

# 四種離岸風機桁架式支撐結構之疲勞壽命評估

簡志宇\*<sup>1</sup>

黃心豪\*

吳凱洋\*\*

林宗岳\*\*

范秉天\*\*

\*國立台灣大學 工程科學及海洋工程學系

\*\*財團法人中國驗船中心 研究處研發組

關鍵詞：離岸風力機，桁架式支撐結構，安全性分析，疲勞分析

## 摘要

在前 25 名的風場中就有 16 個座落在台灣，因此台灣在發展離岸風力發電上具有相當大的潛力。而預計 2030 年將有 800 座離岸風機建造在台灣海峽，但目前台灣的離岸風電領域仍在處於早期階段。本研究將針對 4 種適用在台灣海峽水深的桁架式支撐結構，進行安全性及疲勞壽命分析。台灣一年大約會遭遇 4 個颱風，將對支撐結構造成破壞而成為一個嚴重的問題。針對台灣特有的颱風狀況，將對這 4 種支撐結構進行模擬，檢視結構是否能在極限狀況下存活。而因為遭受到較大的風負載，預期應力範圍會比處在其他環境下更大，造成 20 年運轉年限內疲勞壽命的縮短。

本研究建立了包含基樁的兩種桁架式結構與兩種三角式支撐結構的有限元素模型，支撐結構依照台灣海峽水深設計高度 40 米。在分析上採用時域性模擬取代頻率域模擬以得到更精準的結果。進行有限元素分析以取得應力的時域性訊號，採用雨流計數法即可得到此訊號的應力範圍與循環次數。應力集中係數與疲勞曲線參考 DNV 規範所得，並且使用 T 疲勞曲線以考量焊接效應。因此藉由 Palmgren-Miner 的累積破壞率理論，可以得到支撐結構的疲勞壽命。

## Fatigue life evaluation of four offshore wind turbine jacket substructures

Chi-Yu Chien\*<sup>1</sup> Hsin-Haou Huang\*

Yann Quéméner\*\* Tsung-Yueh Lin\*\* Bryan Nelson\*\*

\* Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

\*\* R/D Section, Research Department, CR Classification Society, Taiwan

*Keywords: Offshore Wind Turbine, Jacket Substructures, Safety Analysis, Fatigue Life*

## ABSTRACT

There were 16 wind farms in Taiwan within the top 25, so there was a great potential for offshore wind power. Eight hundred offshore wind turbines were expected to be constructed in Taiwan Strait in 2030, but offshore wind energy in Taiwan were in early development. In this research, we discussed the safety and fatigue analysis for four kinds of jacket substructures for offshore wind turbines which could be constructed in Taiwan Strait. There were about four typhoons in Taiwan every year, which may lead to much damage to the substructures, and would become a severe problem. Because of the special circumstances in Taiwan, the typhoon condition was analyzed for the four substructures to see whether they could survive when exposed to extreme load. Stress range was expected larger than other places because of the gale, and may cause a reduction of fatigue life in the 20 years of operation.

Two jacket and two tripod substructures with foundations were created in the finite element analysis software, the models height were 40 meters which depend on the water depth of Taiwan Strait. Time-domain analyses were conducted rather than frequency-domain for the more accurate results. Stress-time data were analyzed by finite element analysis, so we could get stress range and stress cycles by Rainflow-Counting Algorithm. Stress concentration factor and S-N curve were obtained by DNV standards, T-curve was used in the paper, so the welding effect was considered. We could get cumulative Damage by Palmgren-Miner's rule and calculate fatigue life for the substructures.

<sup>1</sup>\*黃心豪(hsinhaouhuang@ntu.edu.tw)

## 1. 前言

近幾年台灣積極發展乾淨能源以尋求取代核能與高污染性的火力發電，而風力發電在綠色能源領域中占有相當大的重要性，配合國家型能源計畫(Nation Energy Program)，在 2017 年將首先在彰化沿海完成示範風機，預計在 2030 年能完成 400 架路上風機與 800 架離岸風機的建置，離岸風機的總產能將達到 4000MW。

