Archive of SID

آنالیز هیدرودینامیکی لوله‌های شناور دریایی مهار شده

محمدعلی‌عدل[۱]، محمدجواد کتابداری[۲]
alimasterir2002@yahoo.com

چکیده

در این مقاله ابتدا به معرفی مختصری از جدیدترین سیستم خطوط انتقال نفت و گاز(floating submarine pipeline)پرداخته شده است. با توجه به مزایای فراوان این سیستم انتقال بخصوص سرعت نصب، هزینه پایین اجرا و بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری و نیز شرایط جوی آبهای خلیج فارس این روش برای استفاده در آبهای ایران توصیه می‌گردد. وجود ذخایر بیشمار نفت و گاز در دل دریاها و نیاز به استخراج و انتقال آنها به سواحل باعث جلب توجه خاصی به سیستم خطوط لوله‌های شناور گردیده است. همچنین در این مقاله محاسبات مورد نیاز برای آنالیز هیدرودینامیکی لوله‌های شناور دریایی مهار شده ارائه شده است.هدف از این محاسبات استخراج فرمولهای مورد نیاز برای تعیین حجم بویه‌ای که بتواند در بدترین شرایط دریایی پایداری لوله و ملحقات آن را حفظ نماید می‌باشد.

۱- فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی کشتی سازی دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- استادیار دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

www.SID.ir

Archive of SID

۱-مقدمه

خطـوط لولـه در حـال حاضـر از اقتصـادی‌تریـن روش‌های انتقال سیال در جهان می‌باشند. با وجود بالا بودن سرمایه گـذاری اولـیه و نیاز به تکنولوژی پیشرفته، می‌توان سیال را بطور مداوم و مستقل از شرایط سیاسی- اقتصادی منطقه بـه مـدت طولانـی و هزیـنه پاییـن تعمـیر و نگهـداری انـتقال داد. اسـتفاده از خطـوط لولـه زیـر دریایـی (submarine pipeline) در انـتقال سـیالاتی نظـیر نفت، گاز، آب اقتصادی بودن این سیستم حمل و نقل سیال را محسـوس‌تـر مـی‌سازد. عمده‌ترین استفاده از خطوط لوله زیردریایی برای انتقال نفت و گاز از محل‌های تولید به محل پالایش، ترمینال‌های نفتی می‌باشد که از آن جمله می‌توان موارد ذیل را ذکر نمود:

- انتقال از چاه‌ها به سکوی تولید
- انتقال از سکو به سکوی دیگر (مانند ترمینالهای نفتی دور از ساحل)
- انتقال از سکو به بویه بارگیری تانکرهای نفت
- انتقال از تجهیزات دور از ساحل (مانند سکو) به سواحل
- انتقال از ساحل به ساحل دیگر یا عبور از عرض رودخانه

بـا توجـه بـه امـتداد گسترده خطوط ساحلی در شمال و جنوب کشور و وجود ذخایر بیشمار در مناطق دریایی، توجه خاصی نسبت به این سیستم انتقال سیال (خطوط لوله زیردریایی) شده است.

با پیشرفت و توسعه تکنولوژی، روشهای متنوعی جهت لوله‌گذاری بر روی بستر دریا بوجود آمده که انتخاب هر یک از ایـن روش‌هـا بـه عواملـی چـون طول خط لوله، قطر خط لوله، مسیر خط لوله، هزینه، شرایط محیطی و عوامل دیگر وابسته است. بطور عمده این روش‌ها را به دو قسمت کلی تقسیم می‌گردد:

الف -استفاده از روش‌های کشیدن (Tow) خط لوله

ب -استفاده از شناور های مختلف لوله گذاری

بـا توجـه بـه شرایط خلیج فارس از روش‌های کشیدن خط لوله می‌توان استفاده بهینه کرد. روش‌های کششی عبارتند از:

www.SID.ir

Archive of SID

- **روش نوین لوله‌های شناور توسط سیستم بویه**
- **کشیدن خط لوله در سطح آب**
- **کشیدن خط لوله در عمقی نزدیک سطح آب**
- **کشیدن خط لوله در عمق کنترل شده**
- **کشیدن خط لوله در ارتفاعی نزدیک بستر دریا**
- **کشیدن خط لوله بر روی بستر دریا**

