



بررسی ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه در رایزرهای دریایی

مهدی بهزاد^۱، محمدسعید سیف^۲، سیامک کاظم زاده حنانی^۳، حمید سلماسی^۴، عباس روحانی بسطامی^۵
دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مکانیک، ایران، تهران، خیابان آزادی، کدپستی ۹۵۶۷-۱۱۳۶۵
پست الکترونیکی: m_behzad@sharif.edu

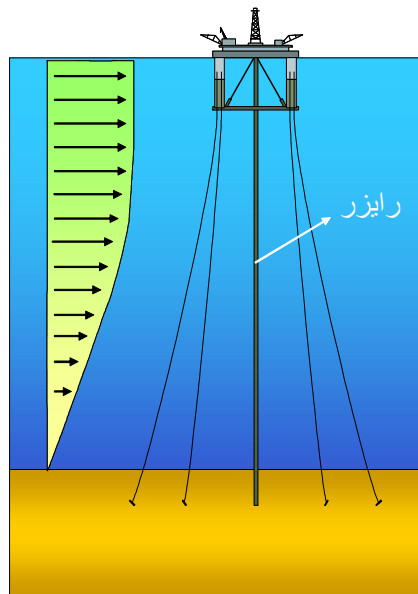
چکیده

در این مقاله ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه در رایزرهای دریایی بررسی شده است. یکی از مهمترین عوامل ایجاد ارتعاشات رایزرها، پیدایش گردابه است که می تواند موجب خستگی سازه ای در رایزرها گردد. تطابق فرکانس پیدایش گردابه با فرکانس های طبیعی رایزر می تواند موجب تشدید و افزایش دامنه ارتعاشات و در نهایت خستگی گردد. نحوه تعیین فرکانس های طبیعی و شکل مودهای رایزر و همچنین مقدار دامنه ارتعاشات در مقاله ارائه شده است و مقادیر آن برای یک نمونه رایزر محاسبه گردیده است. در ادامه برخی از روش های عملی متداول جهت جلوگیری و یا کاهش ارتعاشات رایزر نیز بررسی شده است.

کلمات کلیدی: رایزر، ارتعاشات، پیدایش گردابه، قفل شدگی

۱- مقدمه

رایزرها لوله هایی هستند که در صنایع فراساحلی جهت انتقال مایعات، نفت و گاز از بستر دریا به سکو و یا بالعکس بکار می روند. شکل (۱) نشان دهنده یک رایزر می باشد. رایزرها اساساً بصورت سازه هایی نازک و انعطاف پذیر ساخته می شوند تا اینکه بتوانند در برابر نیروهای هیدرودینامیکی و همچنین حرکات سکو مقاومت نمایند. طول رایزرهای دریایی گاهی تا ۲۰۰ متر نیز می رسد و نسبت طول به قطر آنها بسیار زیاد می باشد [۱ و ۲]. در سال های اخیر، بهره برداری از میادین نفتی دریاچه خزر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. باتوجه به عمق نسبتاً زیاد دریاچه خزر و لزوم بکارگیری رایزرهایی طویل، مسئله ارتعاشات در این رایزرها از جمله پارامترهای مهمی است که باید مدنظر قرار گیرد و در طراحی و نگهداری آنها در نظر گرفته شود.



شکل ۱- یک نمونه رایزر دریایی

نیروهای اصلی وارد بر رایزرها عبارتند از:

- ۱- نیروی ناشی از امواج
- ۲- تغییر مکان و جابجایی سکو بر اثر موج، باد و جریان های دریایی
- ۳- نیروی ناشی از جریان
- ۴- نیروی ناشی از پیدایش گردابه