本研究以台灣海峽離岸風機的建置作為研究主題，建立在台灣海峽西岸的桁架式支撐結構尺寸(JX)，在相同高度與相近重量的假設下，另外建置了 3 種離岸風機結構，分別為參考 Norwegian University of Science and Technology 文獻[1]進行改良的 K-Braces 傳統桁架式支撐結構(JK)、參照 Offshore support structure and associated method of installing[2]美國專利三腳扭曲桁架式支撐結構(TJ30)以及文獻中的三腳新型桁架式結構(MJ30)[3]。在設計階段選定停機平均風速為 50m/s 風機組進行極限狀況模擬，並參照 IEC-61400-3 Standard[4]中規定 1.4 陣風因子，針對四種結構在台灣海峽 70m/s 颱風狀況最大陣風的極限狀況下，進行短時域極限狀況模擬以比較結構強度。針對表現較佳的結構型式，依照 DNV-GL[5]探討台灣特有颱風狀況對於疲勞破壞率的影響。以期望未來在台灣西岸建置離岸風機時，能找出較佳的結構型式並且維持 20 到 25 年營運內的安全性。

## 2. 研究方法

### 2.1 研究流程

分析流程如圖 1，針對 4 種 3.6MW 支撐結構進行建模並且進行極限狀況模擬以檢視結構安全性，以靜態模擬以進行結構快速修改，在以動態模擬考慮支撐結構的動態效應，若結構最大應力未大於降伏強度，則能進行一般狀況模擬，並進行破壞率的計算。

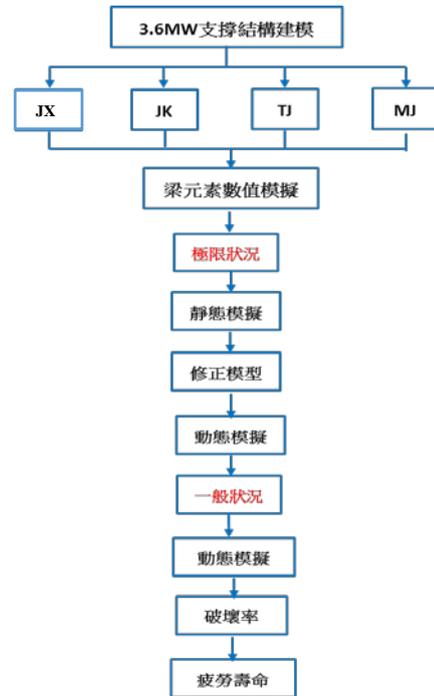


圖 1 分析流程

### 2.2 模型建立

本研究根據 3.6MW 四層桁架式支撐結構尺寸，在 Abaqus 中建立梁元素有限元素模型(如圖 1)，包含頂端風機塔(紅色) 68 公尺、支撐結構(藍色) 39 公尺與基樁(白色) 79 公尺，並簡化風機組模型，風負載以一點集中力方式施加於風機塔頂端。總共建置 4 種不同支撐結構模型以比較結構強度，並且考量接點位置的應力集中係數，以公式法得到應力集中係數，利用接點應力計算破壞率。



圖 2 JX 離岸風機有限元素模型

設計支撐結構高度 39.22 公尺，重量 300 公噸在相同高度與相近重量的假設下，建立 JK、TJ30 與 MJ30 的結構(如圖 2)，在設計階段中，三種結構重量調整在 10% 以內。

