



بررسی اثر انعطاف پذیری اتصال در ارزیابی خستگی در سکوه‌های ثابت فلزی دریایی

بهرروز عسگریان^۱، * پرویز کوزه‌گر^۲

چکیده

استفاده از سکوه‌های ثابت فلزی دریایی یکی از روش‌های متداول استخراج منابع هیدروکربنی از دریا می‌باشد. استفاده از چنین سکوهایی اگرچه در آب‌های عمیق مقرون به صرفه نمی‌باشد، اما کثرت حوزه‌های نفتی واقع در ناحیه با عمق کم و متوسط همانند خلیج فارس این سکوها را به یکی از متداولترین روش‌های استخراج تبدیل کرده است. وجود بارهای موج با تناوب بالا سبب شده تا این سکوها همواره در معرض خرابی ناشی از خستگی باشند. نقاط اتصال مهاربندها به اعضای قائم اصلی (Leg) به دلیل مشخصات هندسی و نوع جوشی اتصالات همواره از ضعیف‌ترین نقاط سازه در برابر پدیده خستگی می‌باشند. در این مقاله با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری موضعی اتصالات لوله‌ای که بخش عمده‌ای از آن ناشی از تغییر شکل‌های موضعی دیواره اعضای قائم اصلی می‌باشد، خرابی ناشی از خستگی در اتصالات در یکی از سکوه‌های موجود در ناحیه خلیج فارس (SPD10) به روش آنالیز طیفی در نرم افزار OPENSEES مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان داده با در نظر گرفتن انعطاف پذیری موضعی اتصالات، خرابی پیش بینی شده ناشی از خستگی در اتصالات کاهش یافته و نتایج حاصل از تحقیق در بهینه سازی زمان‌های بازرسی زیر آبی از اتصالات قابل کاربرد می‌باشد.

کلمات کلیدی

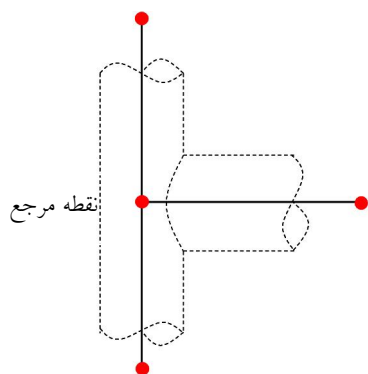
سکوه‌های دریایی، انعطاف پذیری موضعی اتصالات لوله‌ای، خستگی، آنالیز طیفی

۱. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، asgarian@kntu.ac.ir

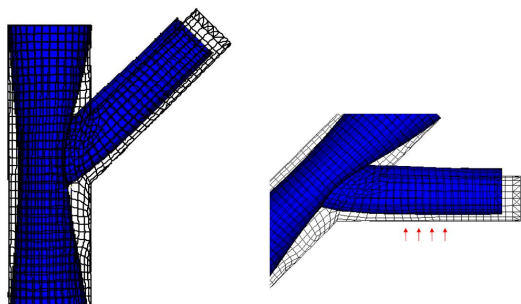
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، parviz_koozehgar@sina.kntu.ac.ir



می‌باشد. در شکل ۱ به صورت شماتیک نحوه مدلسازی یک اتصال T شکل با این روش نمایش داده شده است. در این روش مدلسازی در واقع از رفتار پوسته‌ای و تغییر شکل‌های موضعی دیواره اعضای لوله‌ای صرف‌نظر شده است. در شکل ۲ انعطاف پذیری موضعی اتصال و تغییر شکل‌های صلب در مهاربند که ناشی از رفتار پوسته‌ای در اعضا می‌باشد، به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱: اتصال T شکل با المان تیر



شکل ۲: انعطاف‌پذیری اتصال و حرکت صلب مهاربند

این روش در واقع قابلیت در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری موضعی اتصال را نداشته و تنها برای مقایسه با دو مدل دیگر و اثرات در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری اتصال مورد استفاده قرار گرفته است.

