

# تخمین نیروی جانبی<sup>۱</sup> موثر بر یک پایه قائم زبر سکوی دریایی تحت اثر امواج تصادفی دریا

محمد علی لطف اللهی یقین<sup>\*</sup>، کیوان فرزاد<sup>\*\*</sup> و مرتضی نقی پور<sup>\*\*\*</sup>  
گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه  
گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه مازندران

(دریافت مقاله: ۸۱/۳/۱۰ - دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۶/۴)

چکیده - نیروهای وارده از سوی امواج دریا بر روی سازه‌های دریایی، مشابه خود امواج، طبیعتی تصادفی دارند. این نیروها عمدتاً به دو نیروی همراستا با جهت انتشار موج<sup>۲</sup> و نیروی جانبی یا لیفت قابل تفکیک‌اند. طبیعت تصادفی نیروی لیفت از پیچیدگی بیشتری برخوردار بوده و بایستی با نیروهای همراستا با جهت انتشار موج در طراحیها ترکیب شوند. در مقاله حاضر سعی شده با به‌کارگیری دو شیوه<sup>۳</sup> مختلف، سری زمانی این نیرو تخمین زده شود. در این راستا نحوه<sup>۴</sup> تعیین ضریب لیفت  $C_L$  با دو شیوه<sup>۵</sup> مذکور مورد بحث قرار گرفته، با استفاده از آن نیروها تعیین و با مقادیر تجربی مقایسه شده است. داده‌های تجربی این تحقیق از آزمایشات با مقیاس بزرگ انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک دلفت هلند بر روی یک استوانه قائم زبر جمع آوری شده است.

واژگان کلیدی: امواج تصادفی، گردابه‌ها، نیروی لیفت، پدیده قفل شدگی، پایه قائم زبر، سکوی دریایی

## Estimation of Lift Force on a Rough Vertical Pile of Platform to Random Sea Waves

M. A. Lotfollahi Yaghin<sup>1</sup>, K. Farzad<sup>1</sup> and M. Naghipour<sup>2</sup>  
Department of Civil Engineering, Urmia University  
Department of Civil Engineering, Mazandaran University

**Abstract:** Similar to random sea waves, forces on the offshore structures due to waves are random. These forces can be mainly divided into two components, namely, inline forces and transverse or lift forces. The random nature of lift forces is more complicated than that of inline forces and both should be combined for design purposes. In the present paper, two different approaches have been used to determine time series of lift forces. Along these lines, the determination of lift coefficients is discussed which have then been used to obtain transverse forces and compared with experimental data. The experimental data used in this study were collected at Delft Hydraulics Laboratory on a full-scale rough vertical cylinder.

**Keywords:** Random Waves, Vortex Shedding, Lift force, Lock-in Phenomenon, Routh Vertical pile, Platform

\*\*\*- دانشیار

\*\* - کارشناس ارشد سازه

\* - استادیار سازه‌های دریایی

## فهرست علائم

|                                            |                                                                  |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| KC عدد کولگان                              | $C_1$ ضریب نیروی جانبی                                           |
| K/D زبری نسبی                              | $C_{ln}$ ضریب نیروی جانبی مربوط به هارمونیک n ام                 |
| M تعداد داده‌های موجود در یک سیکل کامل موج | $C_{lcn}$ ضریب نیروی جانبی مربوط به جمله $\cos$ در هارمونیک n ام |
| MNE میانگین خطای نرمال                     | $C_{lsn}$ ضریب نیروی جانبی مربوط به جمله $\sin$ در هارمونیک n ام |
| N تعداد جملات هارمونیک                     | D قطر سیلندر                                                     |
| RMSE جذر میانگین مربعات خطای نرمال         | $f_l$ نیروی جانبی (لیفت)                                         |
| St عدد استروهل                             | $f_m$ حداکثر متغیر اندازه گیری شده                               |
| T پریود موج                                | $f_p$ ماکزیمم نیروی بر آورد شده                                  |
| $T_p$ پریود پیک                            | $f_s$ فرکانس جاری شدن گردابه‌ها                                  |
| $u_m$ ماکزیمم سرعت افقی در ارتفاع مورد نظر | h عمق آب                                                         |
| x موقعیت پایه در محور افقی                 | H ارتفاع موج                                                     |
| y ارتفاع از کف دریا                        | $H_s$ ارتفاع موج مشخصه،                                          |
| $\rho$ جرم حجمی آب                         | k عدد موج                                                        |
| $\omega$ فرکانس موج ( $\omega = 2\pi/T$ )  | K ضخامت زبری                                                     |
| $\varphi$ تاخیر فاز                        |                                                                  |
| $\phi_n$ امین تاخیر فاز                    |                                                                  |

### ۱- مقدمه

می‌دهد. تحقیقات نشان می‌دهد که فرکانس نوسانات نیروی جانبی تقریباً دو برابر فرکانس امواج وارده است. از عوامل مؤثر بر نیروی جانبی، جدا شدن لایه مرزی آب در هنگام عبور موج از یک پایه استوانه‌ای است. در چنین شرایطی به دلیل تغییر در رژیم جریان آب، در پشت پایه گردابه‌های نامتقارنی با تناوب خاص در طرفین آن تولید و باعث عدم تقارن در توزیع فشار در جهت جانبی شده و در نتیجه برآیند این فشارها موجب تولید یک نیروی جانبی تصادفی در امتداد عمود بر جهت انتشار امواج می‌شود [۱]. در مواردی نیز که فرکانس تولید گردابه‌ها به فرکانس طبیعی استوانه نزدیک است، پدیده قفل شدگی<sup>۳</sup> اتفاق افتاده و موجب تشدید نیروی لیفت می‌شود [۲].