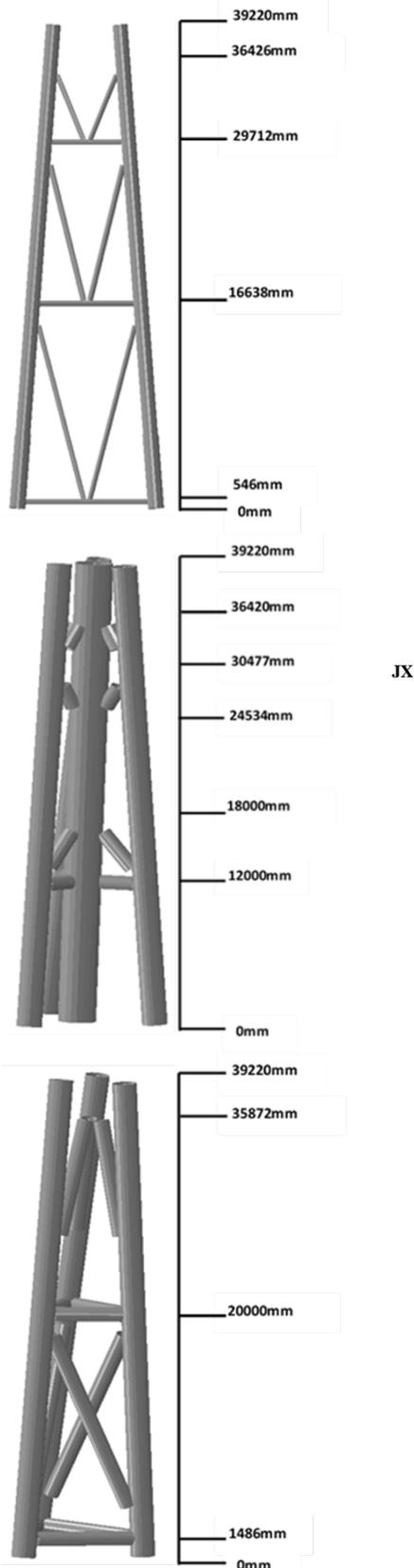


圖 3 JK、TJ30 與 MJ30 支撐結構模型

4 種結構重量比較如圖 3，單位高度的重量約為 8 (tone/m) 且相近，接點數量比較如圖 4，可以看出四腳式結構(JX、JK)的接點數目比三腳式支撐結構(TJ30、MJ30) 高出許多。一般離岸風機預計運行年限為 20 到

25 年，在期間結構接點將承受高達 $10^9$ 次循環負載[6]，並且因為焊接導致接點強度下降，常成為離岸風機疲勞發生處，故減少焊接點的數量能夠減少結構發生疲勞破壞的機會，並減少焊接所需工程工時與花費。

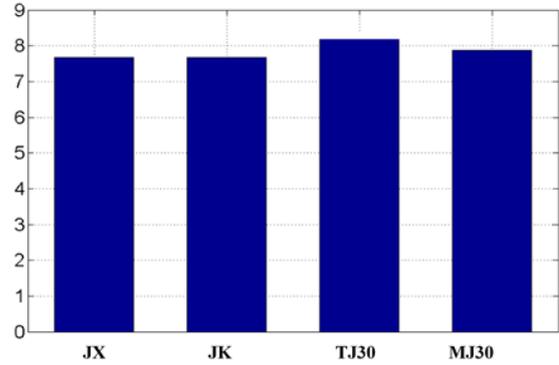


圖 4 支撐結構單位高度的重量比較

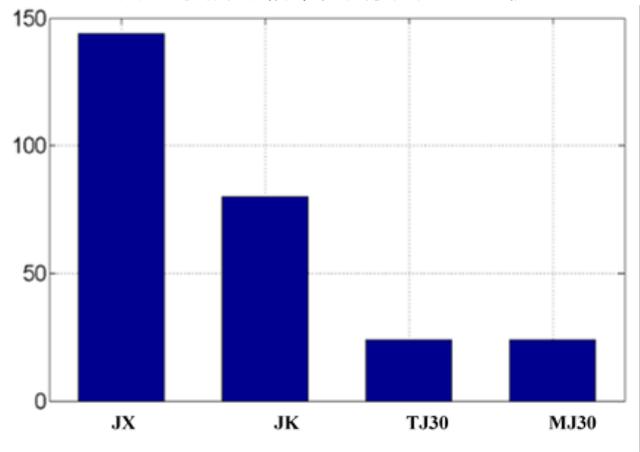


圖 5 支撐結構接點數量比較

### 2.3 負載狀況

在負載施加部分考慮 3 種負載（塔架重量負載、風負載以及水負載），而在風負載分成 2 種：風機組風負載(Wind turbine load)等效成一點集中力施加在風機塔柱頂端，風機塔柱負載(Wind tower load)則以線負荷施加，水負載施加在支撐結構，如圖 5 所示。為了得到最極限狀況，以支撐結構對角方向施加，使得支撐結構單腳架在後。

