

ارزیابی شرایط تکیه گاهی ساده سازی شده در اتصالات سکوهای جک آپ

مهدی ایرانمنش^{۱*}، مرضیه هاشم زاده خامنه^۲

۱- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: imehdi@aut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد کشتی سازی از دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: m.hashemzadeh.kh@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۹/۱۲/۲۳

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۱۹/۱۰/۲۹

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس شناسی ۱۳۹۰، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس شناسی است.

چکیده

در این مقاله اتصالات جوشی در پایه سکوی جک آپ Super M2 که در حال ساخت در داخل کشور است، به صورت سازه ای مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس بررسی های صورت گرفته، مشخص گردید که در تحقیقات پیشین اتصالات سکوی جک آپ عمدتاً با اعمال شرایط تکیه گاهی ساده سازی شده تحلیل شده اند. در این تحقیق با بهره گیری از روشی دیگر، در ابتدا سکو به طور کامل مدل سازی و تحت شرایط بارگذاری محیطی خلیج فارس تحلیل قطعی (Deterministic Analysis) استاتیکی شد. در نهایت بحرانی ترین اتصال همراه با حجم جوش، به کمک نرم افزار اجزای محدود مدل سازی شده و با اعمال جابه جایی های اتصالات مجاور (حاصل از محاسبات تحلیل کامل رفتار سکو) به عنوان شرایط مرزی به آن، مورد ارزیابی قرار گرفت.

براساس تحلیل نتایج، مشخص گردید که استفاده از روش اعمال جابه جایی حقیقی به عنوان شرایط مرزی به مدل اتصال نتایج دقیق تری را نسبت به شرایط تکیه گاهی ساده سازی شده به دست می دهد. همچنین سکوی جک آپ Super M2 دارای استحکام سازه ای مناسب در شرایط محیطی خلیج فارس است. با توجه به خرابایی بودن پایه های سکوی جک آپ، تغییر راستای بارگذاری محیطی سبب تغییرات شدیدی در بزرگی تنش های بیشینه در پایه ها نشده و تنها محل رویداد آن به عضو سازه ای دیگر تغییر می یابد.

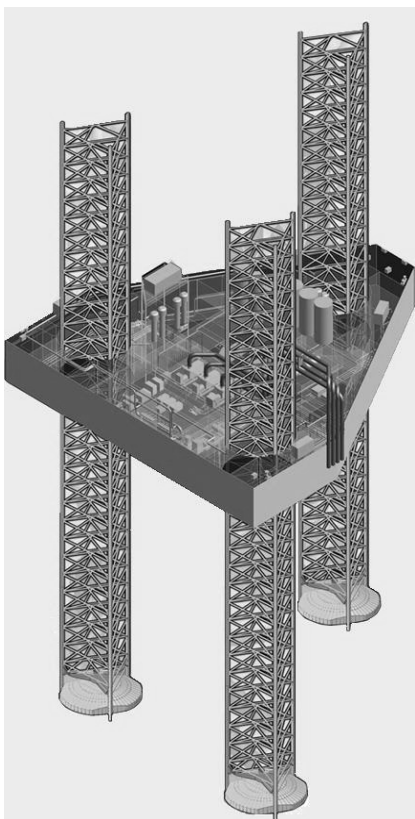
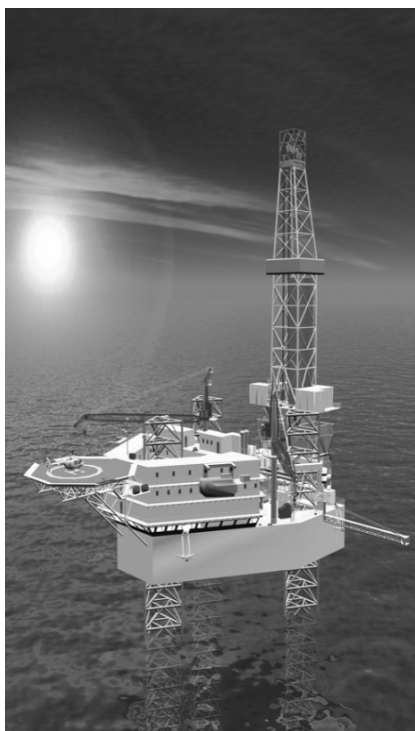
کلمات کلیدی: سکوهای جک آپ، تحلیل قطعی استاتیکی، تحلیل اتصالات، شرایط مرزی جابه جایی

۱. مقدمه

بهره برداری در آب های عمیق، توانایی تطابق بیشتر سکو با بارهای متغیر محیطی، توانایی جابجایی بیشتر و ایمن تر و هزینه کمتر دسته بندی نمود (Tirant and Perol, 1993). نتیجه تلاش هایی که برای دستیابی به این اهداف شد، پیشرفت جک آپ ها و طراحی های مختلف آنها را در پی داشت. بر اساس بررسی های صورت گرفته در مطالعات پیشین،

تلاش های فراوانی در زمینه طراحی جک آپ ها بین سال های ۱۹۵۵ تا ۱۹۷۰ صورت گرفت. اهداف کلی در تحقیقاتی که در زمینه ساخت و بهره برداری از جک آپ ها دنبال می شد را می توان به چهار هدف اصلی دستیابی به قابلیت های بیشتر جهت

تصویر سکوی جک‌آپ Super M2 که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- سکوی جک‌آپ Super M2 (F & G Company Reports, 2008)

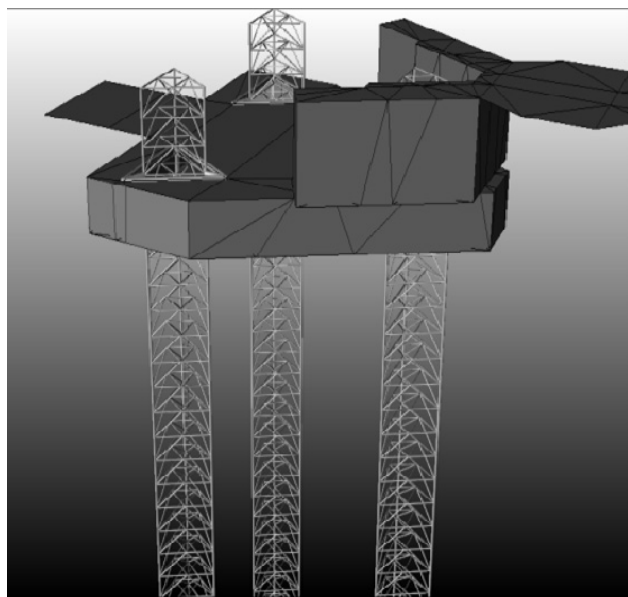
سکوه‌های جک‌آپ از جنبه‌های متفاوتی همچون پایداری، رفتار دینامیکی، استحکام سازه‌های به‌صورت مدل‌های آزمایشگاهی و یا تحلیلی دوبعدی و سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در فرآیند طراحی سازه‌های جک‌آپ اغلب باید سه بخش نیروهای محیطی، سازه و خاک (فونداسیون) را در نظر گرفت.

