گردد. پدیده کم شدن مقاومت تحت تأثیر نیروهای تکرارشونده را خستگی مصلح<sup>۱</sup> نامند. یک سکوی جک آپ از اتصالات لوله ای جوش داده شده در اشکال، ابعاد و ظرفیت های باربری مختلف تشکیل می شود. این اتصالات می توانند تحت تأثیر ترکیب های مختلف بارگذاری شامل سه مؤلفه اصلی نیروی محوری، لنگر خمشی درون صفحه ای (IPB) و لنگر خمشی برون صفحه ای (OPB) مطابق شکل (۹) قرار گیرد [۱۰].



شکل ۹- مؤلفه های مختلف نیروهای وارده بر یک اتصال لوله ای در سکوی جک آپ

#### ۱۱-۲- مدل سازی اتصال

به منظور مدل سازی اعضای اتصالات در تحقیق حاضر، از المان پوسته ای نازک Shell 63 استفاده شده است. این المان قابلیت رفتار خمشی<sup>۲</sup> و غشایی<sup>۳</sup> در محدوده الاستیک را داراست. 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 می باشد.

#### ۱۱-۳- ابعاد هندسی مدل اجزا محدود اتصال

NN

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

<sup>1</sup> Fatigue  
<sup>2</sup> Bending  
<sup>3</sup> Membranous

## ۱۱-۵- 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<sup>۱</sup> و فرعی<sup>۲</sup> 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.

## ۱۱-۶- 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:

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

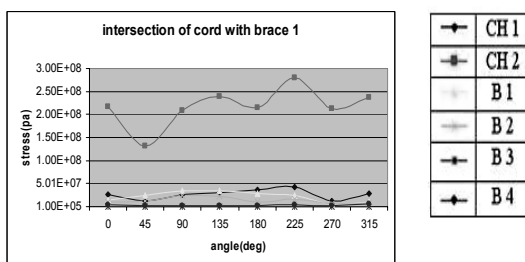
<sup>1</sup> Chord

<sup>2</sup> Brace

که در آن  $SCF_{ax}$ ،  $SCF_{IPB}$  و  $SCF_{OPB}$  ضرایب تمرکز تنش برای نیروهای محوری، لنگر خمشی درون صفحه-ای و برون صفحه‌ای است.  $\sigma_{ax}$ ،  $\sigma_{IPB}$  و  $\sigma_{OPB}$  به ترتیب عبارتند از مؤلفه‌های تنش ناشی از نیروی محوری، لنگر خمشی درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای. بدین ترتیب تنش بحرانی معادل  $S_{HS}$  بدست می‌آید. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر، تنش‌های بحرانی ناشی از نیروی محوری ( $\sigma_{ax}'$ ) و لنگر خمشی درون صفحه‌ای ( $\sigma_{IPB}'$ ) و برون صفحه‌ای ( $\sigma_{OPB}'$ )، مستقیماً از تحلیل خستگی اتصال بدست 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 ۱۰۱۰۶ دارای بیشترین تنش خواهد بود. گره مذکور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، موقعیت ۲۲۵ درجه-ای 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 BRACE 1 با CHORD در بارگذاری‌های مختلف

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 جک‌آپ ایران خزر 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

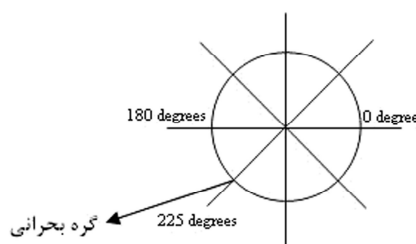
امواج طبیعی دریا مجموعه نامحدودی از امواج با فرکانس‌ها و امتدادهای پیشروی مختلف می‌باشند. بطوریکه هر یک از کمیت‌های مرتبط با امواج تصادفی دریا، با در نظر گرفتن مجموع تمام مولفه‌های امواج (امواج منظم) حاصل می‌شود. تابع توزیع تجمعی انرژی موج در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۳]:

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

که در آن:

$\theta$  زاویه نسبت به امتداد پیشروی 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:

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



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.