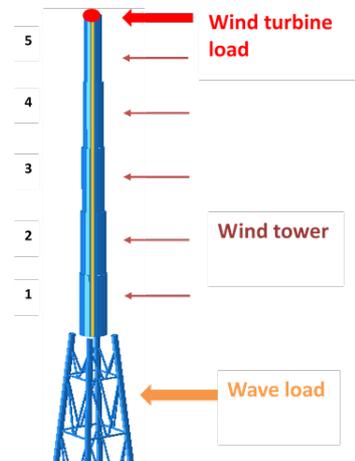


圖 6 負載施加示意圖

為分析支撐結構安全性，在颱風狀況考量風負載與水負載，檢驗結構應力表現是否高於材料之降伏強度。選定停機平均風速為 50m/s 的風機組作為極限狀況的模擬，在 IEC-61400-3 Standard[4]中規定陣風因子 1.4，模擬風機組受到最大陣風風速為 70m/s 之狀況，進行 38 秒短時域模擬，期間風速維持 70m/s 而波浪浪高為 14.8m、周期 12.7s，負載參數如表 1，支撐結構在 38 秒模擬內共經歷 3 個波峰，節點之波浪負載示意圖如圖 5，前 5 秒為預力階段 (preload)，以緩慢施加負載避免震盪現象。

表 1 極限狀況負載參數

平均風速	陣風因子	陣風風速	波高	波浪周期
50m/s	1.4	70m/s	14.8m	12.7s

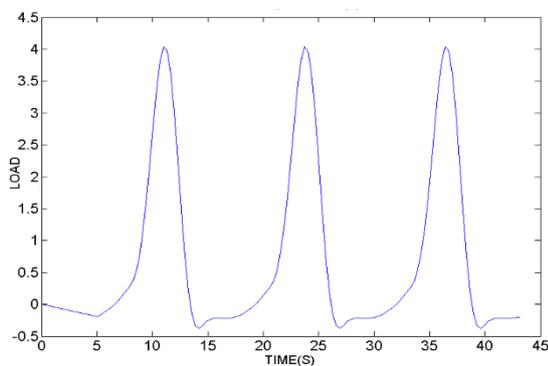


圖 7 支撐結構節點之波浪負載

## 2.4 疲勞破壞

疲勞現象在工程統計中顯示為結構破壞的主要因素之一，並且一直是結構分析中相當重要的問題，疲勞破壞有幾個可能原因：塑性破壞 (plastic collapse)、彈性不穩定 (elastic instability)、腐蝕 (corrosion)，當結構的某一點承受循環負載，在結構上會產生應力範圍，若在桿件的點上產生破裂，隨著循環次數增加，裂痕也會跟著增大導致結構斷裂，根據文獻統計離岸風機在運行年限內結構承受高達 $10^9$ 次循環負載，而疲勞現象最常發生在接點位置[5, 6]。動態模擬除了探討最大應力值是否高於降伏強度，將應力的時域性訊號以雨流記數法 (Rainflow counting) 整理後依照 Palmgren-Miner 線性破壞率假設，計算出破壞率大小，破壞率[7]定義如下：

$$\sum D_g = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

其中 $n_i$ 為實際循環次數

$N_i$ 為 S-N 疲勞曲線理論循環次數

## 2.5 S-N curve 與焊接效應

依照 DNV Standard (DNV-RP-C203) [5]，疲勞公式對於應力範圍與循環次數關係的定義如下：

$$\text{Log}(N) = \text{log}(\bar{a}) - m \text{log}(S_a) \quad (2)$$

其中  $S_a$  為應力範圍

$N_i$  為 S-N 疲勞曲線理論循環次數

$\bar{a}$  與  $m$  為疲勞曲線參數

$\bar{a}$  與  $m$  兩參數會隨環境不同而改變。在 DNV-RP-C203 [5]中定義所有圓管接點 (Tubular joint) 皆使用 T-curve，已考慮焊接狀況。針對 T-curve 共有三種環境假設，本研究使用陰極保護法狀況的參數。

表 2 不同環境下的 S-N curve

S-N curve	$N \leq 10^7$		$N \geq 10^7$ $m_2 = 5$ $\text{log}\bar{a}_2$	Fatigue limit at $10^7$
	$m_1$	$\text{log}\bar{a}_1$		
Seawater with cathodic protection	3	11.764	15.606	52.63