هدف اصلی در این پژوهش، ارزیابی اتصالات جوشی از نظر سازه‌ای در پایه‌های سکوی جک‌آپ Super M2 است که در حال ساخت در داخل کشور است. لازم به ذکر است، از آنجایی که آئین‌نامه‌ها خطاهای مربوط به طراحی و ساخت را پوشش می‌دهند، در این پژوهش از آئین‌نامه AWS جهت طراحی و مدل‌سازی مقطع جوش استفاده و تمام موارد مربوط به سازه و جنس مواد با توجه به این آئین‌نامه به مدل اعمال شد. همچنین فرض گردید که ساخت اتصالات در کارخانه در شرایط مورد قبول صورت می‌گیرد. شایان ذکر است که فرض مذکور با توجه به انجام آزمایش‌های غیر مخرب، فرضی منطقی به نظر می‌رسد. بنابراین تنها به تحلیل سازه‌ای جوش به‌عنوان مهم‌ترین عضو سازه‌ای پرداخته شده است. براساس بررسی‌های صورت گرفته در مطالعات پیشین، مشخص گردید که عموماً تحلیل سازه‌ای اتصالات در پایه‌های سکوی جک‌آپ با اعمال شرایط تکیه‌گاهی ساده‌سازی شده در انتهای آزاد المان‌های تشکیل‌دهنده‌ی اتصال مدل شده، صورت گرفته است. به‌منظور اجتناب از ساده‌سازی مذکور، در گام اول در این تحقیق، رفتار سکوی جک‌آپ تحت پیشینه‌ی بارگذاری محیطی خلیج‌فارس ارزیابی شده و میزان تغییرشکل‌ها، نیروها و تنش‌های داخلی در کلیه اجزای سازه‌ای آن با به‌کارگیری نرم‌افزار SACS محاسبه گردید. سپس بحرانی‌ترین اتصال در پایه سکوی جک‌آپ در نرم‌افزار ANSYS با در نظر گرفتن حجم‌جوش مدل‌سازی و مورد ارزیابی سازه‌ای قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی اتصال مذکور، میزان جابه‌جایی محاسبه شده بر اساس تحلیل رفتار کل سکو، به‌عنوان شرایط مرزی به المان‌های تشکیل‌دهنده‌ی اتصال در مدل ANSYS اعمال گردید. تکنیک مذکور که در تحقیقات پیشین بررسی شده در مورد سکوه‌های جک‌آپ وجود نداشته، اما در تحلیل سازه‌ها به‌کرات مورد استفاده قرار گرفته است، ساده‌سازی‌های ناشی از اعمال شرایط تکیه‌گاهی ساده در اتصال را به‌همراه ندارد. در نهایت، اتصال مدل شده با شرایط تکیه‌گاهی ساده و با اعمال نیروها و گشتاورهای داخلی در اتصال بحرانی مورد ارزیابی مجدد قرار گرفته و نتایج حاصل از دو تحلیل با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

(۲۰۰۹) تمرکز تنش در پنجه‌ی جوش در اتصالات K شکل لوله‌ای را مورد مطالعه قرار داد. وی به بررسی مدل‌های مختلف استحکام ورق Rack برای اتصالات K شکل، توسط روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، پرداخت (Woghiren and Brennan, 2009).

۲. مدل‌سازی و اعمال بارگذاری

به‌منظور تحلیل رفتار عمومی سکوی جک‌آپ، این سکو با توجه به نقشه‌های مهندسی در نرم‌افزار SACS مدل‌سازی و براساس نتایج حاصل از تحقیقات نلسون (۲۰۰۱)، شرایط تکیه‌گاهی گیرداری به انتهای پایه‌های آن اعمال گردید. در شکل ۲ مدل این سکو در این نرم‌افزار نشان داده شده است. المان‌های سازه‌ای تشکیل دهنده پایه در مدل از نوع المان‌های تیر-ستون^۹ بوده که در محل هر گره دارای سه درجه آزادی حرکتی جابه‌جایی و سه درجه آزادی حرکتی دورانی هستند. مشخصات سکوی جک‌آپ تحت بررسی و شرایط محیطی آن در جدول ۱ ارائه شده است. در ضمن جنس مواد پایه با توجه به نقشه‌های مهندسی برای المان‌های اصلی عمودی در پایه EN-S690 بوده و برای المان‌های میانی و بادبندها EN-S355 است که با توجه به مشخصات فولادها در جداول استاندارد فولاد، به مدل اعمال گردید.



شکل ۲- مدل سکوی جک‌آپ در نرم‌افزار SACS

از میان پژوهش‌های انجام شده‌ی مرتبط با تحلیل کل سکو می‌توان به پژوهش انجام شده توسط ویلیامز^۱ و همکاران (۱۹۹۶) اشاره نمود. ایشان رفتار دینامیکی سکوی جک‌آپ را بر اساس نظریه امواج غیرخطی، برای مدل غیر خطی سازه اسپادکن (بر اساس نظریه پلاستیسیته) در ماسه استحکام یافته نهایی تحلیل نمودند (Williams et al., 1999).