از دید نظری محاسبه نیروهای جانبی یا لیفت نسبت به نیروهای همراستای جریان از پیچیدگی بیشتری برخوردار است [۳]. در تعیین نیروهای همراستا از رابطه موریسون با به‌کارگیری ضرایب مناسب درگ و اینرسی استفاده می‌شود [۴]. برای تخمین دقیقتر این نیرو، بایستی ضرایب هیدرودینامیکی (ضریب

از اهم مسائلی که در طراحی هر سازه در نظر گرفته می‌شود نیروهای وارده بر آن سازه است. یک سکوی دریایی علاوه بر تحمل بارهای مرده و سرویس در معرض نیروهای دیگری که نسبت به زمان متغیرند نیز قرار دارد. عمده این نیروها ناشی از امواج و جریانهای دریایی است. نیروهای ناشی از امواج به تبعیت از طبیعت تصادفی نوسانات و موجهای نامنظم سطح دریا اثراتی نامنظم و تصادفی روی سازه اعمال می‌کنند. یک پایه استوانه‌ای به‌عنوان جزئی از سکوی دریایی تحت اثر امواج، دو نیروی غیر هم جهت یکی در راستای جریان و دیگری عمود بر راستای جریان (جانبی یا لیفت) را تحمل می‌کند. نیروی وارده در راستای جریان تقریباً از نوسانات سطح دریا تبعیت کرده و طبیعت تصادفی آن مشابه امواج وارده بوده و لذا رابطه آن با امواج را تقریباً می‌توان خطی تصور کرد. از سوی دیگر نیروی جانبی تولید شده در عین متاثر بودن از امواج وارده بر پایه، رفتاری متفاوت تر از نوسانات سطح دریا از خود بروز

امواج تصادفی تولید شده در این آزمایشات از طیف ( JONSWAP) پروژه مشترک موج دریای شمال [۸]، با ارتفاع موج مشخصه<sup>۶</sup> ۱/۵ متر و با پریود پیک ۵/۹ ثانیه بهره گرفته و موجهای تولید شده به صورت امواج تصادفی و با تاج طولی<sup>۷</sup> اند. نیروها در ارتفاع ۳/۵ و ۲/۵ متری از کف کانال اندازه گیری شده است. به دلیل برخی خطاهای گزارش شده در نیروهای اندازه گیری شده در ارتفاع ۳/۵ متری در اثر نوسانات آب درون پایه در این تراز [۶]، صرفا نتایج حاصله از ارتفاع ۲/۵ متر مبنای تحلیل در این مقاله خواهد بود. آزمایشات تحت اثر امواج تصادفی در حضور جریان آب نیز تکرار شده است. مدلسازی جریان با حرکت دادن پایه با سرعت ثابت (۱ m/s) به طرف مثبت یا منفی محور کانال انجام شده است. برای تفکیک تاثیر جریان آب آزمایشات پایه ثابت با آزمون ۱، حضور جریان مثبت با آزمون ۲ و جریان منفی با آزمون ۳ نامگذاری شده اند.

### ۳- روابط تعیین کننده نیروی جانبی

تعیین نیروی جانبی ناشی از امواج روی یک پایه استوانه ای مورد توجه بعضی از محققان سازه های دریایی قرار گرفته است. از جمله چاکرابارتی در سال ۱۹۸۷ [۹]، برای برآورد نیروی جانبی معادله ای به صورت ترکیب چند جمله هارمونیک به شکل زیر ارائه کرد:

$$f_1(t) = A_D u_m^2 \sum_{n=1}^N C_{ln} \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (1)$$

$$A_D = \frac{1}{2} \rho D$$

در این رابطه:

$N$ : تعداد جملات هارمونیک،  $u_m$ : حداکثر سرعت افقی در ارتفاع مورد نظر،  $C_{ln}$ : ضریب نیروی جانبی مربوط به هارمونیک  $n$  ام،  $\omega$ : فرکانس موج  $\left(\frac{2\pi}{T}\right)$ ،  $T$ : پریود موج،  $\rho$ : جرم حجمی آب،  $D$ : قطر سیلندر،  $\phi_n$ :  $n$  امین تاخیر فاز. همچنین بیرمن و همکارانش در سال ۱۹۸۴ [۱۰]، با فرض اینکه بتوان سرعت افقی ذرات آب را با یک تابع هارمونیک به

درگ و اینرسی) دقیقا تعیین شوند که در این رابطه تحقیقات زیادی صورت گرفته و پیشرفتهای خوبی حاصل شده است [۵]. در رابطه با تعیین نیروهای جانبی فعالیت زیادی صورت نگرفته است. دو دلیل عمده می تواند از عوامل اصلی این کم توجهی باشد. اول اینکه نیروهای جانبی تاثیر کمی کمتری روی پایه ها دارد یعنی در طراحی نقش دوم را بازی می کند. دوم پیچیدگی رفتاری آن و نیز نحوه محاسبه آن است. لیکن با توجه به اینکه نیروهای جانبی علی رغم ضعیف بودنشان قابلیت ترکیب با نیروهای همراستا را دارند لذا موضوع کماکان مورد توجه محققان است.

در مقاله حاضر سری زمانی نیروی جانبی با دو روش مختلف نظری تعیین و با مقادیر مشابه تجربی (آزمایشگاهی) مقایسه شده است. ضمنا به منظور امکان تشخیص دقت و مزیت این دو روش نظری نسبت به هم دیگر، خطاهای نیروهای محاسبه شده از هر دو روش نسبت به مقادیر مشابه تجربی (واقعی) تعیین و ارائه شده است. در تعیین این خطاها از دو شیوه میانگین خطای نرمال (MNE)<sup>۴</sup> و نیز جذر میانگین مربعات خطای نرمال (RMSE)<sup>۵</sup> استفاده شده است.

### ۲- شرح آزمایشات

نتایج تجربی به کار گرفته شده در این مقاله بر مبنای آزمایشاتی است که در سال ۱۹۹۳ میلادی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دلفت هلند بر روی پایه استوانه ای انجام شده است. این آزمایشات در یک مقیاس بزرگ در کانال موج دلنا، با طول ۲۵۰، عرض ۵ و ارتفاع ۷ متر و با متوسط عمق آب ۵ متری انجام شده است [۶]. در این کانال قابلیت تولید موجهای منظم و همچنین نامنظم همراه با مدل جریان آب توسط حرکت پایه در طول کانال وجود دارد، که اطلاعات کافی در مراجع [۶] و [۷] ارائه شده است. در مقاله حاضر تجزیه و تحلیل بر روی نتایج یک سری از آزمایشات انجام گرفته، که در آن استوانه بکار گرفته شده دارای قطر ۵۱۳ میلیمتر و زبری نسبی ۰/۰۳۸ (نسبت ضخامت زبری به قطر پایه) و فرکانس ۴ هرتز است.