در روش دوم از روش توسعه یافته بوسیله بویتراگو [۲] برای مدلسازی انعطاف‌پذیری اتصال استفاده شده است. بویتراگو بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و عددی معادلاتی را به صورت بی بعد برای محاسبه نرمی اتصال برای انواع مختلف اتصال ارائه داده است. این روش و معادلات بسط داده شده یکی از روشهای پذیرفته شده در زمینه مدلسازی

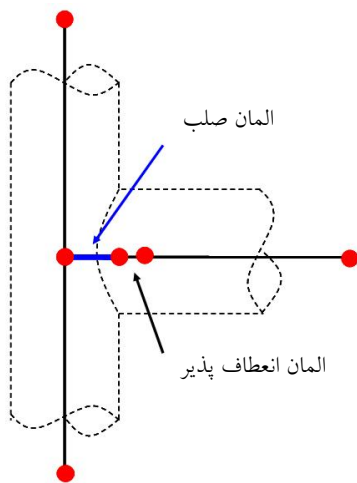
در دهه‌های اخیر بخش عمده ای از انرژی هیدروکربنی مورد نیاز بشر از دریا استخراج شده و یکی از متداولترین روشهای استخراج نیز استفاده از سکوه‌های ثابت فلزی دریایی (Jacket type offshore platform) می‌باشد. در چنین سکوهایی هندسه خاص اتصال و استفاده از جوش در اتصال اعضا سبب شده تا در اعضای اتصال تمرکز تنش رخ داده و در واقع تنشهای موجود در اعضا در خود اتصال بیشتر از تنشهای اسمی در نقاط دیگر عضو باشد. در چنین سکوهایی در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری موضعی اتصال (Local Joint Flexibility) که بیشتر متأثر از تغییر شکل‌های موضعی دیواره اعضای قائم اصلی می‌باشد، باعث تغییر در خواص دینامیکی و میزان تنش در اعضای سازه شده و در جهت رسیدن به یک تقریب واقع بینانه تر از عمر خستگی در سازه موثر می‌باشد.

اثر انعطاف‌پذیری اتصال در رفتار دینامیکی سازه اگرچه بوسیله محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است، اما اثر آن در ارزیابی عمر خستگی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. موسسه HSE [۱] در سال ۲۰۰۲ با انجام یک سری تحقیقات به بررسی اثر انعطاف‌پذیری اتصال با در نظر گرفتن المان واسط پرداخته و نتایج نشان دهنده اثر مثبت این عامل در ارزیابی عمر خستگی بوده است. در این مقاله نحوه مدلسازی انعطاف‌پذیری اتصال و اثر آن در برآورد عمر خستگی در سازه مورد بحث قرار گرفته است.

۲- انعطاف‌پذیری موضعی اتصال:

در این مقاله سه روش برای مدلسازی انعطاف‌پذیری اتصال به کار گرفته شده و با استفاده از مدل‌های مختلف عمر خستگی در اتصالات سکوی دریایی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

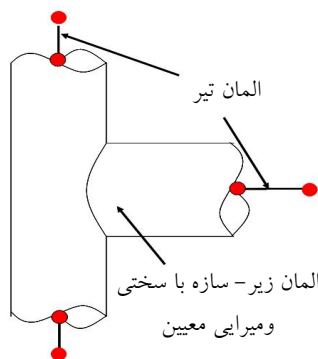
یکی از روش‌های متداول در مدلسازی اعضای سکوه‌های دریایی استفاده از المان‌های تیر می‌باشد. این روش مدلسازی با این فرض اساسی همراه است که اعضا در اتصال به صورت صلب به هم متصل بوده و تغییر شکل در همه اعضای اتصال برابر با تغییر شکل یک نقطه مرجع



شکل ۴: المان معادل در روش بوتراگو

در روش سوم از مفهوم زیرسازه (Sub-structuring) در مدلسازی انعطاف پذیری اتصال استفاده شده است. در این روش به جای استفاده از روشها و المانهای معادل، هندسه اتصال به صورت مستقیم وارد ماتریس سختی سازه شده و اثرات انعطاف پذیری به صورت مستقیم در نظر گرفته می-شود. در شکل ۵ به صورت شماتیک نحوه به کارگیری این روش نمایش داده شده است.