در میان عوامل فوق، نیروهای ناشی از پیدایش گردابه در شکل گیری ارتعاشات دارای اهمیت بیشتری می باشد. نیروهای ایجادشده می توانند سبب ایجاد ارتعاشات رایزرها گردیده و پس از مدتی موجب ایجاد خستگی گردند. تحقیقات گسترده ای در زمینه ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه در رایزرها توسط محققین مختلف صورت گرفته است. Ferrari با ارائه یک مدل سه بعدی از رایزر، پاسخ رایزر به ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه را پیش بینی نمود [۳]. مدل ارائه شده شامل بررسی اثرات متقابل سازه و جریان و اثر کوپل شدگی میان حرکت رایزر و پروفیل جریان بود. در نهایت با محاسبه نیروی هیدرودینامیکی ناشی از پیدایش گردابه ارتعاشات رایزر بررسی شده است. در مدل دیگری که توسط Yamamoto بررسی شده است، حل عددی ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه برای رایزر صورت گرفته است [۴]. بدین ترتیب که ابتدا ماتریس های سختی و جرم محاسبه شده است و با در نظر گرفتن نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر رایزر، معادلات استاتیکی رایزر برای تعیین حالت تعادل رایزر حل شده است. سپس با در نظر گرفتن تحریک ناشی از پیدایش گردابه، پاسخ دینامیکی رایزر تعیین شده است که بصورت ارتعاشات حول حالت تعادل آن می باشد. تحقیقات Le Curff شامل بررسی عددی و همچنین آزمایشگاهی ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه رایزرها می باشد که در آن با استفاده از روش های حل مودال و حل جریان، ارتعاشات رایزر بصورت تئوریک بررسی شده است و با ارائه یک مدل آزمایشگاهی به تحلیل نتایج بدست آمده، پرداخته شده است [۵]. دیگر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بیشتر شامل حل CFD برای بررسی رفتار جریان [۶]، استفاده از حل مودال سازه جهت پیش بینی وقوع رزونانس [۷و۸] و همچنین حل معادلات سیستم با استفاده از روش اجزای



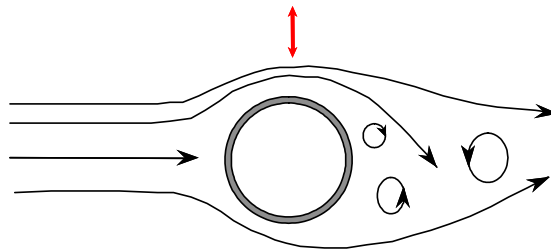
محدود می باشد [۹]. در ادامه این مقاله مکانیزم پیدایش گردابه و ارتعاشات رایزرها و نحوه جلوگیری از آن بررسی شده است.

۲- مکانیزم پیدایش گردابه

هنگامی که جریان به یک جسم **Bluff** برخورد می کند، فشار ناشی از جریان، در محل برخورد برابر با فشار سکون می گردد. در ادامه با عبور جریان از اطراف جسم، یک لایه مرزی در اطراف جسم شکل می گیرد و سپس با توجه به عدد رینولدز جریان، جدایش لایه های برشی از جسم رخ می دهد. سرعت قسمتی از لایه برشی که در تماس با جسم است، کمتر از سرعت لایه برشی در تماس با جریان است. این امر موجب می شود که دو لایه برشی با یکدیگر ادغام گردند و ورتکس هایی مجزا تشکیل گردد [۱۰].

ورتکس های تشکیل شده سبب اعمال نیرو بر جسم می گردند که می تواند باعث ارتعاش جسم شود (شکل ۲). فرکانس نیروی اعمالی بر جسم در جهت عمود بر جریان برابر با فرکانس تشکیل گردابه ها، f_s ، و در جهت جریان برابر با $2f_s$ است. همچنین تحقیقات صورت گرفته نشان دهنده آن است که نیروی وارده در جهت عمود بر جریان، بیشتر از نیروی اعمالی در جهت جریان است. به همین دلیل ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه در جهت عمود بر جریان، خطرناکتر از ارتعاشات جسم در جهت جریان است.