صورت  $u(t) = u_m \cos(\omega t)$  بیان کرد معادله زیر را برای محاسبه نیروی جانبی یک سیلندر صلب ارائه کردند:

$$f_1(t) = A_D C_1 u(t)^2 \cdot \sin \left[ \int_0^t \frac{2\pi}{D} \cdot St \cdot |u(t)| dt + \phi \right] \quad (2)$$

در رابطه اخیر  $St$  عدد استروهال<sup>۱</sup> نامیده می‌شود که نمایانگر فرکانس نیروی جانبی است و با معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$St = \frac{f_s D}{u_m} \quad (3)$$

$f_s$  فرکانس جاری شدن گردابه‌هاست که مشابه با فرکانس نیروی لیفت است.

با عنایت به معادلات (۲ و ۱) واضح است که با استفاده از سینماتیک ذرات آب و ضرایب لیفت، نیروی وارد بر یک سیلندر را می‌توان محاسبه کرد. در این راستا نحوه تعیین ضرایب لیفت از اهم مسائل است. لیکن قبل از پرداختن به این ضرایب بایستی یادآور شد که در یک جریان نوسانی ایجاد شدن گردابه‌ها<sup>۲</sup> از عوامل اصلی ایجاد نیروی لیفت است. به منظور اینکه گردابه‌ها بتوانند تشکیل شوند بایستی دامنه نوسان موج آب به اندازه کافی بزرگ باشد. این موضوع با توجه به شکل (۱) روشنتر می‌شود. در این شکل پروفیل موج همراه با نیروهای هم راستا با جهت انتشار موج و نیروی لیفت در واحد ارتفاع سیلندر که به‌طور تجربی اندازه‌گیری شده برای مقایسه نشان داده شده است. چنانچه در شکل مشخص است، تناظر خوبی بین پروفیل موج و نیروی هم راستا وجود دارد. ولی نیروی لیفت به‌دلیل تاثیر پارامترهای مختلف از جمله دامنه، سرعت و فرکانس امواج، ابعاد و زبری سطح استوانه و ... در بعضی نقاط دارای نوسانات کوچکی بوده و شرایط و فرصت کافی برای تشکیل کامل گردابه‌ها وجود نداشته است. توجیه موضوع طبق نظریه موج خطی<sup>۱۰</sup> به‌صورت زیر می‌تواند دنبال شود. در این نظریه سرعت افقی ذرات آب در ارتفاع  $y$  در آبی به عمق  $h$  با معادله زیر بیان می‌شود [۱۱]:

$$u(t) = \frac{\omega H \cosh(ky)}{2 \sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (4)$$

در این رابطه  $k$  عدد موج،  $y$  ارتفاع از کف دریا،  $h$  عمق آب و  $H$  ارتفاع موج (فاصله بین اوج و قعر موج) می‌باشد. با صرف نظر کردن از تاثیر جملات هیپربولیکی (که برای آبهای عمیق منطقی است) دامنه سرعت برابر خواهد بود با:

$$u_m = \frac{\omega H}{2} = \frac{\pi H}{T} \quad (5)$$

از طرفی برای تشکیل حداقل یک گردابه بایستی شرط زیر برقرار باشد:

$$\frac{T}{2} > \frac{1}{2f_s} \quad (6)$$

با جایگذاری معادله (۵) در معادله (۳) و با فرض اینکه مقدار متوسط عدد استروهال برابر  $0.7$  باشد خواهیم داشت:

$$\frac{T}{2} > \frac{TD}{0.4\pi H} \Rightarrow \frac{H}{D} > \frac{10}{2\pi} \quad (7)$$

بنابراین برای بررسیهای بعدی امواجی که شرط فوق در آنها برقرار نباشد مد نظر قرار نگرفته اند.

#### ۴- تعیین ضرایب نیروی لیفت

##### ۴-۱- روش اول

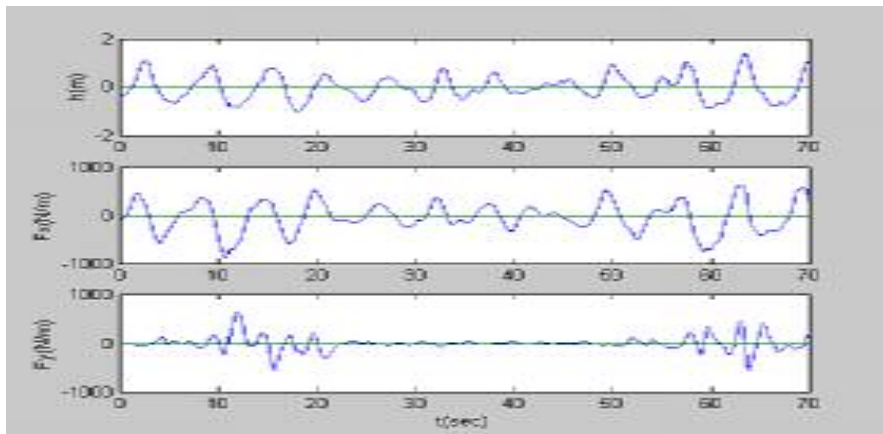
طبق معادله (۱) مقدار نیروی لیفت با جمع جبری چند جمله هارمونیکی بدست می‌آید که این چند جمله ای می‌تواند به‌صورت زیر بازنویسی شود:

$$f_1(t) = A_D u_m^2 \sum_{n=1}^N \left[ \frac{C_{lcn} \cos(n\omega t)}{C_{lcn} \cos(n\omega t) + C_{lsn} \sin(n\omega t)} \right] \quad (8)$$

$$\begin{cases} C_{ln} = (C_{lcn}^2 + C_{lsn}^2)^{1/2} \\ \phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{C_{lsn}}{C_{lcn}} \right) \end{cases} \quad (9)$$

در صورتی که  $f_1$  نیروی جانبی اندازه‌گیری شده در نقطه مورد نظر باشد اختلاف آن با نیروی محاسبه شده عبارت خواهد بود از:

$$er_f = f_1 - A_D u_m^2 \sum_{n=1}^N \left[ \frac{C_{lcn} \cos(n\omega t)}{C_{lcn} \cos(n\omega t) + C_{lsn} \sin(n\omega t)} \right] \quad (10)$$