經由式(1)與式(2)所得破壞率，將應力訊號持續的時間除以破壞率，即可得預估疲勞壽命，若疲勞壽命公式[7]如下。

$$T = \frac{T_0}{D} \quad (3)$$

其中 $T_0$ 為應力訊號時間

$T$  為預估疲勞壽命

$D$  為破壞率

## 3. 模擬結果

### 3.1 靜態模擬結果

靜態模擬所施加負載為 38 秒動態歷程中，最大負載的時刻點，左上為 JX 支撐結構、右上為傳統式 JK 支撐結構、左下為 TJ30 支撐結構、右下為 MJ30 支撐結構，因為受到風負載的力矩較大，支撐結構最大應力值皆出現在右側支撐腳架的底部，最大應力值如表 4，而所選定材料 NV-DH36 鋼的降伏強度為 355MPa，可以發現兩種三腳式支撐結構最大應力皆超過降伏強度。四者最大應力值如表 3

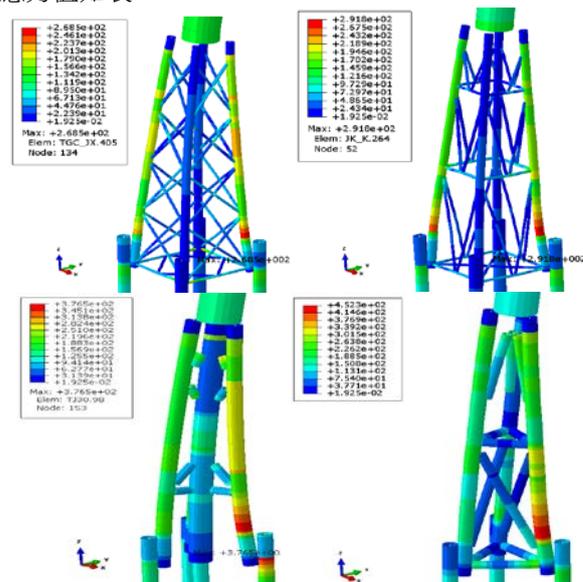


圖 8 颱風狀況靜態模擬最大應力值

表 3 靜態模擬最大應力值

支撐結構	JX	JK	TJ30	MJ30
最大應力(MPa)	268	291	376	453

### 3.2 動態模擬結果

為了避免因負載周期與結構自然頻率相近產生共振現象，而低估最大應力值，因此進行 38 秒極限狀況動態模擬，採用隱式求解法 (Dynamic,Explicit)，以 JK 支撐結構模型為例，最大應力值出現位置如圖 8，此處動態訊號 stress-time 如圖 9 所示紅色圓點標出波峰與波谷，最大應力值為 307MPa，略高於靜態分析相同位置的 291MPa。

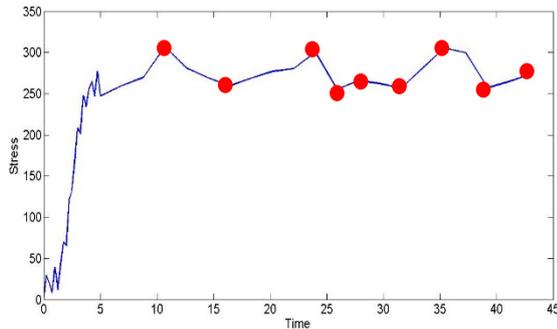


圖 9 JK 腳架底部動態模擬應力值

去除前 5 秒預力階段的應力訊號，將 5 到 43 秒訊號代入式(1)與式(2)中可以得到破壞率為  $2.39 \times 10^{-7}$ ，綜合考量颱風狀況出現機率與所得到的破壞率大小，可以得知在運轉年限內極限狀況對於疲勞壽命影響不大，安全性分析才是考量重點。

### 3.3 短時域疲勞分析

完成極限狀況評估結構安全性之後，針對表現較佳的支撐結構進行疲勞分析，若是考慮風與水負載便需要考量風速、風方向、波浪高度、波浪周期與波浪方向等參數，若以上述參數描述該環境負載狀況，便可將一海域負載狀況分割成上百甚至上千種。根據文獻[6]在北海長時域疲勞分析中，接點的疲勞破壞由風負載所主載 (62.46%-83.25%)，若考量風速對破壞率貢獻分布如圖 10，平均風速在 18-22m/s 破壞率貢獻比例最高。