ارتعاشات در جهت عمود بر جریان



شکل ۲- ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه

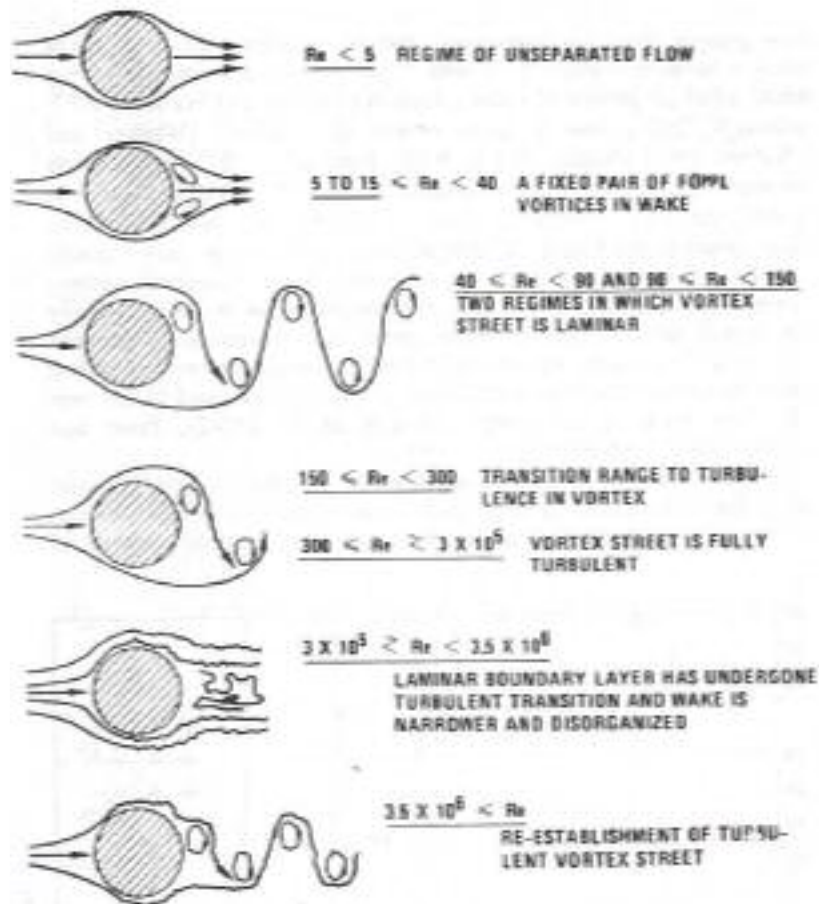
یکی از پارامترهای موثر در شکل گیری ورتکس ها، عدد رینولدز می باشد. با تغییر عدد رینولدز، نحوه جدایش لایه های برشی از جسم و در نتیجه شکل گیری گردابه ها متفاوت خواهد بود. چگونگی پیدایش گردابه ها به ازای مقادیر مختلف رینولدز در شکل (۳) نشان داده شده است.

پارامتر مهم دیگری که در ارتعاشات ناشی از گردابه مطرح است، عدد بی بعد استروهل می باشد که ارتباط میان فرکانس شکل گیری گردابه ها و سرعت جریان را بصورت ذیل بیان می کند.

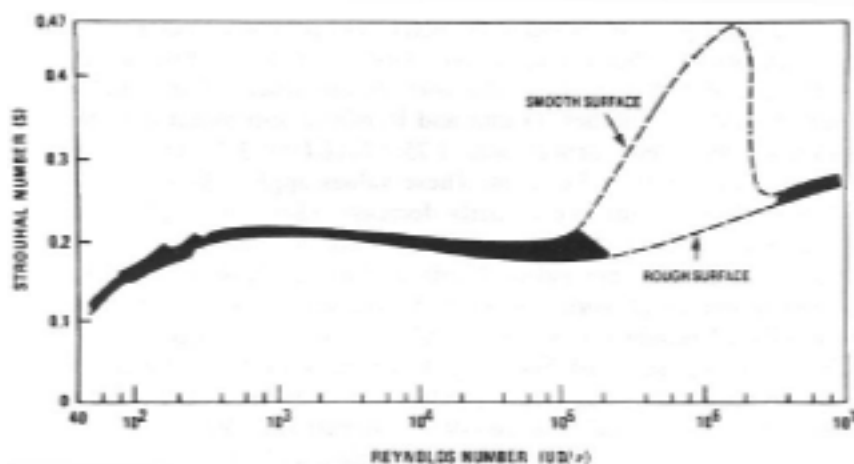
$$Sh = \frac{f_s D}{U}$$

۱

مطالعات انجام شده در این زمینه نشان دهنده وابستگی عدد استروهل و عدد رینولدز جریان است. شکل (۴) رابطه عدد استروهل و رینولدز جریان را در یک استوانه نشان می دهد. همچنین زبری سطح نیز می تواند بر عدد استروهل تأثیر گذارد. در کاربردهای مهندسی عدد استروهل در بازه وسیعی از عدد رینولدز، برابر با 0.2 فرض می گردد.