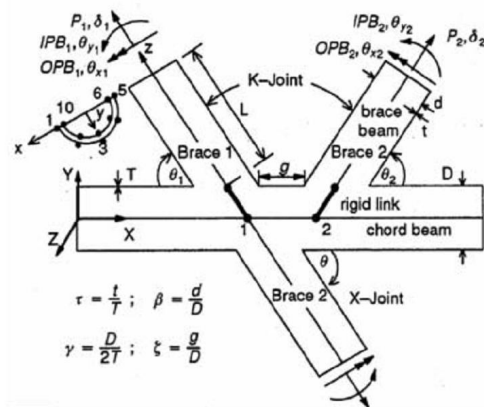
النجرى و همکاران [۴] بر اساس کارهای صورت گرفته قبلی در این زمینه و روابط بسط داده شده بوسیله فسلر [۵] و بیلینگتن [۶]، المانی جدید با خواص اتصال لوله ای و با در نظر گرفتن انعطاف پذیری موضعی اتصال را به کتابخانه المانهای نرم افزار OPENSEES [۷] افزودند.



شکل ۵: المان زیر سازه

در این مقاله برای یکی از سکوهایی موجود در ناحیه خلیج فارس (SPD10) با هر سه روش ذکر شده مدلسازی سازه-

اتصال بوده و در آیین نامه های متداول سازه دریایی همانند آیین نامه دانمارک [۳] ارائه شده است. پارامترهای بی بعد مورد استفاده در این روابط در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳: معرفی پارامترهای بی بعد در روابط انعطاف پذیری

روابط مورد استفاده در محاسبه نرمی اتصالات لوله ای در ادامه ارائه شده است [۳]:

$$f_{axial} = 5.69\tau^{-0.111} \cdot \exp(-2.251 \cdot \beta) \cdot \gamma^{1.898} \cdot \sin^{1.769} \theta \quad (1)$$

$$f_{inplane-bending} = 1.39\tau^{-0.238} \cdot \beta^{-2.245} \cdot \gamma^{1.898} \cdot \sin^{1.240} \theta \quad (2)$$

$$f_{out-plane-bending} = 55\tau^{-0.220} \cdot \exp(-4.076 \cdot \beta) \cdot \gamma^{2.417} \cdot \sin^{1.883} \theta \quad (3)$$

با مشخص شدن نرمی اتصال از روابط ۱ و ۲ و ۳، مقادیر سطح مقطع، ممان اینرسی و طول المان به گونه ای که بتواند انعطاف پذیری معادل روابط فوق داشته باشد، تعیین شده و با استفاده از این المان رفتار انعطاف پذیر در نظر گرفته خواهد شد.

در شکل ۴ به صورت شماتیک نحوه به کارگیری المان واسط نمایش داده شده است. در این روش مدلسازی برای بدست آوردن تنشها در دیواره عضو اصلی از یک المان صلب نیز استفاده شده است.

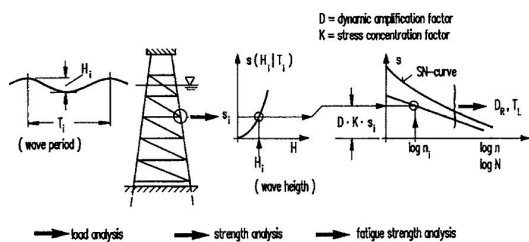
دست بودن مقدار تنش، حداکثر چرخه قابل تحمل در اتصال بدست آمده و مقدار خرابی از رابطه زیر قابل تخمین خواهد بود [۸]:

$$Damage_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

در رابطه فوق n_i تعداد چرخه بارگذاری اعمال شده و N_i حداکثر چرخه بارگذاری قابل تحمل در سازه می‌باشد. برای حالتی که سازه تحت چندین چرخه بارگذاری قرار می‌گیرد بر اساس کارهای ماینر [۹] میتوان خرابی های ناشی از هر حالت بارگذاری را با هم جمع کرد در واقع خرابی کلی در سازه به شکل زیر قابل محاسبه می‌باشد:

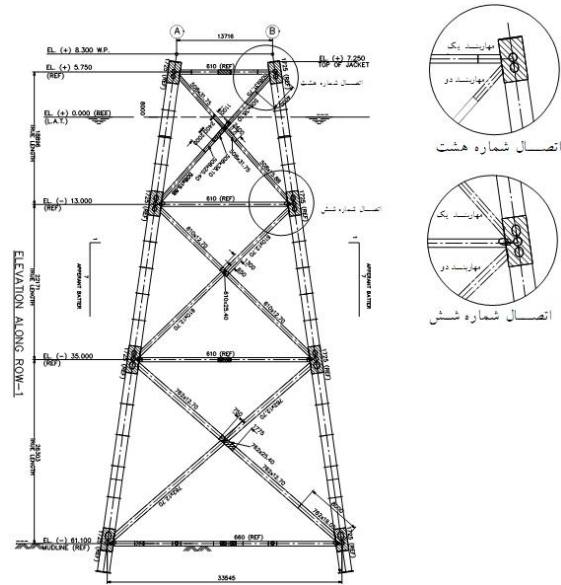
$$Damage_{total} = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

دو روش متداول برای بارگذاری ناشی از موج در سازه وجود دارد. در روش اول که از آن به عنوان آنالیز خستگی تعیینی یاد می‌شود (Deterministic fatigue analysis) با استفاده از یک سری موج معین (پریود و ارتفاع موج مشخص) آنالیز سازه ای به صورت استاتیکی معادل در سازه صورت گرفته و تنش‌های اسمی در اعضای اتصال بدست خواهد آمد. روند انجام این آنالیز به صورت شماتیک در شکل ۷ نشان داده شده است. این روش دارای دو نقطه ضعف اساسی می‌باشد، اولاً رفتار دینامیکی سازه به صورت کامل در نظر گرفته نشده و ثانیاً ماهیت تصادفی در مورد موج‌های وارده بر سازه در نظر گرفته نشده است [۱۰].



شکل ۷: مقایسه پریودهای اصلی سازه

ای در نرم افزار OPENSEES صورت گرفته و با انجام آنالیز خستگی، عمر خستگی در سکوه‌های ذکر شده مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. هندسه و ابعاد سکوی مورد بررسی در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶: سازه مدل شده

۳- آنالیز خستگی در سکوه‌های دریایی:

خستگی در مصالح فرآیند پیچیده‌ای بوده که تا کنون به صورت کامل شناخته نشده است. خستگی در اعضای سازه از ترکهای ریز (Micro Crack) موجود در اتصال شروع شده و با افزایش چرخه‌های بارگذاری و گسترش ناحیه پلاستیک در ترک عرض این ترکها بیشتر شده تا در نهایت در اتصال گسیختگی رخ دهد. برای ارزیابی خستگی در اتصالات سکوه‌های دریایی به صورت متداول از روش منحنی‌های شکست (S-N curve) استفاده می‌شود [۸]. در این منحنی به ازای هر بازه تنش معین حداکثر تعداد چرخه‌های قابل تحمل در هر اتصال تعیین شده است. در واقع برای هر حالت بارگذاری بعد از آنالیز سازه‌ای، تنش‌های اسمی در اعضای اتصال بدست آمده و با استفاده از ضرایب تمرکز تنش - که روابط مربوط به آنها در آنها در آیین نامه های معتبر ذکر شده است [۸] - اثرات تمرکز تنش ناشی از هندسه اتصال و تنش‌های شیاری حاصل از عملیات جوش‌کاری (Notch stress) در آنها لحاظ خواهد شد. در ادامه با استفاده از منحنی‌های شکست و با در

جدول (۱): جدول پراکنندگی موج

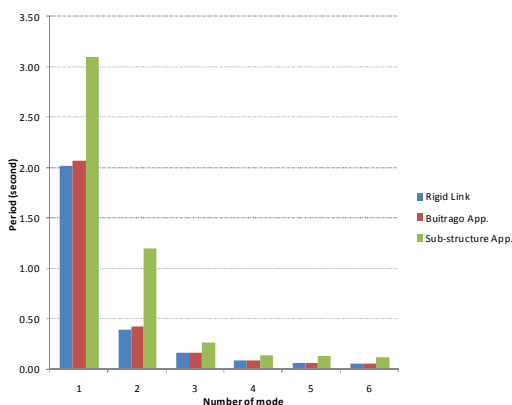
شماره حالت	ارتفاع مشخصه	پریود مشخصه
1	0.25	1.5
2	0.25	2.5
3	0.75	3.5
4	0.75	4.5
5	1.25	5.5
6	2.25	6.5

۴- نتایج آنالیز مودال:

زمانی که یک تحریک نیرویی دینامیکی همانند نیروی موج بر سازه اعمال می‌شود، سبب می‌شود سازه در مودهای ارتعاشی خود نوسان کرده و پاسخ نهایی سازه در واقع برآیندی از پاسخ سازه در مودهای مختلف ارتعاشی آن می‌باشد.