شکل ۱- مقایسه پروفیل موج، نیروی موازی جهت موج (طولی) و نیروی جانبی (لیفت)

$$A_D u_m^2 \left[ \sum_{i=1}^M C_{lc1} \sin(k\omega t_i) \cos(\omega t_i) + \sum_{i=1}^M C_{lc2} \sin(k\omega t_i) \cos(2\omega t_i) + \dots + \sum_{i=1}^M C_{lcn} \cdot \sin(k\omega t_i) \cos(n\omega t_i) + \sum_{i=1}^M C_{ls1} \sin(k\omega t_i) \cdot \sin(\omega t_i) + \sum_{i=1}^M C_{ls2} \sin(k\omega t_i) \sin(2\omega t_i) + \dots + \sum_{i=1}^M C_{lsk} \sin^2(k\omega t_i) + \dots + \sum_{i=1}^M C_{lsn} \cdot \sin(k\omega t) \sin(n\omega t_i) \right] = \sum_{i=1}^M (f_{li}) \cos(k\omega t_i) \quad (14)$$

در این معادلات  $k$  شماره مؤلفه هارمونیک مورد نظر است  $(1 \leq k \leq N)$ .

با تغییرات  $k$  جمعاً  $2N$  معادله خطی بر حسب مجهولات  $C_{lc}$  و  $C_{ls}$  به دست می‌آیند، که با حل آنها می‌توان مقادیر ضرایب لیفت را محاسبه کرد. برای حالتی که فقط دو مؤلفه مدنظر باشد، شکل معادلات بدین قرار خواهند بود:

$$A_D u_m^2 \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{lc1} \\ C_{ls1} \\ C_{lc2} \\ C_{ls2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \\ f_{41} \end{bmatrix} \quad (15)$$

به طوری که:

$$C_{11} = \sum_{i=1}^M \cos^2(\omega t_i)$$

مجموع مربعات خطاها در یک موج برابر خواهد بود با:

$$LS = \sum_{i=1}^M (er_f)^2 \quad (11)$$

$M$  تعداد داده های موجود در یک سیکل کامل موج است.

برای رسیدن به تخمین مناسب نیروی جانبی بایستی مشتق  $LS$  نسبت به تمام مجهولات برابر صفر شود:

$$\frac{\partial LS}{\partial C_{lcn}} = 0, \quad \frac{\partial LS}{\partial C_{lsn}} = 0 \quad (12)$$

با به کارگیری معادلات فوق خواهیم داشت:

$$\frac{\partial LS}{\partial C_{lck}} = 0 \Rightarrow$$

$$A_D u_m^2 \left[ \sum_{i=1}^M C_{lc1} \cos(k\omega t_i) \cos(\omega t_i) + \sum_{i=1}^M C_{lc2} \cos(k\omega t_i) \cos(2\omega t_i) + \dots + \sum_{i=1}^M C_{lck} \cos^2(k\omega t_i) + \dots + \sum_{i=1}^M C_{lcn} \cos(k\omega t_i) \cdot \cos(n\omega t_i) + \sum_{i=1}^M C_{ls1} \cos(k\omega t_i) \sin(\omega t_i) + \sum_{i=1}^M C_{ls2} \cos(k\omega t_i) \sin(2\omega t_i) + \dots + \sum_{i=1}^M C_{lsn} \cdot \cos(k\omega t) \sin(n\omega t_i) \right] = \sum_{i=1}^M (f_{li}) \cos(k\omega t_i) \quad (13)$$

$$\frac{\partial LS}{\partial C_{lsk}} = 0 \Rightarrow$$

$$f_1(t) = A_D C_{lc} u(t)^2 \cos \left[ \int_0^t \beta(t) dt \right] + \quad (17)$$

$$A_D C_{ls} u(t)^2 \sin \left[ \int_0^t \beta(t) dt \right]$$

به طوری که:

$$\begin{cases} C_1 = (C_{lc}^2 + C_{ls}^2)^{1/2} \\ \phi = \tan^{-1} \left( \frac{C_{lc}}{C_{ls}} \right) \\ \beta(t) = \frac{2\pi}{D} \cdot St \cdot |u(t)| \end{cases} \quad (18)$$

با انجام مراحل مشابه آنچه که در روش اول دنبال شد، برای محاسبه ضریب لیفت به معادلات زیر می توان دست یافت:

$$A_D C_{lc} \sum_{i=1}^M u(t_i)^4 \cos^2 \left[ \int_0^{t_i} \beta(t_i) dt \right] + A_D C_{ls} \sum_{i=1}^M u(t_i)^4 \cos \left[ \int_0^{t_i} \beta(t_i) dt \right] \sin \left[ \int_0^{t_i} \beta(t_i) dt \right] = \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^M (f_{li}) u(t_i)^2 \cos \left[ \int_0^{t_i} \beta(t_i) dt \right] + A_D C_{lc} \sum_{i=1}^M u(t_i)^4 \cos \left[ \int_0^{t_i} \beta(t_i) dt \right] \sin \left[ \int_0^{t_i} \beta(t_i) dt \right] + A_D C_{ls} \sum_{i=1}^M u(t_i)^4 \sin^2 \left[ \int_0^{t_i} \beta(t_i) dt \right] = \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^M (f_{li}) u(t_i)^2 \sin \left[ \int_0^{t_i} \beta(t_i) dt \right]$$

با حل همزمان دو معادله فوق ضریب لیفت به دست می آید.