از جمله پژوهش‌های دیگر می‌توان به ارزیابی رفتار سکوی جک‌آپ به‌صورت مدل‌های سه بعدی توسط برک و همکاران^۲ (۱۹۹۰) اشاره کرد. در این مدل از ساده‌سازی پایه با ۶ گره سازه‌ای، در شرایط بستر دریای شمال، استفاده شده است (Cassidy, 1999). همچنین دقیق و همکاران^۳ (۱۹۹۷) نیز رفتار سکوی جک‌آپ را با بهره‌گیری از مدل سه بعدی المان محدود، با ساده‌سازی هر پایه با ۱۴ گره سازه‌ای، ارزیابی کردند (Cassidy, 1999). نلسون و همکاران^۴ (۲۰۰۱) تحقیقات ارزشمندی بر روی سکوی جک‌آپ Santa Fe Magellan انجام داده و رفتار این سکو را تحت شرایط توفانی منطقه عملیاتی اندازگیری و سپس تحت آن شرایط توفانی مدل اجزای محدود را تحلیل و تدوین نموده است. آنها چهار شرط تکیه‌گاهی مفصلی، گیرداری و دو شرط پیشنهاد شده توسط SNAME^۵ را در مدل اجزای محدود اعمال نمودند و به این نتیجه رسیدند که شرط تکیه‌گاهی گیردار نسبت به باقی شروط تکیه‌گاهی، نتایج واقعی‌تری در بر دارد (Nelson et al., 2001). همچنین از جمله تحقیقات مربوط به بررسی و تحلیل اتصالات می‌توان به پژوهش پارگتر^۶ (۲۰۰۳) اشاره کرد که در آن به بررسی قابلیت جوش فولاد مورد استفاده در سکوی جک‌آپ پرداخته شده است. وی در این تحقیق بهره‌گیری از برخی تکنیک‌های جوشکاری به‌منظور کاهش مقدار ترک‌های ناشی از ترک هیدروژنی و ترک ناشی از خستگی را پیشنهاد داده است (Pargter, 1989). وندروگ^۷ به بررسی اثر شرایط مرزی ساده شده مختلف در تحلیل اتصالات K شکل با فاصله بین بادبندها پرداخت و به این نتیجه رسید که تغییر شرایط ساده بر روی کورد و بادبندها در اکثر موارد، در نتایج تحلیل سازه‌ای تفاوت چندانی به وجود نمی‌آورد (Vegte, 2004). ویرن^۸

¹ Williams et al.

² Brekke et al.

³ Daghigh et al.

⁴ K. Nelson et al.

⁵ Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME)

⁶ Partger

⁷ G.J. van der Vegte

⁸ C.O. Woghiren

⁹ Beam-Column Element

قطر المان‌های سازه‌ای پایه‌های سکوی جک‌آپ، بر اساس جدول ۲، مقدار پارامتر ضریب پسا برابر ۰/۶۲ و مقدار پارامتر ضریب لختی برابر ۱/۸ خواهد بود.

بارگذاری نیروی باد بر سازه جک‌آپ بر اساس آئین‌نامه API انجام شد (رابطه ۲) (American Petroleum Institute, 2000).

$$F = (\rho/2)(V)^2 C_s A \quad (2)$$

که در رابطه فوق، ρ چگالی هوا، V سرعت باد، C_s ضریب شکل (که برای هر شکل با توجه به پیشنهاد آئین‌نامه API تعیین می‌گردد) و A تصویر مقطع المان در برابر باد هستند.

نیمرخ تغییرات سرعت باد بر حسب ارتفاع به صورت رابطه ۳ تعیین می‌گردد:

$$V(1 \text{ hr}, z) = V(1 \text{ hr}, z_R) (z/z_R)^{0.125} \quad (3)$$

که در رابطه‌ی فوق، $V(1 \text{ hr}, z)$ سرعت باد با دوره بازگشت ۱ ساعت در ارتفاع دلخواه z ، $V(1 \text{ hr}, z_R)$ سرعت باد با دوره بازگشت ۱ ساعت در ارتفاع مرجع ۱۰ متر و z_R ارتفاع مرجع (که برابر ۱۰ متر است) هستند.

رابطه‌ی نیروی ناشی از جریان‌های دریایی وارده بر المان‌های سازه‌ای سکو بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌گردد (Patel, 1990).

$$F = 0.5 \rho A C_d U^2 \quad (4)$$

کلیه پارامترها قبلاً تعریف شده است.

لازم به توضیح است که با توجه به تخصصی بودن نرم‌افزار SACS در تحلیل سازه‌های ثابت دریایی، محاسبه بارگذاری امواج با ارائه ضرایب پسا و لختی بر اساس جدول ۲ به صورت خودکار در نرم‌افزار انجام پذیرفته و نرم‌افزار بیشینه نیروی امواج با مشخصات مذکور در جدول ۱ را محاسبه و به سازه اعمال می‌نماید. همچنین بارگذاری باد نیز بر اساس آئین‌نامه API (رابطه ۲) در نرم‌افزار SACS به صورت خودکار انجام می‌پذیرد. لازم به ذکر است که سطوح بادخور تعیین کننده (همچون دکل حفاری) که در تحلیل سازه‌ای در این پژوهش اهمیت چندانی ندارند، در مدل تعریف شده، به گونه‌ای که این سطوح در مدل دیده نشده ولی نیروهای باد وارده بر آنها به سکو اعمال می‌گردند. پروفیل جریان دریایی در عمق آب به صورت یکنواخت فرض شده که نیروی حاصل از آن نیز بر اساس رابطه ۴ به صورت خودکار در مدل توسط نرم‌افزار SACS اعمال می‌گردد.

جدول ۱- مشخصات و شرایط محیطی لحاظ شده در طراحی سکوی جک‌آپ Super M2 در شرایط عملیاتی (F & G Company Reports, 2008)

ردیف	شرایط محیطی
۱	عمق آب
۲	نفوذ اسپادکن‌ها در خاک
۳	ارتفاع موج بیشینه
۴	پریود موج بیشینه
۵	سرعت باد
۶	سرعت جریان دریایی
۷	فاصله امین هوا (AIR GAP)
۸	وزن بدنه
۹	فاصله طولی پایه‌ها از یکدیگر
۱۰	فاصله عرضی پایه‌ها از یکدیگر

سکوی مدل‌سازی شده به صورت استاتیکی و قطعی در شرایط عملیاتی، تحت بارگذاری‌های محیطی به همراه بارگذاری‌های ثقلی (ناشی از وزن المان‌های سازه‌ای و تجهیزات آن)، ارزیابی سازه‌ای شد. بارگذاری محیطی حاصل از امواج منظم، جریان دریایی و باد بوده، که در راستاهای مختلف با گام ۳۰ درجه به سکو اعمال گردیدند تا بحرانی‌ترین شرایط بارگذاری، استخراج گردد. به منظور محاسبه بارگذاری موج بر سکوی تحت بررسی، از معادله موريسن به شرح زیر (رابطه ۱) استفاده می‌گردد (American Petroleum Institute, 2000):

$$F = F_D + F_I = 0.5 C_d \rho A U |U| + C_m \rho V \frac{\delta U}{\delta t} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، F نیروی اعمالی از سوی موج در سازه دریایی، F_D نیروی پسا (درگ)، F_I نیروی لختی (اینرسی)، C_d ضریب نیروی پسا، ρ چگالی آب، A سطح تصویر شده المان در برابر جریان، U سرعت ذرات آب در اثر موج، C_m ضریب لختی، V حجم المان و $\delta U / \delta t$ شتاب ذرات آب در اثر موج هستند. سرعت و شتاب ذرات آب با بهره‌گیری از نظریه ایری محاسبه می‌شود. با توجه به شکل استوانه‌ای اجزای سازه‌ای تشکیل دهنده پایه، ضرایب C_d و C_m بر اساس جدول ۲ تعیین می‌گردد (Patel, 1990).