شکل ۳- نحوه شکل گیری گردابه با توجه به عدد رینولدز



شکل ۴- رابطه عدد رینولدز و عدد استروهل

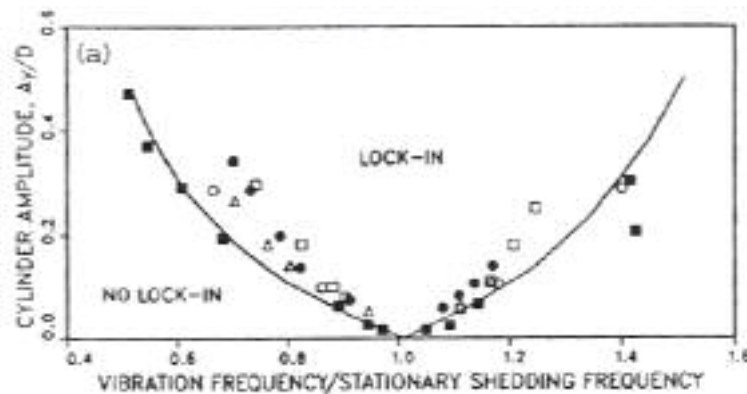
البته باید توجه داشت که شکل گیری گردابه ها همواره با یک فرکانس خاص صورت نمی گیرد. با افزایش عدد رینولدز از یک مقدار معین، شکل گیری گردابه ها با فرکانس های مختلفی صورت می گیرد. در این حالت ارتعاشات ایجاد شده، دارای باند فرکانسی گسترده خواهد بود و منحصر به یک بازه محدود فرکانسی نمی باشد.



حرکت جسم نیز تأثیر زیادی بر شکل گیری گردابه ها دارد. ارتعاشات جسم باعث می گردد که فرکانس شکل گیری گردابه ها در محدوده فرکانس ارتعاش جسم قرار گیرد، این حالت شکل خطرناکی از ارتعاش جسم را ایجاد می کند که اصطلاحاً قفل شدگی (Lock-in) نامیده می شود [۱۲].

در حالت قفل شدگی با عبور فرکانس ارتعاش جسم از f_s (فرکانس پیدایش گردابه ها در حالت سکون جسم)، یک اختلاف فاز 180° بین حرکت جسم و شکل گیری گردابه ها، رخ می دهد. زیرا هنگامی که فرکانس ارتعاش جسم کمتر از f_s می باشد، با حرکت جسم به یک سمت، گردابه ها از سمت مخالف شکل می گیرند و درحالتی که فرکانس ارتعاش بیشتر از f_s است، روند فوق معکوس گشته و با حرکت جسم به یک سمت، گردابه ها از همان سمت تشکیل می شوند. این امر سبب اعمال یک نیروی متغیر می گردد که می تواند باعث ایجاد ارتعاش و خستگی در جسم گردد.

ایجاد پدیده Lock-in علاوه بر فرکانس ارتعاشات جسم، به دامنه ارتعاشات جسم نیز وابسته است. شکل (۲) ناحیه قفل شدگی را مشخص می کند که از دو پارامتر دامنه و فرکانس ارتعاشات جسم تأثیر می پذیرد. با توجه به این شکل، با افزایش دامنه ارتعاش جسم، احتمال وقوع قفل شدگی نیز افزایش می یابد و قفل شدگی در بازه فرکانسی وسیعتری رخ می دهد.



شکل ۵- ناحیه قفل شدگی و رابطه آن با دامنه و فرکانس ارتعاشات جسم

درحالتی که فرکانس شکل گیری گردابه ها برابر با فرکانس طبیعی جسم، f_n ، می شود، رابطه ذیل برقرار می باشد:

$$f_n \cong f_s = \frac{Sh U}{D} \quad 2 \quad \square$$

با فرض $Sh \cong 0.2$ ، رابطه میان سرعت و فرکانس پیدایش گردابه ها بصورت ذیل خواهد بود:

$$\frac{U}{f_n D} \cong \frac{U}{f_s D} \cong 5 \quad 3 \quad \square$$



۳- تعیین فرکانس های طبیعی رایزر

یکی از پارامترهایی که باید جهت بررسی ارتعاشات رایزر مد نظر قرار گیرد، فرکانس های طبیعی رایزر می باشد. روش های مختلفی برای تعیین فرکانس های طبیعی مورد استفاده محققین قرار گرفته است که شامل مدل های اجزاء محدود و همچنین تحلیلی می باشد. در حالتی که رایزر بصورت کاملاً کشیده شده در نظر گرفته شود، می توان فرکانس های طبیعی رایزر را بصورت زیر تعیین نمود [۱۱]:

$$f_i = \frac{i}{2L} \left(\frac{T}{m} \right)^{1/2} \text{ Hz}, i = 1, 2, 3, \dots \quad 4 \quad \checkmark$$