## ۵- تحلیل و بیان نتایج

در تعیین ضریب نیروی لیفت در معادله (۱) هر چند با افزایش  $n$  (تعداد جملات هارمونیکها) دقت برآورد را می توان افزایش داد ولی در این بحث به علت افزایش حجم محاسبات فقط سه جمله اول هارمونیک ( $n=3$ ) به کار گرفته شده است. لذا مشابه معادله (۱۵) یک ماتریس (۶×۶) در این راستا تعیین و استفاده شده است که نتایج بدست آمده برای ضرایب لیفت در قبال عدد کولگان کارپنتر  $^{11} (KC = \frac{u_m T}{D})$  در شکل

$$C_{12} = C_{21} = \sum_{i=1}^M \cos(\omega t_i) \sin(\omega t_i)$$

$$C_{13} = C_{31} = \sum_{i=1}^M \cos(\omega t_i) \cos(2\omega t_i)$$

$$C_{14} = C_{41} = \sum_{i=1}^M \cos(\omega t_i) \sin(2\omega t_i)$$

$$C_{22} = \sum_{i=1}^M \sin^2(\omega t_i)$$

$$C_{23} = C_{32} = \sum_{i=1}^M \sin(\omega t_i) \cos(2\omega t_i)$$

$$C_{24} = C_{42} = \sum_{i=1}^M \sin(\omega t_i) \sin(2\omega t_i)$$

$$C_{33} = \sum_{i=1}^M \cos^2(2\omega t_i)$$

$$C_{34} = C_{43} = \sum_{i=1}^M \cos(2\omega t_i) \sin(2\omega t_i)$$

$$C_{44} = \sum_{i=1}^M \sin^2(2\omega t_i)$$

$$f_{11} = \sum_{i=1}^M (f_{li}) \cos(\omega t_i)$$

$$f_{21} = \sum_{i=1}^M (f_{li}) \sin(\omega t_i)$$

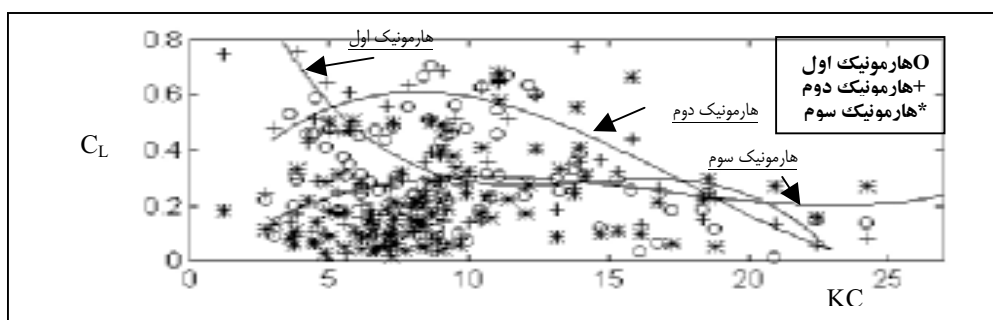
$$f_{31} = \sum_{i=1}^M (f_{li}) \cos(2\omega t_i)$$

$$f_{41} = \sum_{i=1}^M (f_{li}) \sin(2\omega t_i) \quad (16)$$

چنانچه ملاحظه می شود ماتریس ضرایب کاملا متقارن بوده و عناصر آن از نظم خاصی تبعیت می کنند. کلیه عناصر این ماتریس و همچنین بردار مقادیر معلوم بر اساس نتایج آزمایشات به راحتی قابل محاسبه اند.

## ۴-۲- روش دوم

در این روش نیز با استفاده از روش حداقل مجموع مربعات نسبت به برآورد ضریب لیفت به کار برده شده در معادله (۲) اقدام و در این راستا ابتدا معادله مذکور را به صورت زیر بازنویسی می کنیم:



شکل ۲- تغییرات ضرایب لیفت نسبت به KC که با استفاده از روش اول به دست آمدند.

فرکانس طبیعی استوانه با فرکانس نیروی لیفت (بیش از ده برابر) امکان وقوع پدیده قفل شدگی وجود ندارد.

با اعمال روش حداقل مجموع مربعات ضرایب لیفت مربوط به رابطه (۲) نیز محاسبه شده‌اند که تغییرات آن نسبت به عدد کولگان کارپتسر (KC) در شکل (۴) آورده شده است. به طوری که مشخص است در ازای مقادیر کوچک KC پراکندگی در ضرایب بیشتر است و با افزایش عدد KC ضرایب لیفت به سمت یک عدد مشخصی میل می‌کند. به عبارت دیگر با افزایش عدد KC ضرایب لیفت به ثبات بیشتری می‌رسد. همچنین در شکل (۵) تغییرات عدد استروهاال در ازای تغییرات عدد KC نشان داده شده است. همان طوری که ملاحظه می‌شود روند تغییرات آن تقریباً مشابه ضریب لیفت است.

بدیهی است در محاسبه نیروی لیفت از دو معادله (۱) یا (۲) روشی مناسبتر است که کمترین خطا را نسبت به مقادیر واقعی داشته باشد. برای ارزیابی خطا، از دو تعریف متداول یعنی میانگین خطای نرمال (MNE) و نیز از جذر میانگین مربعات خطاهای نرمال (RMSE) که معادلات آن به قرار زیر است بهره گرفته شده است:

$$MNS = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f_m - f_p}{f_m} \quad (21\text{-الف})$$

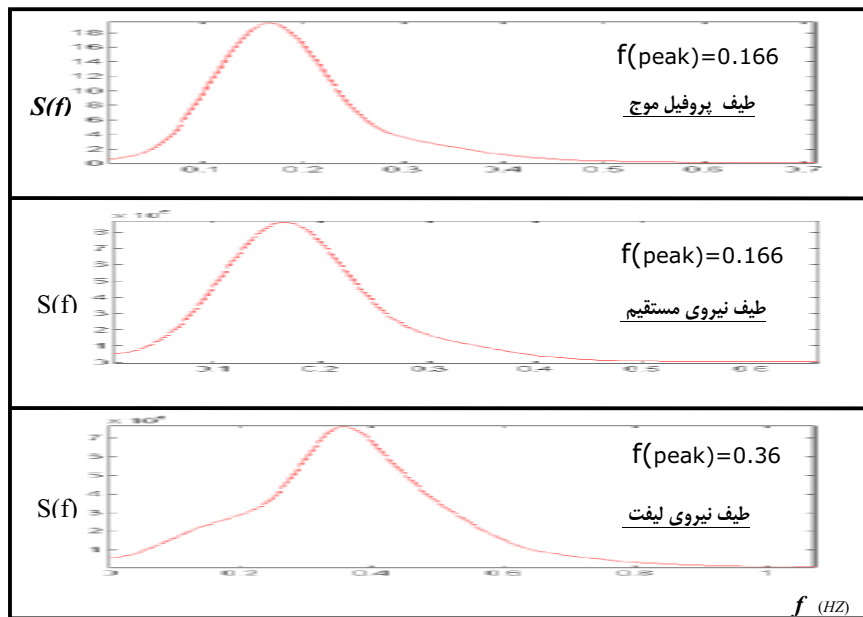
$$RMSE = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{f_m - f_p}{f_m} \right]^2} \quad (21\text{-ب})$$