با توجه به پریود بارگذاری که دامنه وسیعی از پریودهای موج از پریود ۱ ثانیه تا ۱۰ ثانیه را پوشش می‌دهد لذا امکان رزونانس و تشدید در پاسخ‌های سازه وجود داشته در نتیجه پریودهای اصلی سازه و به خصوص پریود اول سازه حائز اهمیت می‌باشد.

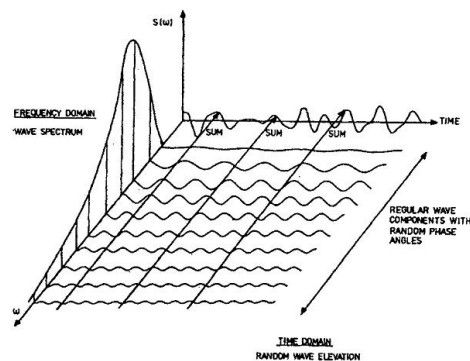
در این قسمت با انجام آنالیز مودال شش پریود اول سازه برای هر سه روش مدل‌سازی جداگانه محاسبه شده و در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹: مقایسه پریودهای اصلی سازه

با توجه به شکل ۹ این نکته قابل درک بوده که نحوه مدل‌سازی انعطاف پذیری موضعی اتصال به شدت محتوای

برای حذف نواقص موجود در آنالیز تعیینی روش آنالیز طیفی خستگی (Spectral based fatigue analysis) توسعه یافته است. در این روش استفاده از طیف موج جایگزین استفاده از یک سری موج معین شده و تنش‌های اسمی در سازه مستقیماً از آنالیز دینامیکی حاصل خواهد شد [۱۰]. در شکل ۸ تفاوت‌های دو روش ذکر شده قابل مشاهده می‌باشد. پروفیل واقعی سطح دریا در حقیقت نامنظم بوده و با استفاده از طیف فوریه این سطح نامنظم قابل تبدیل به تحریک‌های سینوسی منظم می‌باشد. در روش تعیینی تنها تعداد محدودی از این موجها مورد کاربرد قرار گرفته و بخشی از دامنه موجود حذف خواهد شد، این در حالی است که در آنالیز طیفی همه دامنه موج مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۸: مقایسه پریودهای اصلی سازه

طیف‌های موج وابسته به دو پارامتر پریود و ارتفاع مشخصه می‌باشد. در این مقاله برای در نظر گرفتن ماهیت تصادفی دریا از طیف موج پیرسون-موسکوویتز استفاده شده است [۱۰].

در این طیف موج با مشخص بودن پریود و ارتفاع مشخصه موج، پراکنندگی در توزیع موج وارد آنالیز خستگی خواهد شد. در جدول ۱ داده‌های موج به کار رفته در آنالیز ارائه شده است. برای هر یک از حالات موج عمر خستگی محاسبه و در ادامه ارائه شده است.

فرکانسی سازه را تحت تاثیر قرار داده و علاوه بر آن بدلیل تغییر در فرکانس اصلی سازه، فرکانس تشدید نیز در سازه نیز دچار تغییر خواهد شد و این نکته به سهم خود به شدت باعث تغییر در نیروهای موجود در اعضا خواهد شد.

۴- نتایج آنالیز خستگی:

با انجام آنالیز دینامیکی خطی در سازه، پاسخهای سازه برای حالت‌های مختلف بارگذاری موج و میزان خرابی خستگی ناشی از بار موج بدست آمده است. نتایج آنالیز برای سکویی با عمر مفید ۲۵ سال و ضریب اطمینان ۲ ارائه شده است.

برای آنکه نتایج آنالیز بیشتر قابل درک باشد و پاسخهای سازه برای موجهای مختلف جداگانه قابل بررسی باشد، نتایج آنالیز خستگی برای هر موج و هر اتصال به صورت حداکثر درصد رخداد قابل تحمل در عمر سازه در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. نتایج حاصل از آنالیز نشان می‌دهد که عمر خستگی تخمین زده شده، به شدت وابسته به نوع

مدلسازی اتصال می‌باشد.