جدول ۲- ضرایب C_d و C_m بر اساس Re و KC برای المان‌های استوانه‌ای

KC	C_D	C_m
$KC > 25$	$\begin{cases} C_D = 0.62 & R_e > 1.5 \times 10^5 \\ C_D = 0.8 & R_e < 1.5 \times 10^5 \end{cases}$	1.8
$5 < KC < 25$	$C_D = 0.62$	1.8
$KC < 5$	$C_D = 0.9$	2.0

KC عدد کلوگان‌کارپتر و Re عدد رینولدز هستند. با توجه به

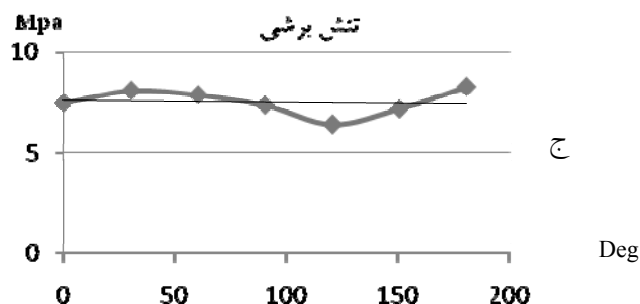
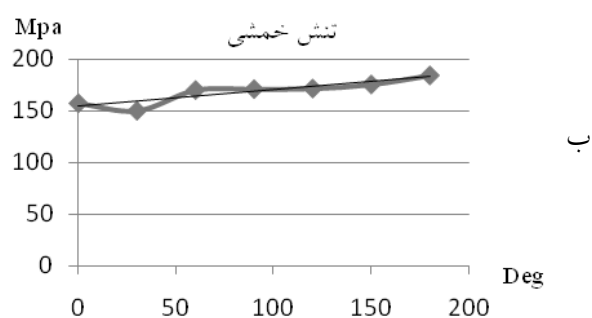
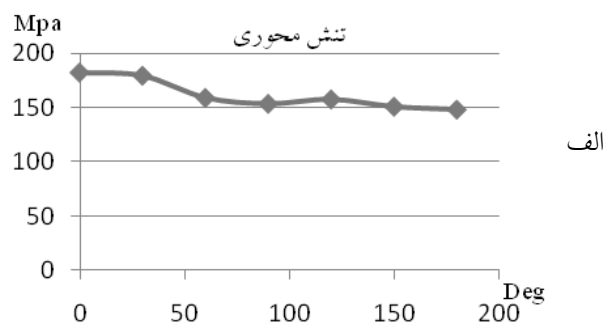
۳. تحلیل عمومی سازه سکوی جک‌آپ

بارگذاری سبب تغییرات زیادی در تنش‌های محاسباتی نشده است. البته بدیهی است، محل رویداد تنش‌های بیشینه با تغییر راستای بارگذاری، از المانی به المان دیگر تغییر می‌کند.

با توجه به شکل ۳، مقادیر تنش‌های برشی بیشینه در برابر تنش‌های خمشی و محوری بسیار کوچک هستند. بنابراین، مقادیر بزرگی تنش نرمال، معیار انتخاب بحرانی‌ترین اتصال، جهت تحلیل در نرم‌افزار ANSYS قرار خواهد گرفت. بزرگی تنش نرمال، در هر مقطع از المان‌های تشکیل دهنده پایه سکوی جک‌آپ، برابر با مجموع تنش محوری^۱ و تنش برآیند خمشی^۲ در آن مقطع است.

با توجه به اینکه مشخصات اجزای سازه‌ای پایه سکوی جک‌آپ از طبقه هفتم به بالا یکسان بوده و با اجزای سازه‌ای قرار گرفته در زیر آن متفاوت است، به منظور سهولت انتخاب بحرانی‌ترین گره اتصال از طبقه هفتم به بالای پایه انجام شد. به منظور انتخاب بحرانی‌ترین گره اتصال، در ابتدا المان‌هایی که در هر یک از راستاهای بارگذاری دارای تنش محوری بیشینه بودند تعیین شده و مقادیر کلیه تنش‌های دیگر آنها، یعنی تنش‌های خمشی و برشی نیز در آن المان‌های خاص تعیین گردید و در نهایت تنش نرمال برآیند در آن المان‌های خاص، محاسبه شد. نتایج مذکور در جدول ۳ ارائه شده است. به طور مشابه در جدول ۴ مقادیر تنش‌های خمشی، برشی، محوری و برآیند تنش‌های نرمال برای المان‌هایی که در هر یک از راستاهای بارگذاری دارای تنش خمشی بیشینه ناشی از My (گشتاور خمشی در راستای محور مختصات محلی y هر المان)، در بین المان‌های سازه‌ای پایه سکو بودند، ارائه شده است. همچنین در جدول ۵ نیز مقادیر تنش‌های خمشی، برشی، محوری و برآیند تنش‌های نرمال برای المان‌هایی که به طور مجزا در هر یک از راستاهای بارگذاری دارای تنش خمشی بیشینه ناشی از Mz در بین المان‌های سازه‌ای پایه بودند، ارائه شده است. جداول ۳ الی ۵ بیانگر کلیه المان‌های سازه‌ای است که در آنها تنش محوری یا تنش‌های خمشی ناشی از گشتاورهای My و Mz دارای مقادیر بیشینه در بین سایر المان‌های پایه هستند. در نتیجه بحرانی‌ترین المان سازه‌ای در پایه‌ها، المانی از مجموعه المان‌های سازه‌ای مذکور در جداول ۳ الی ۵ بوده، که بیشترین تنش نرمال برآیند بیشینه را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین المان دارای تنش نرمال بیشینه ۳۱۲/۳۷ مگاپاسکال، بحرانی‌ترین المان بوده که این حالت بحرانی در زاویه بارگذاری ۳۰ درجه رخ می‌دهد.

مدل کامل سکوی جک‌آپ با شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری مشروحه در بخش پیشین، در نرم‌افزار SACS تحلیل سازه‌ای متعین استاتیکی شد. بر اساس تحلیل‌های صورت پذیرفته، به ترتیب مقادیر تنش‌های محوری بیشینه، خمشی بیشینه و برشی بیشینه در اجزای سازه‌ای نظیر برای راستاهای مختلف بارگذاری برای تمامی اجزای سازه‌ای پایه‌ها در اشکال ۳- الف الی ۳- ج نشان داده شده است.