جدول ۱- مقادیر خطای نیروی لیفت تعیین شده با معادلات (۱ و ۲)

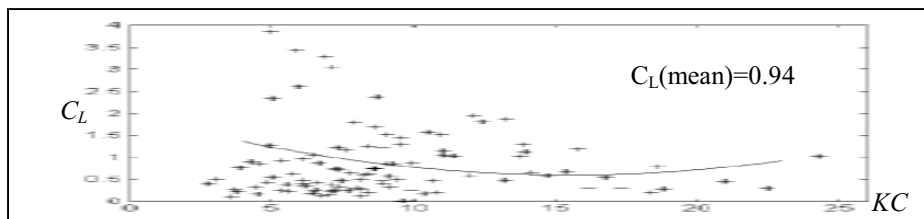
| مقدار | C <sub>1</sub> میانگین |      |      | معادله |     |
|-------|------------------------|------|------|--------|-----|
|       | خطا                    | n=۱  | n=۲  |        | n=۳ |
| RMSE  | MNE                    |      |      |        |     |
| ۲۵/۵۷ | ۱۹/۱۷                  | ۰/۳۹ | ۰/۵۳ | ۰/۲۶   | ۱   |
| ۴۹/۱۲ | ۴۰/۵                   | ۰/۹۴ |      |        | ۲   |

(۲) نشان داده شده است. همچنین مقادیر میانگین ضرایب فوق الذکر در جدول (۱) نیز درج شده است.

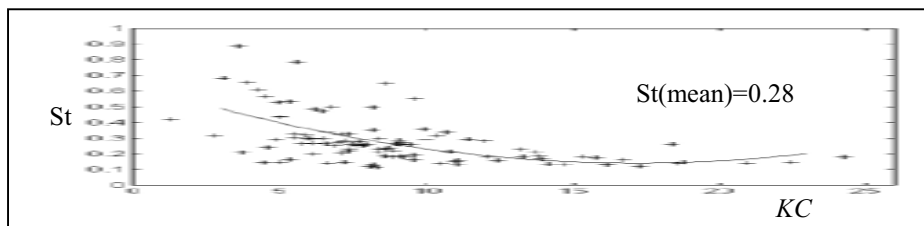
با توجه به شکل (۲) ملاحظه می‌شود که در محدوده  $5 \leq KC \leq 20$  ضریب لیفت مربوط به هارمونیک دوم و به تبع آن نیروی مربوط به آن حائز اهمیت است. که به نوبه خود بیانگر این مطلب است که در این محدوده، فرکانس نیروی لیفت در حدود دو برابر فرکانس موج است. این موضوع را با توجه به زیاد بودن میانگین ضریب لیفت هارمونیک دوم نسبت به دو حالت دیگر نیز می‌توان نتیجه گیری کرد. در شکل (۳) طیف چگالی پروفیل موج با طیف نیروی همراستا و نیز طیف نیروی لیفت مقایسه شده است. با توجه به فرکانس نقطه پیک طیف ها که در روی شکل مذکور نشان داده شده است، مشخص است که فرکانس پیک طیف موج با فرکانس نیروهای همراستا یکسان ولی فرکانس پیک نیروی لیفت در حدود ۲/۲ برابر فرکانس پیک طیف موج است. در نتیجه می‌توان اظهار داشت که نیروی لیفت اکثراً در فرکانسی معادل دو برابر فرکانس موج نوسان می‌کند. ضمناً با عنایت به اختلاف زیاد



شکل ۳- مقایسه طیف پروفیل موج و نیروهای طولی و جانبی



شکل ۴- تغییرات ضرایب لیفت نسبت به KC که با استفاده از روش دوم تعیین شده است.



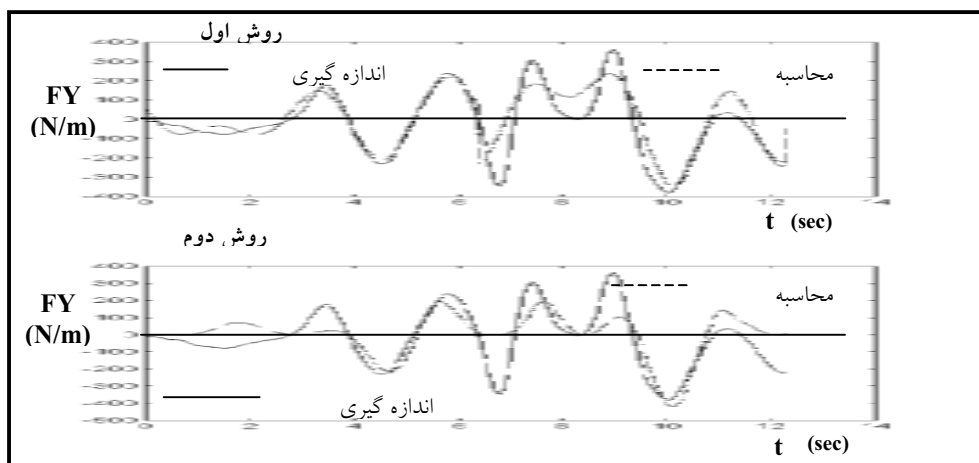
شکل ۵- تغییرات عدد استروهال نسبت به KC

معادله (۲) از دقت بیشتری برخوردار است. از سوی دیگر مثبت بودن مقادیر (MNE) مبین کمتر بودن نیروی لیفت محاسباتی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. همچنین شکل (۶) نیروهای لیفت محاسبه شده با معادلات (۱) و همچنین (۲) را به صورت سری زمانی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. در پایان به منظور نشان دادن تاثیر جریان آب،