که در رابطه فوق T تنش میانگین و L طول دهانه رایزر و m شامل جرم رایزر بعلاوه جرم افزوده است که بصورت زیر تعریف می گردد:

$$m = m_r + m_d \quad 5 \quad \checkmark$$

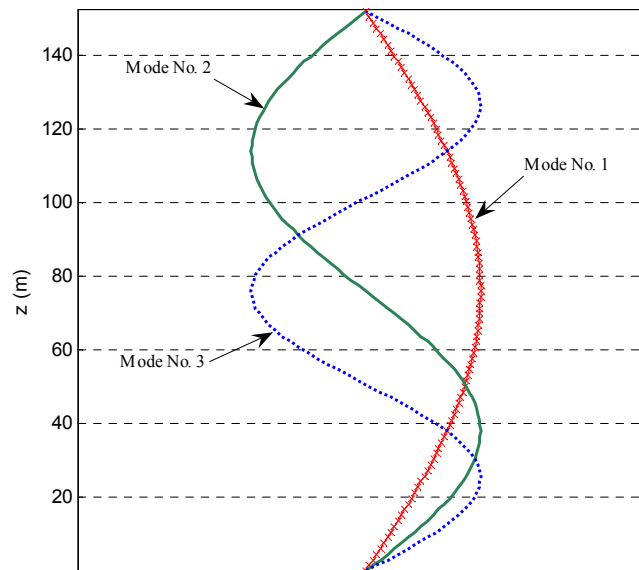
جرم افزوده برای رایزر را می توان بصورت زیر محاسبه نمود [۱۳]:

$$m_d = \frac{1}{4} \rho_w \pi d^2 \quad 6 \quad \checkmark$$

هرچند رابطه (۴) یک رابطه تقریبی می باشد. ولی تحقیقات صورت گرفته نشان می دهد که پاسخ های بدست آمده دارای دقت مناسبی می باشند. بطور مثال با در نظر گرفتن مشخصات یک رایزر مطابق جدول (۱) میتوان را از رابطه (۴) محاسبه نمود. فرکانس های طبیعی این رایزر عبارت از ۰،۱۲، ۰،۲۴ و ۰،۳۵ هرتز می باشند. شکل (۳) نشان دهنده مدهای ارتعاشی مختلف رایزر است.

جدول ۱- مشخصات یک نمونه رایزر

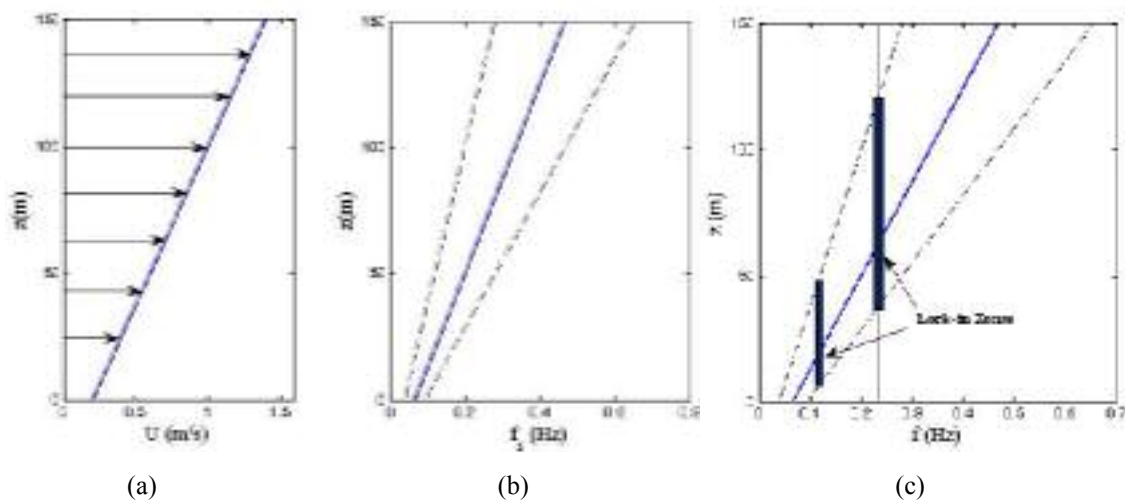
$\rho_w (kg/m^3)$	$\rho_s (kg/m^3)$	$T (kgf)$	$L (m)$	$d (m)$
۱۰۲۵	۸۰۰۰	1.7×10^6	۱۵۲	۰،۶