۲-روش نوین لوله‌های شناور توسط سیستم بویه

اجـرای خطـوط لولـه زیـر دریا از پیچیده‌ترین موارد اجرایی در محیط دریایی و اقیانوس است. در منطقه عمیق دریا، لولـه‌هـا معمـولاً در کـف بسـتر دریا خوابانده می‌شود، ولی در منطقه آبهای کم عمق بویژه در منطقه شکست امواج یا Surf Zone بـه علـت انـدر کنش پیچیده امواج و جریانات دریایی و رسوبات بستر که معمولاً همواره در حال نقل و انـتقال اسـت اگـر لولـه‌ها در ناحیه کم عمق کف دریا رها شوند در معرض خطرات و آسیبهای گوناگونی قرار خواهند گرفت. معمولاً تکیه‌گاه لوله‌ها جابجا شده و لوله‌ها تحت اثر تنش خمشی بسیار شدید قرار می‌گیرند. معمولاً زمانی که مایع یا سیال داخل لوله‌ها از نوع مواد خطرناک مانند نفت و گاز باشد، خواباندن لوله در بستر دریا مجاز نیست. لذا در این حالت لوله‌ها باید تحت اثر بویانسی بویه‌ها بصورت شناور در آمده و به طرفین مهار شوند.[۴]

همچنیـن در مـواردی کـه ترمینالهای نفتی و سکوها در فاصله نسبتاً کمی از همدیگر یا در فاصله کمی از ساحل قرار دارنـد در صورتی که در آن نواحی عمق دریا زیاد نباشد و نیز تردد شناور های بزرگ انجام نشود می‌توان از این روش استفاده نمود.

در ایـن روش لوله ها در هنگام عملیات و بهره برداری توسط بویه‌ها شناور خواهند بود و بوسیله مهارهایی به کف دریا متصل می‌شوند. شکل ۱ یک نمونه از این سیستم خطوط انتقال نفت و بویه‌های مربوطه را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱-نمایی از لوله‌های شناور توسط سیستم بویه

نـیروهای اصلی وارد بر لوله به دلیل قرار گرفتن در معرض موج و جریانهای جزر و مدی عبارتنداز نیروی درگ، نیروی اینرسی و لیفت که این نیروها بر حسب ضرایب مربوطه تعریف می‌شوند.

۳- تحلیل هیدرودینامیکی لوله‌های شناور

۳-۱-موارد مهم در طراحی

جهت ایجاد امنیت حداکثر برای لوله‌ها، پارامترهای لوله بایستی با دقت تمام تعیین و انتخاب شوند. در حالت کلی، طراحی خطوط لوله در زیر دریا به تعیین و بررسی دقیق پارامترهای زیر منوط است:

اندازه خط، انتخاب مسیر، تحلیل پایداری هیدرودینامیکی، جنس و نوع بویه، زنجیرهای مناسب، تحلیل جابجایی خاک، اطلاعات جابجایی و آب شستگی، روشهای حفاظت از لوله، تحلیل کمانش لوله و تحلیل بارهای حرارتی وارد به لوله.

پارامـترهای طراحی باید با دقت تعیین شوند بطوریکه لوله بتواند در برابر نیروهای اعمالی در طی نصب و ساخت و در طی عمر کاری خود مقاومت کند.

در ایـن مقالـه هـدف طراحی حجم بویه برای نگهداری لوله شناور می‌باشدچرا که طراحی و انتخاب مناسب بویه یکـی از مـراحل مهم طراحی است که در آن لوله توسط بویانسی مثبت اعمال شده از طرف بویه شناور خواهد بود. لذا بویـه بـاید طـوری طراحی شود که بتواند در شرایط کاری و آب و هوایی مختلف مورد استفاده قرار گیرد و در بدترین

www.SID.ir

Archive of SID

شـرایط نیز بتواند لوله و ملحقات آن را شناور نگاه داشته تا از آسیب‌های احتمالی به لوله نظیر شکستگی لوله و از هم گسیختگی اتصالات آن جلوگیری بعمل آید و ریسک خطرات احتمالی را به حداقل برساند.