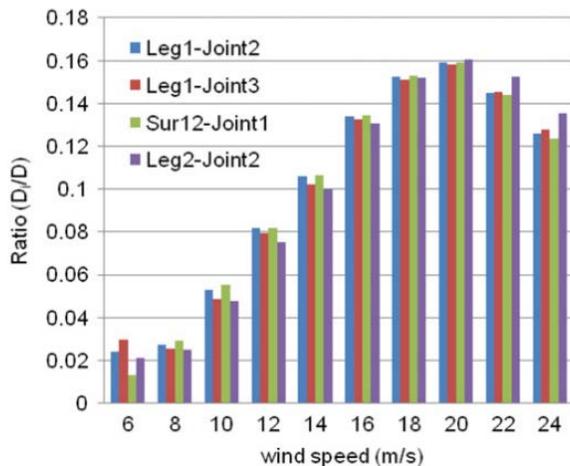


圖 10 不同風速對結構接點破壞率貢獻分布[6]

綜合考量圖 10 不同風速影響與彰濱地區 3 年統計資料

所得各風速機率分布，選定平均風速 17.5m/s 作為模擬，此種風速狀況出現機率約 1.3%，以 JK 結構進行 10 分鐘短時域模擬，並以支撐結構出現最大應力的桿件為例，其應力-時間訊號如圖 11，經由 Palmgren-Miner 破壞率理論計算可得累積破壞率為  $1.167 \times 10^{-7}$ 。

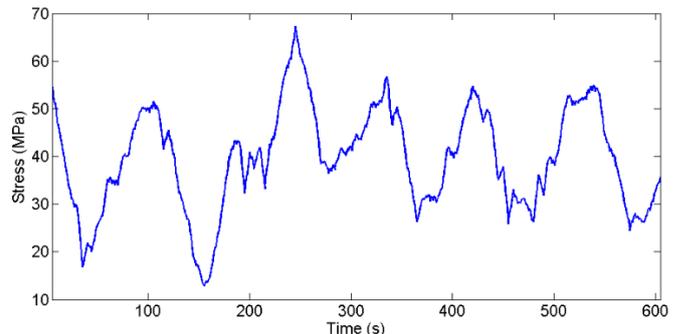


圖 11 JK 結構最大應力桿件之應力訊號

將此種風況破壞率以式(3)放大至 20 年，可得破壞率貢獻為 0.0159。但疲勞破壞易發生在接點處，若要得知完整的結構破壞率仍須對整體結構桿件進行計算，並且在要對多種負載狀況進行完成評估，方能得到 20 年破壞率總和。

$$\sum D_{20yrs} = \frac{20 \times p}{t} \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

其中  $n_i$  為實際循環次數

$N_i$  為 S-N 疲勞曲線理論循環次數

$p$  為負載狀況出現機率

$t$  為負載狀況模擬時間(年)

## 4. 結論

經由台灣海峽颱風狀況研究狀況，可以得到四種結構在極限狀況進行強度之比較，並作初步探討。

- I. 在相同高度與相近重量假設下，兩種四腳式結構在極限狀況表現較佳。
- II. 極限狀況破壞率  $2.39 \times 10^{-7}$ ，並且因為出現次機率低，因此對於疲勞損壞影響較小。
- III. 風負載為疲勞破壞主宰負載，考量出現機率選定平均風速 17.5m/s 狀況分析，對 JK 結構桿件 20 年破壞率初步評估，此處破壞率為 0.0159。

## 5. 參考文獻

1. Peng, L., *Analysis and Design of Offshore Jacket Wind Turbine*. 2010, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for marin teknikk.
2. Hall, R.A., *Offshore support structure and associated method of installing*. 2013, Google Patents.
3. Chen, I.-W., et al., *Design and Analysis of Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines*. *Energies*, 2016. **9**(4): p. 264.
4. Commission, I.E., *IEC 61400-3. Wind Turbines-Part*, 2009. **3**.

5. Veritas, D.N., *Fatigue design of offshore steel structures*. No. DNV-RP-C203, 2010.
6. Dong, W., T. Moan, and Z. Gao, *Long-term fatigue analysis of multi-planar tubular joints for jacket-type offshore wind turbine in time domain*. *Engineering Structures*, 2011. **33**(6): p. 2002-2014.
7. Niesłony, A., *Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009. **23**(8): p. 2712-2721.