شکل ۳- الف) نمودار مقادیر تنش‌های بیشینه محوری در بحرانی‌ترین المان در راستاهای مختلف بارگذاری، ب) نمودار مقادیر تنش‌های بیشینه خمشی در بحرانی‌ترین المان در راستاهای مختلف بارگذاری، ج) نمودار مقادیر تنش‌های بیشینه برشی در بحرانی‌ترین المان در راستاهای مختلف بارگذاری

همان‌طور که از این نمودارها مشخص است، تغییر راستای

¹ Axial Stress

² Resultant Bending Stress

جدول ۳- مقادیر تنش‌های محوری، برشی، خمشی و برآیند تنش‌های نرمال در المان‌هایی که بیشترین تنش محوری را در هر یک از راستاهای بارگذاری نسبت به سایر المان‌های سازه‌ای پایه دارند.

راستای بارگذاری (Deg)	تنش محوری (Mpa)	تنش خمشی Z (Mpa)	تنش خمشی Y (Mpa)	تنش برشی Z (Mpa)	تنش برشی Y (Mpa)	برآیند تنش‌های خمشی (Mpa)	برآیند تنش‌های برشی (Mpa)	برآیند تنش‌های نرمال (Mpa)
۰	۱۷۵/۹۵	۲/۲۱	-۰/۳۶	-۰/۳۳	-۰/۵	۲/۲۴	-۰/۳۴	۱۷۸/۱۹
۳۰	۱۷۴/۴۸	۲/۰۵	-۰/۴۲	-۰/۳۳	-۰/۴	۲/۰۹	-۰/۳۳	۱۷۶/۵۷
۶۰	۱۵۸/۶۲	۱/۱۲	۱/۳۶	-۰/۲۱	-۰/۴	۱/۷۶	-۰/۲۱	۱۶۰/۳۸
۹۰	۱۵۲/۳۳	-۰/۵۸	۱/۷۲	-۰/۱۰	-۰/۵	۱/۸۲	-۰/۱۱	۱۵۴/۱۵
۱۲۰	۱۵۲/۰۲	-۰/۷۰	۱/۴۸	-۰/۰۳	-۰/۴	۱/۶۴	-۰/۰۵	۱۵۴/۶۶
۱۵۰	۱۴۷/۶۷	۱/۶۸	-۰/۷۴	-۰/۰۵	-۰/۵	۱/۸۴	-۰/۰۷	۱۴۹/۵۱
۱۸۰	۱۴۵/۴۰	۲/۲۹	-۰/۳۹	-۰/۱۸	-۰/۰۶	۲/۳۲	-۰/۱۹	۱۴۷/۷۲

جدول ۴- مقادیر تنش‌های محوری، برشی، خمشی و برآیند تنش‌های نرمال در المان‌هایی که تنش خمشی ناشی از گشتاور خمشی My را در هر یک از راستاهای بارگذاری نسبت به سایر المان‌های سازه‌ای پایه دارند.

راستای بارگذاری (Deg)	تنش محوری (Mpa)	تنش خمشی Z (Mpa)	تنش خمشی Y (Mpa)	تنش برشی Z (Mpa)	تنش برشی Y (Mpa)	برآیند تنش‌های خمشی (Mpa)	برآیند تنش‌های برشی (Mpa)	برآیند تنش‌های نرمال (Mpa)
۰	۱۵۰/۱۱	۸۶/۴۷	۱۲۵/۰۷	-۰/۴۵	۶/۸۴	۱۵۲/۰۵	۶/۸۵	۳۰۲/۱۶
۳۰	۱۴۸/۴۱	۹۰/۰۷	۱۳۷/۰۱	-۰/۱۰	۷/۳۶	۱۶۳/۹۶	۷/۳۶	۳۱۲/۳۷
۶۰	۱۴۷/۷۴	۸۴/۱۳	۱۳۶/۳۴	-۰/۲۲	۷/۲۰	۱۶۰/۲۱	۷/۲۰	۳۰۷/۹۵
۹۰	۱۴۱/۳۷	۷۴/۶۸	۱۳۰/۵۳	-۰/۲۷	۶/۷۷	۱۵۰/۳۸	۶/۷۸	۲۹۱/۷۵
۱۲۰	۱۳۷/۳۷	۶۰/۱۱	۱۱۵/۰۳	-۰/۳۷	۵/۸۵	۱۲۹/۷۹	۵/۸۶	۲۵۷/۱۶
۱۵۰	۱۱۳/۶۶	۴۴/۸۰	۹۶/۷۵	-۰/۳۱	۴/۸۱	۱۰۶/۶۲	۴/۸۲	۲۲۰/۲۸
۱۸۰	۱۱۰/۵۵	۴۷/۳۳	۹۷/۵۱	-۰/۵۴	۴/۹۱	۱۰۸/۳۹	۴/۹۴	۲۱۸/۹۴

جدول ۵- مقادیر تنش‌های محوری، برشی، خمشی و برآیند تنش‌های نرمال در المان‌هایی که تنش خمشی ناشی از گشتاور خمشی MZ را در هر یک از راستاهای بارگذاری نسبت به سایر المان‌های سازه‌ای پایه دارند.