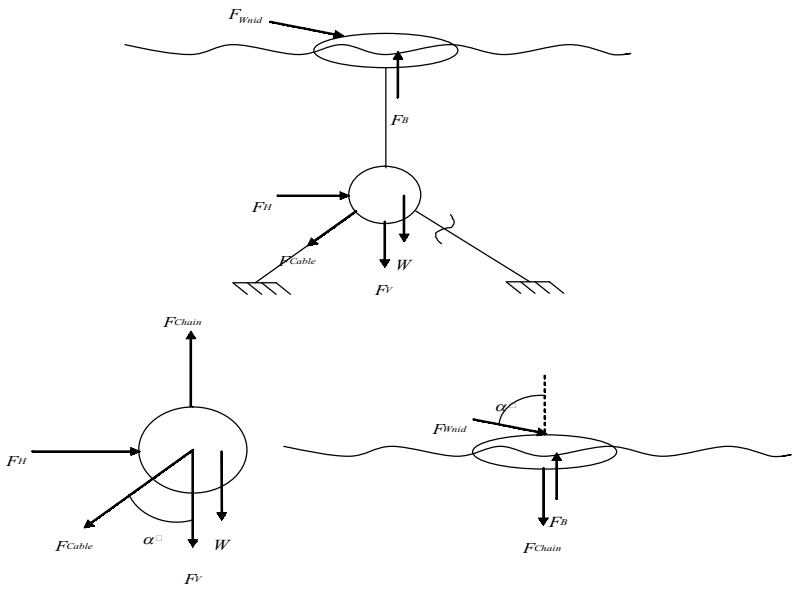
در راسـتای طراحـی حجـم بویـه، بـاید بـه بررسی نیروهای وارده و اثر آنها بر روی لوله و بویه پرداخت و تعادل سیستم را بر اساس نیروهای هیدرودینامیکی وارد به سیستم لوله و بویه برقرار نمود.

۳-۲-نیروهای هیدرودینامیکی

لوله‌های زیر دریا، تحت تأثیر ترکیبی از جریانهای دائمی، جریانهای نوسانی و نیروهای حاصله از امواج قرار دارند. نمـودار جسـم آزاد ایـن نـیروها کـه بر سطح مقطع لوله وارد می‌شوند در شکل(۲) نمایش داده شده است. این نیروها شامل موارد زیر هستند:

وزن لولـه و سـیال داخـل آن، نـیروی درگ، نیروی اینرسی و نیروی لیفت (که به جهت متقارن بودن شکل همدیگر را خنثی می‌کنند.)

بـرای بررسـی تعادل لوله، باید ابتدا نیروهای وارد از موج بر لوله و بویه را بدست بیاوریم. لذا باید بتوانیم بدرستی از تئوری‌های مربوطه در جهت محاسبه نیروی موج بر سیستم استفاده نماییم.



شکل ۲ـ نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر لوله

www.SID.ir

Archive of SID

در ایـن آنالـیز از تـئوری مـوج خطی جهت محاسبات نیروهای هیدرودینامیکی اعمال شده از موج به لوله و بویه استفاده شده است.[۱]

تعادل لوله در دریا تحت اثر نیروهای وارد بر آن در جهات مختلف بررسی گردیده است:

شرط تعادل نیروهای وارد بر لوله را در راستای محور x به شرح زیر است:

$$\xrightarrow{+}\sum F_x = 0 \quad \Rightarrow \quad F_H - F_{Cable}\,.Sin\alpha_1 = 0 \qquad (۱)$$

$$\Rightarrow \quad F_{Cable} = \frac{F_H}{Sin\alpha_1} \qquad (۲)$$

$$F_H = C_M \rho\pi r^2 L\dot{u} + C_D \rho r L|u|u \qquad (۳)$$

کـه در روابـط بالا F_H مجموع نیروی درگ و اینرسی اعمال شده به لوله در راستای افق می‌باشد که از معادلات موریسون استخراج گردیده است[۵] و همچنین داریم:

F_{Cable} : نـیروی وارد شده از طرف کابل مهار کننده به لوله، α_1 : زاویه بین کابل مهار و راستای قائم، L : طول قطعه لوله، ρ : جرم حجمی آب، C_M : ضریب اینرسی، C_D : ضریب درگ و r : شعاع لوله

حال شرط تعادل در راستای y را برای نیروهای اعمال شده به لوله بررسی می‌نماییم:

$$+\uparrow\sum F_y = 0 \quad \Rightarrow \quad F_{Chain} - F_V - F_{Cable}\,.Cos\,\alpha_1 - W_{Total} = 0 \qquad (۴)$$

$$F_V = C_M \rho\pi r^2 L\dot{v} + C_D \rho r L|v|v \qquad (۵)$$

$$W_{Total} = W_{Steel\ Pipe} + W_{Crude\ Oil} \qquad (۶)$$

$$W_{C.O} = \gamma_{C.O.}\,.\pi\, r^2{}_i\, L \qquad (۷)$$

و برای $W_{Steel\ Pipe}$ در مورد یک لوله به قطر D و طول L و ضخامت جداره d داریم:

$L = 12\,m$
$D = 32\,in = 0.813\ m$
$d = 20.6\,mm$
$W_{Steel} = 4833\,kg$
$W_{anti\ corrosion} = 261\,kg$
$W = 14300\,kg$ (وزن لوله + $90\,mm$ پوشش بتن)

F_{Chain} : نیروی وارد شده از طرف زنجیر متصل شده از بویه به لوله
F_V : نیروی درگ و اینرسی ناشی از موج به لوله در جهت قائم (بدست آمده از معادلات موریسون)
W_{Total} : وزن لوله + وزن سیال داخل لوله (در حالت کاملاً پر)
r_i : شعاع داخلی لوله
$\gamma_{C.O}$: وزن مخصوص نفت خام

www.SID.ir

Archive of SID

از تعادل نیرو بین سیستم لوله و بویه روابط زیر نتیجه می‌شود:

$$F_{Chain} = F_V + F_{Cable}.Cos\alpha_1 + W_{Total} \qquad (۸)$$

از رابطه تعادل بویه در راستای y نتیجه می‌شود:

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \quad \Rightarrow \quad F_B - F_{Wind}.Cos\alpha_2 - F_{Chain} = 0 \qquad (۹)$$

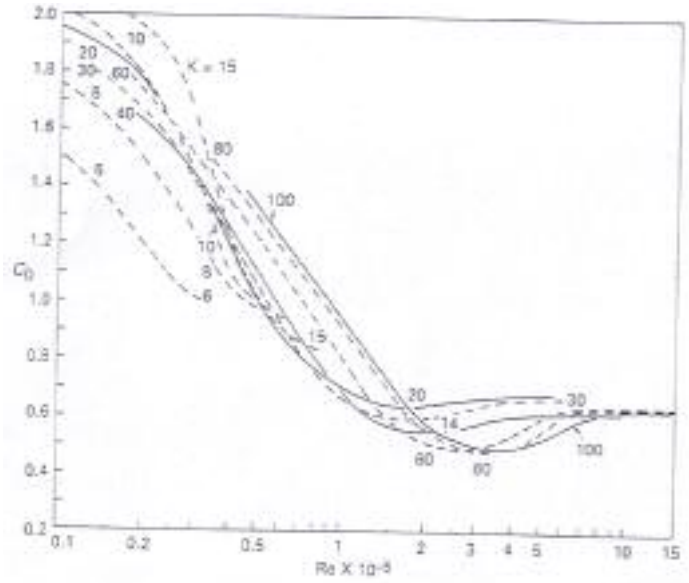
$$F_B = \gamma_{Water}.V_B = \rho_{Water}.g.V_B \qquad (۱۰)$$

$$F_{Wind} = \frac{1}{2}\rho_{air}.C_{D'}.U'_W.A_B \qquad (۱۱)$$

که در آن:

F_B : نـیروی ناشـی از بویانسی، F_{Wind} : نیروی حاصل از باد، α_2 : زاویه بین وزش باد و راستای قائم بر سطح دریـا، ρ_{Water} : جـرم حجمـی آب دریـا، ρ_{air} : جـرم حجمی هوا، V_B : حجم بویه، A_B : سطح تصویر شده بویه، U_W : سرعت باد، $C_{D'}$: ضریب درگ بویه