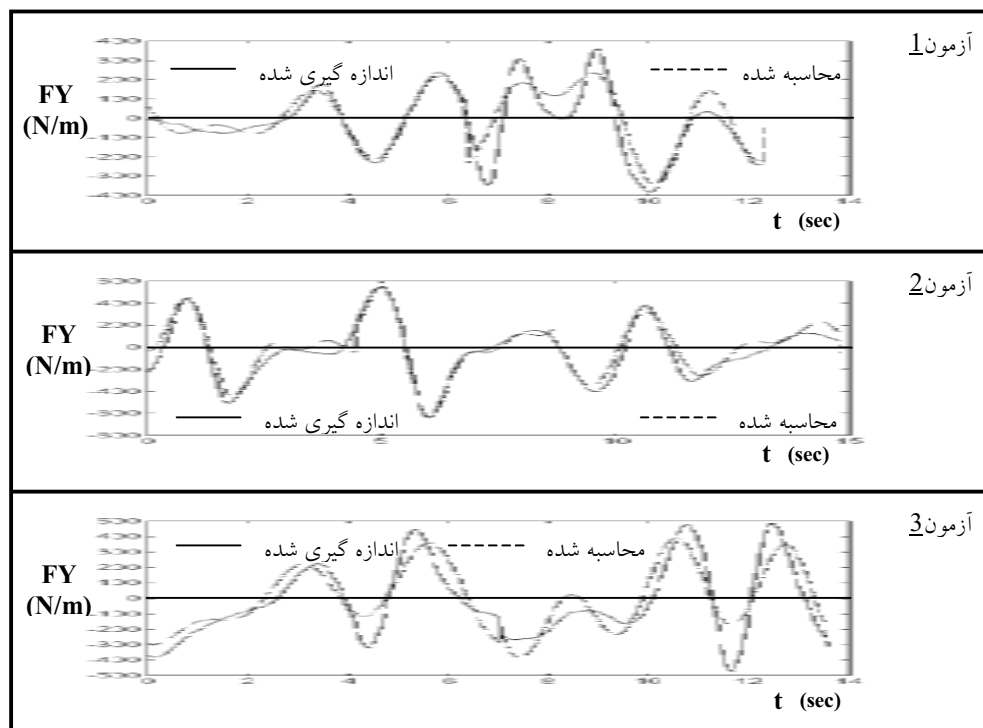
در این روابط  $f_m$  حداکثر متغیر اندازه‌گیری شده و  $f_p$  حداکثر مقدار بر آورد شده نیرو می‌باشد.  $N$  نیز بیانگر تعداد امواج است.

مقادیر خطاهای مربوط به محاسبه نیروی لیفت که از معادله (۲۰) تعیین شده اند در جدول (۱) درج شده اند. از مقایسه خطاها این نکته استنتاج می‌شود که معادله (۱) در مقایسه با





شکل ۶- مقایسه بین نیروهای محاسبه و اندازه گیری شده به روشهای اول و دوم

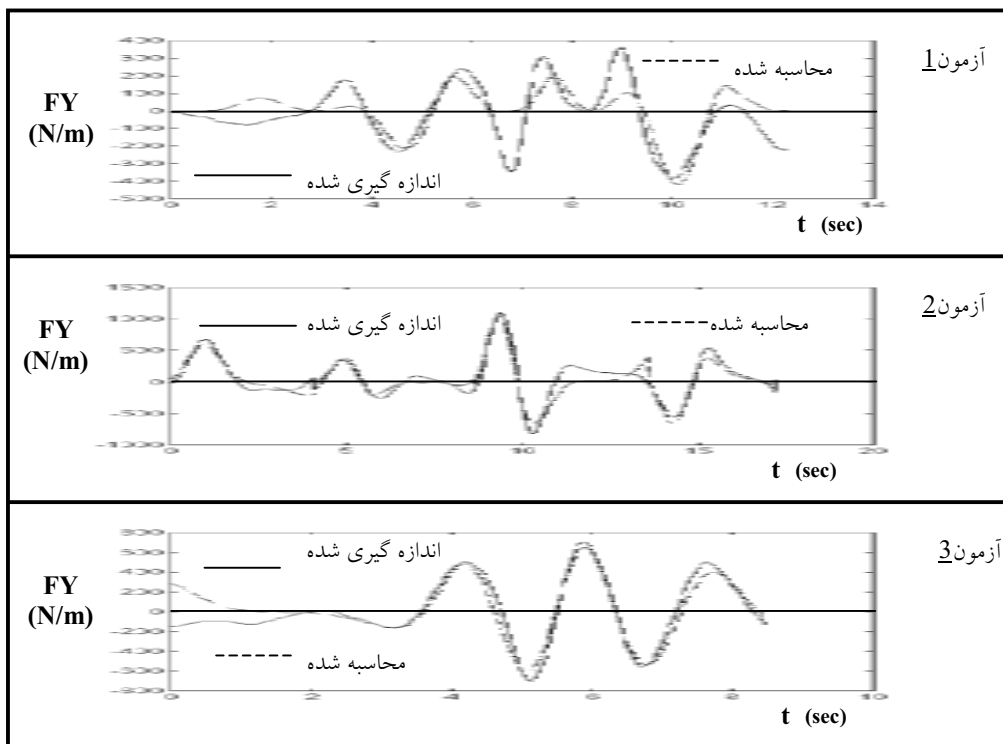


شکل ۷- مقایسه بین نیروهای محاسبه و اندازه گیری شده به روش اول در آزمونهای ۱، ۲ و ۳

### ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

۱) به طور کلی نتایج این تحقیق بیانگر آن است که به دلیل طبیعت تصادفی امواج دریا و به تبع آن نیروهای وارده به یک پایه بخصوص در راستای جانبی از پیچیدگی خاصی برخوردار بوده و لذا ارائه یک مدل دقیق ریاضی برای تخمین آن مشکل

محاسبات و تخمینهای مشابهی برای نیروهای لیفت در حضور جریان مثبت (آزمون ۲) یا منفی (آزمون ۳) انجام شده و برای روشهای اول و دوم به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) و نیز مقادیر خط‌های مربوطه نیز به ترتیب در جداول (۲) و (۳) ارائه شده‌اند.