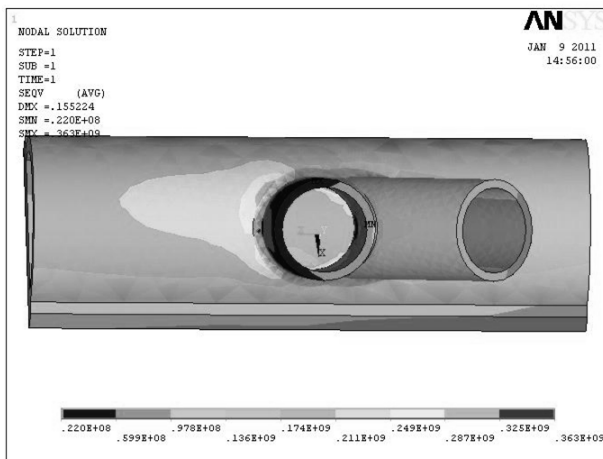
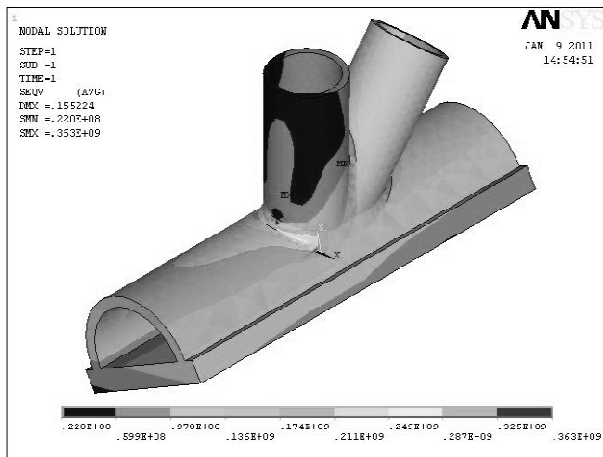
راستای بارگذاری (Deg)	تنش محوری (Mpa)	تنش خمشی Z (Mpa)	تنش خمشی Y (Mpa)	تنش برشی Z (Mpa)	تنش برشی Y (Mpa)	برآیند تنش‌های خمشی (Mpa)	برآیند تنش‌های برشی (Mpa)	برآیند تنش‌های نرمال (Mpa)
۰	۴۹/۲۰	۹۵/۶۴	-۰/۳۰	-۰/۰۸	۳/۷۵	۹۵/۶۴	۳/۷۵	۱۴۴/۸۴
۳۰	۴۹/۸۸	۹۶/۸۶	-۰/۲۲	-۰/۰۲	۳/۸۰	۹۶/۸۶	۳/۸۰	۱۴۶/۷۴
۶۰	۵۲/۲۷	۱۰۲/۰۲	-۰/۲۳	-۰/۱۵	۴/۰۱	۱۰۲/۰۲	۴/۰۱	۱۵۵/۲۹
۹۰	۱۲۱/۹۴	۱۱۰/۷۳	۵/۹۲	-۰/۳۱	۵/۰۱	۱۱۰/۸۹	۵/۰۲	۳۲۳/۸۳
۱۲۰	۱۲۹/۶۴	۱۲۷/۵۲	۸/۸۴	-۰/۲۰	۵/۷۵	۱۲۷/۸۳	۵/۷۵	۲۵۷/۴۷
۱۵۰	۱۴۲/۵۵	۱۴۶/۷۴	۲/۲۹	-۰/۲۲	۶/۶۰	۱۴۶/۷۶	۶/۶۰	۲۸۹/۳۱
۱۸۰	۱۴۸/۸۴	۱۵۶/۵۹	۳/۳۴	-۰/۱۹	۷/۰۳	۱۵۶/۶۳	۷/۰۳	۳۰۵/۴۷

۴. تحلیل بحرانی‌ترین اتصال در پایه

Solid 20 node 186 استفاده شد. توابع شکلی در این المان از درجه ۴ بوده و هر یک از نودهای آن ۳ درجه آزادی دارند. این المان مجموعاً از ۲۰ گره تشکیل شده و با به‌کارگیری آن به‌راحتی می‌توان با حداقل تعداد المان‌ها حجم پیچیده جوش را با دقت محاسباتی بالا، به‌صورت منظم و نامنظم شبکه‌بندی نمود. در جدول ۶، جابه‌جایی‌های گره‌های مجاور اتصال بحرانی و در جدول ۷ نیروها و گشتاورهای داخلی اعضای تشکیل‌دهنده اتصال بحرانی ارائه شده است. اسامی گره‌های مجاور اتصال بحرانی در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۵، توزیع تنش فونمیسز در اتصال تحلیل شده در حالت اول نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ رویت می‌گردد، تنش در منطقه‌ی جوش نسبت به سایر نقاط اتصال بزرگتر بوده و بیشینه مقدار تنش، در محل پاشنه جوش رخ داده که

براساس نتایج ارائه شده در جداول ۳ الی ۵، بحرانی‌ترین اتصال بحرانی پایه که از طبقه هفتم به بالا تعیین شده بود، در نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و جابه‌جایی‌های گره‌های مجاور آن اتصال به‌عنوان شرایط مرزی به مدل اعمال گردید. در چنین شرایطی جابه‌جایی‌های اعمالی، جایگزین بارگذاری بر اتصال تحت بررسی هستند (تحلیل اول). همچنین اتصال بحرانی مذکور، تحت شرایط تکیه‌گاهی ساده‌سازی شده (شکل ۴) نیز مورد ارزیابی قرار گرفت (تحلیل دوم). در چنین شرایطی، نیروها و گشتاورهای داخلی اعضای تشکیل‌دهنده اتصال به‌عنوان بارگذاری خارجی به اجزای سازه‌ای نظیر اعمال گردیدند (شکل ۴). لازم به ذکر است، برای تحلیل در نرم‌افزار ANSYS از المان



شکل ۵ - تنش فونمیسز در اتصال بحرانی در تحلیل اول

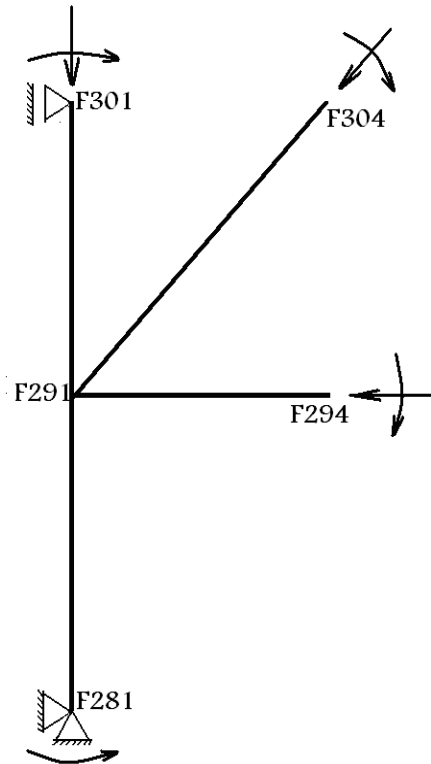
در شکل ۶، توزیع تنش فونمیسز در اتصال تحلیل شده در حالت دوم نشان داده شده است. بیشینه مقدار تنش فونمیسز در این حالت در حدود ۳۲۳ مگاپاسکال بوده که به میزان ۱۱ درصد با مقدار نظیر حاصل از تحلیل اول اختلاف داشته و همچنین توزیع تنش در آن با حالت اول متفاوت بوده به گونه‌ای که در این حالت، دیگر تنش بیشینه در محل جوش اتفاق نمی‌افتد. با توجه به این مسئله که تمرکز تنش در اتصالات در شرایط واقعی در محل جوش رخ می‌دهد، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که نتایج حاصل از تحلیل اول دقیقتر بوده و با اطمینان بیشتری می‌توان از آن بهره گرفت.