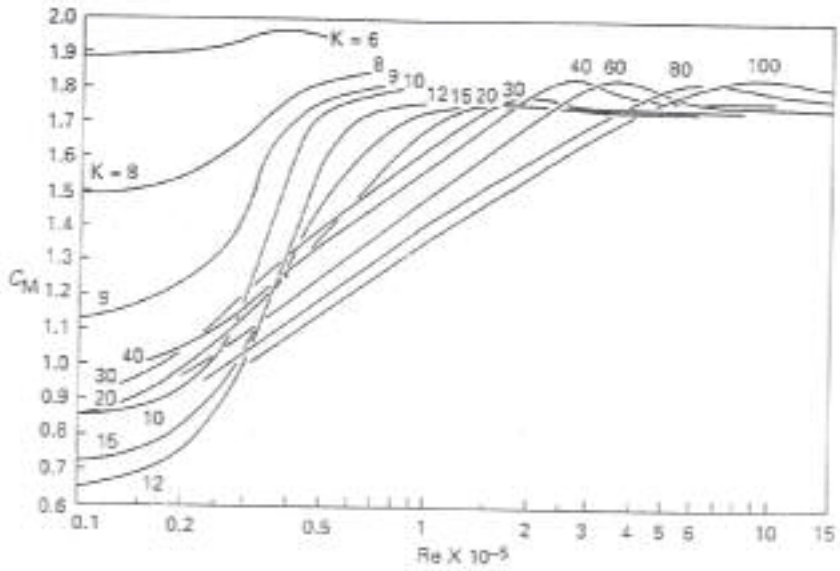
بـرای محاسبه ضرایب درگ C_D و C_M در روابط موریسون از نمودارهای اشکال (۳) و (۴) استفاده می‌نماییم[۲]. در این جداول برای بدست آوردن ضرایب درگ و اینرسی نیاز به محاسبه عدد رینولدز R_e می‌باشد. برای بدست آوردن عـدد ریـنولدز بحرانـی‌ترین شرایط محیطی را در نظر می‌گیریم تا بویه‌ای که طراحی می‌شود بتواند در بدترین شـرایط محیطی به وظیفه خود عمل کند. در چنین شرایطی ماکزیمم سرعت موثر U_e را در بحرانی‌ترین وضعیت در نظر می‌گیریم.



شکل ۳-ضریب C_D در اعداد رینولدز مختلف

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴- ضریب C_M در اعداد رینولدز مختلف

سـرعت U_e برای پیچیده‌ترین حالت یعنی زمانی که جریان جزر و مد، long shore و جریان ناشی از موج هم جهت باشد، عبارت است از:

$$U_e = U' + U_{(Z)} + U_{W'} \qquad (۱۲)$$

که در آن:

$U_{W'}$: سرعت ناشی از موج

U' : سرعت مؤثر long shore

$U_{(Z)}$: سرعت مؤثر Tidal Current

که U' و $U_{(Z)}$ عبارتند از [۳] :

$$U' = \frac{5\pi\sqrt{g}}{8\sqrt{2}} . \frac{\sin\phi}{C_0} . \frac{C}{\sqrt{f_W}} . \gamma . h . m \qquad (۱۳)$$

سرعت مؤثر Tidal Current عبارت خواهد بود:

$$U_{(Z)} = \frac{U_*}{K} . \ln(\frac{Z}{Z_0}) \qquad (۱۴)$$

$$U_* = \sqrt{\frac{\bar{\tau}}{\rho}} \qquad (۱۵)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\rho . g}{\sqrt{2}\pi . C} . \gamma\sqrt{h} . \sqrt{f_W} . U' \qquad \text{تنش برشی} \qquad (۱۶)$$

$$U_{(Z)} = \frac{\sqrt{\frac{g}{\sqrt{2}\pi . C} . \gamma\sqrt{h} . \sqrt{f_W} . U'}}{K} . \ln(\frac{Z}{Z_0}) \qquad (۱۷)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$U_{W'} = \frac{H}{2} \times \frac{g.T}{\lambda} \times \frac{\cosh\left[\frac{2\pi}{\lambda}(y+d)\right]}{\sinh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \times \left(-\sin\left[\frac{2\pi t}{\lambda}\right]\right) \qquad (۱۸)$$

برای محاسبه نیروی اصطکاک f_W در فرمولهای (۱۶) و (۱۷) داریم:

$$C = 18\log\frac{12h}{D_{n50}+D_{n90}} \qquad (۱۹)$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (۲۰)$$

$$\gamma = \frac{H}{d} \qquad (۲۱)$$

(۲۲)

$$f_W = \exp\left[-5.977 \times 5.123\left(\frac{a_b}{r_s}\right)\right]^{-0.194} \Rightarrow f_W = \exp\left[-5.977 \times 5.123\left(\frac{\frac{H}{2}.\frac{1}{\sinh(Kd)}}{r_s}\right)\right]^{-0.194}$$

$$\begin{cases} a_b = \frac{H}{2}.\frac{1}{\sinh(Kd)} \\ C_0 = \frac{L_0}{T} \\ L_0 = \frac{g.T^2}{2\pi} \end{cases} \qquad (۲۳)$$

f_W : نیروی اصطکاک، ϕ : زاویه بین موج و محور لوله، m : شیب بستر، H : ارتفاع موج، r_s : شعاع متوسط ذرات خاک که کروی فرض می‌شوند، Z_0 : فاصله کف دریا تا لوله، C : ضریب زبری کف در ساحل، τ : تنش برشی، K : عدد موج، γ : عدد شکست موج، d , Z : عمق دریا