به عنوان مثال در اتصال شماره ۸ و مهاربند دوم، تحت دومین بارگذاری موج نتایج نشان می‌دهد که این حالت موج با استفاده از روش اول حداکثر در ۱۰ درصد، با روش دوم حداکثر در ۱۳ درصد و با روش سوم حداکثر در ۴۷ درصد از عمر سازه قابل تحمل می‌باشد. در حالت‌های موج با پرپود بلند این نتایج بالعکس شده و عمر برآورد شده از روش سوم کمتر از دو روش اول می‌باشد و این به دلیل رفتار متفاوت سازه در پرپودهای بلند می‌باشد.

با توجه به اینکه موج‌های با پرپود کوتاه که بیشترین بخش از موجهای دریا را شامل می‌شود، در نظر گرفتن انعطاف پذیری اتصال به شدت در افزایش عمر خستگی تخمین زده شده موثر بوده و در پروسه‌های ارزیابی عمر خستگی در سکوه‌های موجود و تدوین زمان‌بندی برنامه‌های بازرسی استفاده در نظر گرفتن اثر انعطاف پذیری اتصال ضروری می‌باشد.

جدول ۲: نتایج آنالیز خستگی در اتصال شماره ۸

Wave data			BRACE 1			BRACE 2		
N	Ts	Hs	Rigid Link Approach	Buitrago Approach	Sub-Structure Approach	Rigid Link Approach	Buitrago Approach	Sub-Structure Approach
1	1.5	0.25	373.187	620.157	Infinite	27.559	84.178	597.046
2	2.5	0.25	43.845	65.445	1740.493	10.163	13.438	47.503
3	3.5	0.75	14.573	28.966	40.294	0.229	0.269	0.430
4	4.5	0.75	33.409	42.648	49.580	0.773	0.870	0.607
5	5.5	1.25	23.583	38.190	36.187	0.380	0.420	0.228
6	6.5	2.25	9.829	22.064	15.365	0.122	0.134	0.068

جدول ۳: نتایج آنالیز خستگی در اتصال شماره ۶

Wave data			BRACE 1			BRACE 2		
N	Ts	Hs	Rigid Link Approach	Buitrago Approach	Sub-Structure Approach	Rigid Link Approach	Buitrago Approach	Sub-Structure Approach
1	1.5	0.25	Infinite	Infinite	Infinite	4981.641	Infinite	Infinite
2	2.5	0.25	46.139	47.623	2870.292	25.120	28.348	76.449
3	3.5	0.75	1.641	1.713	2.553	0.527	0.570	1.101
4	4.5	0.75	5.171	5.240	3.490	1.385	1.471	1.313
5	5.5	1.25	2.470	2.494	1.306	0.538	0.575	0.440
6	6.5	2.25	0.764	0.776	0.384	0.137	0.148	0.117



- offshore structures”, Proc. Institution of Civil Engs, 1986, Part 2.
6. Billington CJ, Lalani M, Tebbet I, "Background to new formulae for the ultimate limit state of tubular joints", Paper No. OTC4189, Offshore Technology Conference, 1982.
 7. Mazzoni S, McKenna F, Scott M, Fenves G, "OpenSees command language manual", 2006.
 8. American Petroleum Institute, "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms", RP2A-WSD; 2005.
 9. Miner.M.A, "Cumulative Damage in Fatigue", Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 12(3), pp.159-164, 1945.
 10. ABS, "Fatigue Assessment of Offshore Structures", 2010.
 1. HSE, "The effects of local joint flexibility on the reliability of fatigue life estimates and inspection planning", Offshore Technology Report 2001/056, HSE Books, Sudbury, ISBN 0 7176 2288 6, 2002.
 2. Buitrago.J, "Local joint flexibility of tubular joints", Offshore Technology Conference, ASME, Volume 1, pp, 405-416, 1993.
 3. DNV-OS-J101, "Design of Offshore Wind Turbine Structures", Det Norske Veritas Offshore Standard, June 2004.
 4. Alanjari P, Asgarian B, Kia M, "Nonlinear joint flexibility element for the modeling of jacket-type offshore platforms", Applied Ocean Research, in-press, 2011.
 5. Fessler H, Mockford PB, Webster JJ, "Parametric equations for the flexibility matrix of single brace tubular joint in