## ۱۱-۷- تعیین میزان آسیب سالیانه و عمر خستگی

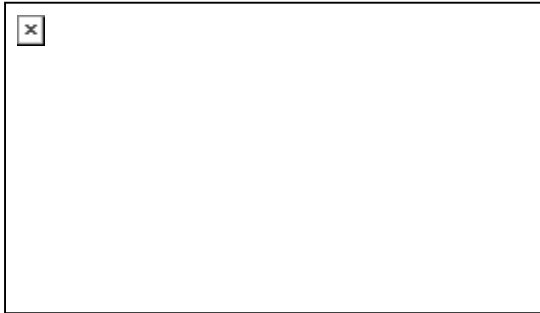
از آنجا که تحلیل‌های انجام شده برای موج طراحی صد ساله با ارتفاع ۱۲ متر انجام شده است، نیاز به داشتن تعداد سیکل‌های وقوع آن در سال، در محل عملیات سکو است. با توجه به اطلاعات ثبت شده در مرکز ملی اقیانوس‌شناسی، تعداد سیکل‌های وقوع این موج در سال برابر با ۴۵۰ عدد ثبت شده است. با توجه به این مطلب و قانون 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 CH 2 برای گره ۱۰۱۰۶

الگوهای بارگذاری	میزان آسیب سالیانه (cycle/year) بر اساس معیار ترکیب تنش API
نیروی محوری	0.0275
ممان درون صفحه	2.8E-8
ممان 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  $\theta$  زاویه تابش موج غالب است [۱۰].

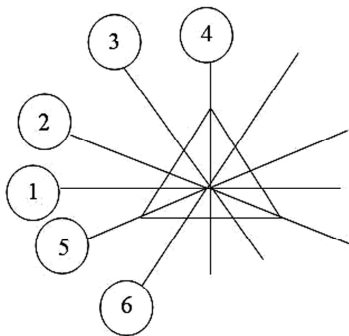


شکل ۱۴- نمودار توزیع تجمعی انرژی موج

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 تنش 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 تنش ناشی از پیشروی موجی با فرکانس  $i$  ام در جهت پیشروی  $j$  ام می‌باشند. 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]:

$$(x)_{eff} = \left[ \frac{1}{m_{so}} \int_0^{\infty} \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S(f, \theta) \cdot X^2(f, \theta) d\theta df \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

که در آن  $x_{eff}$  کمیت معادل مربوطه، به موج تصادفی بوده و  $X$  کمیت‌های مختلفی از موج، ضریب پیچش موج  $k_r$ ، جابجایی، تنش 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 تنش 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 پیشتر توضیح داده شد.

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

۲- آسیب خستگی ناشی از در نظر گرفتن تمامی امتدادها برابر با  $d = 0.0206$  است. در حالی که با در نظر 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 تنهایی، 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 تنهایی می تواند شرایط طراحی را ارضا 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.

۵- دقیق، محمد و گلزاده 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 Ewards, 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 پیشینه

امتداد (درجه)	درصدانتقال انرژی %	آسیب خستگی گره ۱۰۱۰۶	(حاصلضرب انرژی در آسیب) ضربدر قدرمطلق آسیب
0 (امتداد ۱)	34 %	0.0275	$2.57e^{-4}$
30 (امتداد ۲)	23 %	0.00312	$2.24e^{-6}$
60 (امتداد ۳)	9 %	0.00011	$1.09e^{-9}$
90 (امتداد ۴)	2 %	0.00198	$7.84e^{-8}$
30- (امتداد ۵)	23 %	0.0243	$1.36e^{-4}$
60- (امتداد ۶)	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.

۱۲- هوشیاری، ایرج، پایان‌نامه 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.

۱۴- مستندات موجود در شرکت صدرا - واحد نكاء و شرکت نفت خزر در خصوص جک‌آپ ایران خزر

8-Brekke J.N. et all, "Calibration of a Jack Up Structural Analysis Procedure Using Field Measurements 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.