با جایگذاری روابط (۱۳) و (۱۷) و (۱۸) در رابطه (۱۲) داریم:

$$U_e = \left[\frac{\sqrt{\frac{g}{\sqrt{2}\pi.C}.\gamma\sqrt{h}.\sqrt{f_W}.U'}}{K}.\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) + \frac{5\pi\sqrt{g}}{8\sqrt{2}}.\frac{\sin\phi}{C_0}.\frac{C}{\sqrt{f_W}}.\gamma.h.m\right] + U_{W'} \qquad (۲۴)$$

سپس با توجه به U_e بدست آمده می‌توانیم از آن جهت تعیین مقدار عدد رینولدز استفاده نموده و مقادیر مورد نیاز برای C_M و C_D را از جداول بدست آوریم.

www.SID.ir

Archive of SID

از رابطه (۹) داریم:

$$F_B = F_{Wind}.Cos\,\alpha_2 + F_{Chain} = \gamma.V_B \quad (۲۵)$$

$$V_B = \frac{4}{3}\pi r^3{}_B \quad (۲۶)$$

$$\gamma_{Water}\,4/3\pi\, r_B{}^3 = 1/2\rho_{air}.C_{D'}.U_{Wind}{}^2.\pi.r_B{}^2.Cos\,\alpha_2 + \left(C_M\rho\pi r^2 L\dot{v} + C_D\rho rL|v|v\right) \quad (۲۷)$$

$$+\left(C_M\rho\pi r^2 L\dot{u} + C_D\rho rL|u|u\right).\cot g\,\alpha_1 + \left(W_{Steel\,Pipe} + \gamma_{C.O}.\pi\, r_i{}^2.L\right)$$

سپس با حل معادله درجه سوم بالا بر حسب r_B ، مقدار شعاع بویه را به دست می آوریم و با

داشتن شعاع بویه از رابطه:

$$V_B = \frac{4}{3}\pi r^3{}_B$$

حجم مورد نیاز بویه بدست خواهد آمد.

نتیجه‌گیری

با توجه به شرایط جوی آبهای ایران که عموماً میانگین ارتفاع موجها زیاد نمی‌باشد وآب با عمق کم و متوسط می‌باشد، در مناطقی که تردد شناورهای بزرگ انجام نمی‌شود و فاصله سکوها به ترمینالهای نفتی یا به ساحل کم می‌باشد با توجه به مزایای روش نصب لوله‌های شناور توسط بویه، این روش توصیه می‌شود.

در محاسبه حجم بویه نیز باید دقت فراوان شود تا بتواند در بدترین شرایط لوله و ملحقات آن را شناور نگاه داشته، چرا که لوله در مدت زمان عمر کاری خود توسط بویانسی مثبت اعمال شده از طرف بویه شناور خواهد بود. از جمله مواردی که در طراحی بویه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است محاسبه دقیق جریانهای دریایی و نیروهای اعمال شده از طرف امواج می‌باشد. در صورتی که جریانهای دریایی به دقت بررسی شوند می‌توانیم پارامترهای جریان را به درستی محاسبه نموده و ضرایب مناسب را استخراج نماییم تا بر اساس این ضرایب تخمین مناسبی از نیروهای محیطی بر سیستم داشته باشیم.

www.SID.ir

Archive of SID

فهرست مراجع

1.Dean,R.,G.,Dalrymple, R.A.,1992: Water Wave Mechanics for Engineerings and Scientists , world scientific, second edition , London.

2.Chakrabarti, 1994, Hydrodynamic of Offshore Structure, Computational Mechanics.

3.U.S. Army Coastal Eng. Research Center, 1984, Shore Protection Manual

4.DNV , 1996 , Rules for Submarine Pipeline System.

5.Herbich John, 1981, Offshore Pipeline Design Elements, Marcel Dekker, INC.

www.SID.ir