۵. معتبرسازی نتایج

۵-۱. معتبرسازی نتایج تحلیل استاتیکی کل سکو

در تحقیق صورت پذیرفته توسط نلسون و همکاران (۲۰۰۱)،

برابر با ۳۶۳ مگاپاسکال است. با توجه به جنس مصالح جوش و فرایند جوشکاری اتصالات در پایه سکوی جک‌آب، حد استحکام نهایی اجزای سازه‌ای و اتصالات آنها تا میزان تنش ۶۹۰ مگاپاسکال بوده و در نتیجه اتصالات سکوی جک‌آب تحت بررسی در بحرانی‌ترین شرایط بارگذاری از استحکام مناسبی برخوردار هستند.



شکل ۴ - نام‌گذاری گره‌های مجاور اتصال بحرانی F291

جدول ۶ - جابجایی‌های گره‌های مجاور گره بحرانی F291 به کار رفته در شرایط مرزی

مدل اتصال بحرانی در نرم افزار ANSYS

نام گره	جابجایی در راستای X (Cm)	جابجایی در راستای Y (Cm)	جابجایی در راستای Z (Cm)	جابجایی حول محور X (Rad)	جابجایی حول محور Y (Rad)	جابجایی حول محور Z (Rad)
F281	-۴/۲۸۸	-۱۲/۶۲۱	۶/۱۲۹	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۲
F294	-۳/۶۵۶	-۱۳/۳۷	۶/۵۰۴	-۰/۰۰۱	.	-۰/۰۰۲
F304	-۳/۶۳۶	-۱۳/۵۷۸	۶/۷۹۴	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۲
F301	-۴/۴۱۶	-۱۳/۰۷۵	۶/۵۲۶	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۲
F291	-۴/۳۶۱	-۱۲/۹۱۳	۶/۴۰۳	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۲

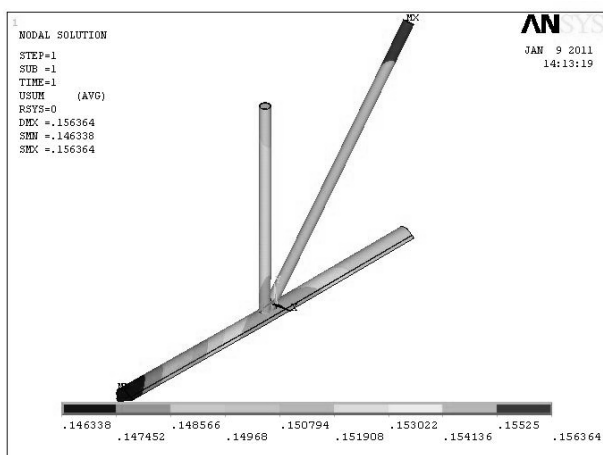
جدول ۷ - نیروها و گشتاورهای داخلی اعضای تشکیل دهنده اتصال بحرانی

نام عضو	نیروی محوری (کیلو نیوتن)	گشتاور خمشی (کیلو نیوتن - متر)
F291-F304	FZ= ۱۳۸/۳۴ FY= -۱۷۵/۹۲	MZ= -۵/۸۲ MY= -۴/۵۷ MX= -۲۸/۶
F291-F294	FY= -۸۴	MZ= -۰/۱ MX= -۲۶/۸ MY= ۶۹۷/۹
F291-F301	FZ= ۶۱۲/۸۱	MX= ۳۹۷/۲ MY= -۷۶۸/۲
F281-F291	FZ= ۱۳۵۹/۱۱	MX= -۵۰/۱

شده در این تحقیق و تحقیق نلسون با شرایط تکیه‌گاهی گیرداری در محل پایه‌ها بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و هر دوی این نتایج مطابقت مناسبی با اندازه‌گیری میدانی انجام شده دارند.

۲-۵. معتبرسازی نتایج تحلیل اتصالات

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۶، میزان جابجایی در محل اتصال اصلی برابر با $15/06^1$ سانتی‌متر توسط نرم‌افزار SACS محاسبه شده است. از طرفی در شکل ۷، کانتور توزیع جابجایی کل در اتصال، محاسبه شده در نرم‌افزار ANSYS، نشان داده شده است. با توجه به این شکل و نتایج محاسبه شده در نرم افزار ANSYS، میزان جابجایی کل در اتصال اصلی برابر با $15/4136$ سانتی‌متر است، که اختلاف ناچیزی (در حدود $2/3$ درصد) با مقدار محاسبه شده در نرم‌افزار SACS دارد.



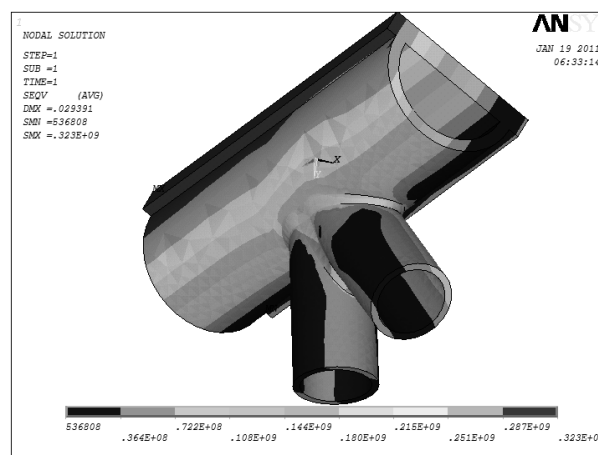
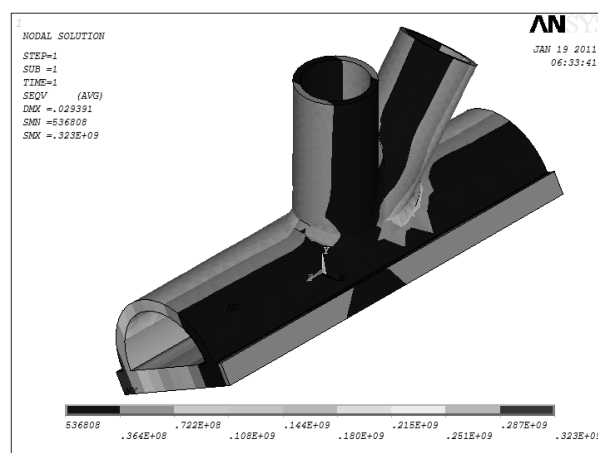
شکل ۷- کانتور جابجایی کل در اتصال بحرانی محاسبه شده در نرم‌افزار ANSYS

۶. بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج تحلیل شده در این تحقیق، موارد زیر در مورد سکوه‌های جک‌آپ و اتصالات آنها قابل استنتاج است:

- ۱- با توجه به شکل خرابی پایه‌های سکوی جک‌آپ تغییر راستای بارگذاری موج، باد و جریان دریایی تغییرات بزرگ در تنش‌های اعضای پایه به‌وجود نمی‌آورد و تنها محل رویداد تنش بیشینه تغییر می‌کند.