شکل ۸- مقایسه بین نیروهای محاسبه و اندازه گیری شده به روش دوم در آزمونهای ۱، ۲ و ۳

جدول ۲- میانگین ضرایب و مقادیر خطای نیروی لیفت، تعیین شده با روش اول در آزمونهای ۱، ۲ و ۳

| خطا      | مقدار   | $C_1$ |      |      | آزمون |
|----------|---------|-------|------|------|-------|
|          |         | n=۱   | n=۲  | n=۳  |       |
| RMSE (%) | MNE (%) | n=۱   | n=۲  | n=۳  | ۱     |
| ۲۵/۵۷    | ۱۹/۱۷   | ۰/۳۹  | ۰/۵۳ | ۰/۲۶ |       |
| ۱۹/۶۴    | ۱۳/۰۶   | ۰/۲۵  | ۰/۲۵ | ۰/۱۵ |       |
| ۳۶/۲۱    | ۲۷/۲۵   | ۰/۱۸  | ۰/۱۷ | ۰/۱۸ | ۳     |

جدول ۳- میانگین ضرایب و مقادیر خطای نیروی لیفت، تعیین شده با روش دوم در آزمونهای ۱، ۲ و ۳

| خطا      | مقدار   | $C_1$ |               | آزمون |
|----------|---------|-------|---------------|-------|
|          |         | MEAN  | $\sigma(C_1)$ |       |
| RMSE (%) | MNE (%) | MEAN  | $\sigma(C_1)$ | ۱     |
| ۴۹/۱۲    | ۴۰/۵    | ۰/۹۴  | ۱/۰۷          |       |
| ۲۴/۸۵    | ۱۷/۱    | ۰/۶۶  | ۰/۳۳          |       |
| ۳۸/۳۵    | ۳۰/۳۱   | ۰/۴۸  | ۰/۲۵          | ۳     |

نیاید و ترکیب دو نیرو یعنی جانبی و همراستا با موج در طراحی بایستی مد نظر قرار گیرد.

۵) استفاده از ترکیب تعداد بیشتری از جملات هارمونیکی دقت بیشتری را در برآورد نیروی لیفت به همراه دارد و در صورت استفاده از جملات کمتر مقدار نیروی برآورد شده در جهت عدم اطمینان خواهد بود.

۶) وجود یک زاویه  $\phi$  در تمامی روشهای محاسبه سری زمانی نیروی لیفت کاربرد این معادلات را در عمل با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین تعیین یک توزیع مناسب احتمالی برای  $\phi$  ضروری است و به دست آوردن آن مستلزم انجام کارهای آماری بر روی تعداد زیادی از آزمون‌هاست.

۷) تخمین نیروهای جانبی ناشی از امواج تصادفی در حضور جریان مثبت یا منفی با استفاده از روشهای فوق مقدور بوده و خطای حاصله بین نیروهای تخمینی و اندازه گیری شده در جریان آزمون ۲ کمتر از وضعیت بدون جریان است.

است. لیکن با توجه به روشهای به‌کارگرفته شده در این تحقیق و تحلیل داده‌های تجربی نتایج کلی زیر قابل استنتاج است.

۲) در مواردی که دامنه نوسان امواج سطح دریا کوچک است، گردابه‌ها به‌طور کامل تولید نشده و نیروی لیفت دارای دامنه نوسانات کوچکی است. به عبارتی شرط تولید سیکل کامل نیروی لیفت یعنی معادله  $H/D > 10/2\pi$  برقرار نمی‌شود.

۳) محقق شد که فرکانس نیروی لیفت تقریباً دارای مقداری حدود دو برابر فرکانس موج است (فرکانس پیک نیروی لیفت در این آزمایشات ۲/۲ برابر فرکانس پیک امواج وارده است).

به دلیل اختلاف نسبتاً زیاد بین فرکانس پایه استوانه‌ای (۴ هرتز) و فرکانس نیروی لیفت (تقریباً ۰/۴ هرتز) پدیده قفل‌شدگی اتفاق نمی‌افتد.

۴) وجود نیروی لیفت باعث می‌شود که نیروی ماکزیمم وارده بر یک عضو سازه دریایی کاملاً در جهت انتشار موج بوجود

## واژه‌نامه

1. lift or transverse force
2. inline force
3. lock-in phenomenon
4. mean normal error
5. root mean square error
6. significant wave height

7. long creast
8. Strouhal number
9. vortex shedding
10. airy wave theory
11. Keulegan Carpenter

## مراجع

1. Hallam, M.G., Heaf, N.J. and Wotton, L.R., "Dynamics of Marine Structures: Methods of Calculating the Dynamic Response of Fixed Structures Subject to Wave and Current Action," Report UR8, CIRIA Underwater Engineering Group, London, 1978.
2. Faltinsen, O.M., "Sea Loads on Ships and Offshore Structures," Cambridge University Press, UK, 1990.
3. Sarpkaya, T., and Isaacson, M., "Mechanics of Forces on Offshore Structures," Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York, 1981.
4. Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., and Schaaf, S., "The Force Exerted by Surface Wave on Piles," American Institute of Mining and Metallurgical Engineerings, Vol. 189, pp. 147-154, 1950.
5. Naghipour, M., "The Accuracy of Hydrodynamic Force Prediction for Offshore Structures and Morison's Equation," PhD Thesis, Heriot Watt University, 1996.
6. Mackwood, P.R., "Wave and Current Flows Around Circular Cylinders at Large Scale," LIP Project 10D, 1993.
۷. فرزاد، ک، "بررسی تجربی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر اعضاء قائم سکوهای دریائی تحت تاثیر جریان و امواج تصادفی" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ایران، ۱۳۷۹.

8. Chakrabarti, S.K., Technical Note: "On the Formulation of JONSWAP spectrum," *Applied Ocean Research*, Vol. 6, No. 3, pp. 175-176, 1984.
9. Chakrabarti, S.K., "Hydrodynamics of Offshore Structures," *Computational Mechanics Publications*, New York, 1987.
10. Barltrop, N.D.P., and Adams, A.J., "Dynamics of Fixed Marine Structures," *Third Edition, The Marine Technology Directorate Limited*, 1991.
11. Dawson, T.H., *Offshore Structural Engineering*, Prentice Hall, Inc, USA, 1983.