سکوی جک‌آپ Santa Fe Magellan که مشخصات نزدیک به سکوی Super M2 دارد، مورد ارزیابی قرار گرفت. آنها مقدار جابجایی عرشه سکوی جک‌آپ مذکور را تحت دو شرایط مجزای بارگذاری واقعی (حالت a و b) اندازه‌گیری نمودند. همچنین، آنها تحت همان شرایط بارگذاری واقعی که حرکات سکو تحت آن اندازه‌گیری شده بود، سکوی مذکور را مدل‌سازی کرده و آن را با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل عددی نمودند. نتایج حاصل از محاسبات و اندازه‌گیری‌های نلسون و همچنین ارزیابی رفتار سکوی Super M2 تحت بارگذاری مشابه با تحقیق نلسون در جدول ۸ مقایسه شده است (Nelson et al., 2001).



شکل ۶- تنش فون میسر در اتصال بحرانی در تحلیل دوم

نسبت اختلاف میان این دو جابجایی (درصد خطا)، به دلیل وجود تفاوت‌هایی در دو سکو محاسبه نشده و تنها به مقایسه ضمنی نتایج محاسبه شده توسط دو تحقیق، بسنده شده است. با توجه به جدول ۸ مشخص می‌گردد که جابجایی‌های محاسبه

¹ $15.06 = \sqrt{4.361^2 + 12.913^2 + 6.403^2}$

جدول ۸ - مقایسه نتایج محاسبه شده توسط نلسون و محاسبه شده در این تحقیق و همچنین مقادیر اندازه گیری در سکوی Magellan

	حالت بارگذاری (a)				حالت بارگذاری (b)			
	جابجایی Surge حاصل از تحلیل	جابجایی Sway حاصل از تحلیل	جابجایی Surge اندازه گیری شده	جابجایی Sway اندازه گیری شده	جابجایی Surge حاصل از تحلیل	جابجایی Sway حاصل از تحلیل	جابجایی Surge اندازه گیری شده	جابجایی Sway اندازه گیری شده
سکوی Magellan (متر)	۰/۰۲۵	۰/۰۱۴	۰/۰۴۷	۰/۰۵۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۹	۰/۰۵۰	۰/۰۲۹
سکوی Super M2 (متر)	۰/۰۲۹	۰/۰۱۱	—	—	۰/۰۲۵	۰/۰۱۴	—	—

Practice 2a-Wsd (RP 2a-Wsd), Twenty-First Edition, December., 2000.

Cassidy, Mark Jason., 1999. Non-Linear Analysis of Jack-up Structures Subjected to Random Waves, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, New College, Oxford, Trinity Term.

Nelson, K.; Stonor, R.W.P.; Versavel, T., 2001. "Measurements of Seabed Fixity and Dynamic Behavior of The Santa Fe Magellan Jack-up", Marine Structures 14:451-483.

Pargeter, R.J., 1989. "The Weld Ability of Steels Used in Jack-Up Drilling Platforms", Marine Structures Journal, Vol. 2: 255-264.

Patel, Minoo. H., 1990. Dynamics of offshore structures, 1st Butterworth Publishing Co.

Super M2 Construction Sequence1 Report, F&G Company Reports., 2008.

Tirant, P.L and Perol, C., 1993. Stability and Operation of Jack ups, Edition technip.

Vegte, Van Der., 2004. "The Influence of Boundary Conditions on the Chord Load Effect For Chs Gap K-Joints", Connections in Steel Structures V-Amsterdam.

Williams, Martin S., Thompson, Richard S.G., Houlsby, Guy T.A., 1999. "Parametric Study of The Non-Linear Dynamic Behavior of an Offshore Jack-up Unit", Engineering Structure 21:383-394.

Woghiren, C.O and Brennan, F.P., 2009. "Weld Toe Stress Concentrations in Multi-Planar Stiffened Tubular KK Joints", International Journal of Fatigue 31:164-172.

۲- بر اساس بررسی های صورت گرفته در مورد تحقیقاتی که تاکنون در مورد اتصالات لوله ای (در سکوهای جکت و جک آپ) انجام شده است، مشخص شد که در تحقیقات مذکور عمدتاً اتصالات در آزمایشگاه مورد تحلیل های مختلف (همچون خستگی، استحکام نهایی و سایر موارد) قرار گرفته اند و در نهایت آن اتصالات در نرم افزار با اعمال شرایط تکیه گاهی آزمایشگاه (که همان شرایط تکیه گاهی ساده سازی شده است) مورد ارزیابی قرار گرفته اند. لازم به توضیح است در هیچ یک از تحقیقات بررسی شده، اتصالات سکوی جک آپ با شرایط واقعی تحلیل نشده اند. بنابراین در این تحقیق اتصالات سکوی جک آپ Super M2 تحت شرایط مرزی واقعی (که همان جابه جایی های محاسبه شده توسط SACS در اتصالات مجاور به عنوان شرایط مرزی در مدل ANSYS است) مورد تحلیل قرار گرفت. تحلیل اتصالات سکوی جک آپ تحت شرایط تکیه گاهی ساده (مانند شرایط تکیه گاهی مفصلی یا گیرداری در انتهای اعضای تشکیل دهنده اتصال) دارای خطای نسبتاً بالایی بوده که ناشی از ساده سازی های اعمالی در محل تکیه گاه هاست. بنابراین، یکی از روش های مناسب تحلیل اتصالات سکوی جک آپ، تحلیل عمومی کل سازه سکو و تعیین اتصال بحرانی و در نهایت اعمال جابجایی های واقعی محاسبه شده در گره های اطراف گره بحرانی، به عنوان شرایط مرزی به مدل اتصال (مانند آنچه در این تحقیق انجام شد)، است.

۳- بر اساس نتایج تحلیل شده در این تحقیق، سکوی جک آپ Super M2 که سابقاً در مناطق مختلفی در دنیا مورد بهره برداری قرار گرفته است، می تواند در منطقه خلیج فارس نیز مورد بهره برداری قرار گرفته و تحت شرایط بارگذاری این منطقه استحکام سازه ای مناسبی داشته و تنش های آن فاصله مناسبی از حد نهایی استحکام مصالح دارند.

منابع

American Petroleum Institute, API Recommended