شکل ۶- شکل مودهای طبیعی رایزر

۴- بررسی ناحیه رزونانس

پس از تعیین فرکانس های طبیعی رایزر، می بایست فرکانس تشکیل گردابه تعیین گردد. در صورتی که سرعت جریان با عمق تغییر نکند، فرکانس گردابه در طول رایزر تقریباً ثابت می ماند. ولی معمولاً سرعت جریان تابعی از عمق جریان است در این حالت فرکانس تشکیل گردابه نیز تابعی از عمق جریان خواهد بود [۱۴]. بطور مثال در صورتی که پروفیل سرعت جریان بصورت نمودار شکل (۴-ا) باشد. در آن صورت رابطه فرکانس تشکیل گردابه با عمق جریان مطابق نمودار شکل (۴-ب) می باشد. حال در نظر گرفتن فرکانس های طبیعی بدست آمده مطابق جدول (۲) می توان ناحیه قفل شدگی را تعیین نمود. برای تعیین ناحیه قفل شدگی از برنامه ای که در محیط نرم افزار Matlab کدنویسی شده است، استفاده گردیده است. شکل (۴-ج) ناحیه قفل شدگی را نشان می دهد که در عمق بین ۵ تا ۴۸ متر مدتی اول و در عمق ۳۰ تا ۱۲۶ متر مدتی دوم رایزر تحریک می گردد و دامنه ارتعاشات رایزر افزایش می یابد.





شکل ۷- (a) نمودار تغییرات سرعت بر حسب عمق، (b) فرکانس شکل گیری گردابه، (c) نواحی قفل شدگی رایزر

۵- روش های جلوگیری از ارتعاشات رایزرها

برای جلوگیری کاهش ارتعاشات در رایزرها می توان از روش های ذیل استفاده نمود [۱۵]:

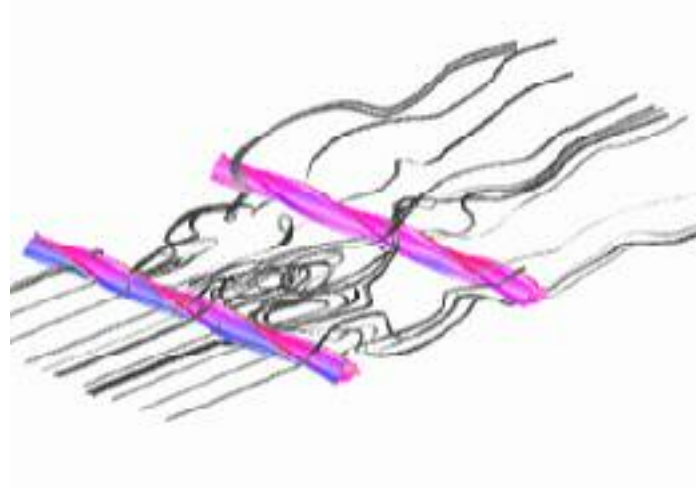
- ۱- افزایش ضریب میرایی رایزر: با افزایش دمپینگ رایزر می توان تا حد زیادی دامنه ارتعاشات رایزر را با توجه به رابطه (۸) را کاهش داد. در صورتیکه $\delta_r > 64$ باشد. پیک ارتعاشات رایزر از ۱٪ قطر رایزر کمتر خواهد بود. این مقدار خیز ایجاد شده نمی تواند سبب آسیب جدی در رایزر گردد. افزایش ضریب میرایی می تواند با استفاده از مواد لاستیکی و ویسکوالاستیک در ساختار رایزر صورت گیرد.
- ۲- جلوگیری از وقوع رزونانس: تا حد امکان طراحی رایزر باید به گونه ای باشد که فرکانس های طبیعی آن در محدوده ناحیه قفل شدگی قرار نگیرد. این کار می تواند با تغییر سختی رایزر صورت گیرد.
- ۳- روش مناسب دیگر که در سال های اخیر کاربرد وسیعی یافته است استفاده از fairing در اطراف رایزر است. شکل (۷) نمونه ای از fairing را نشان میدهد. زاویه fairing ها نباید از ۸ تا ۱۰ درجه تجاوز کند. طول هر fairing از دماغه تا دم بین ۳D تا ۶D متغیر است. در صورتی که جهت جریان به رایزر ثابت باشد، می توان از نوع fairing ثابت استفاده نمود ولی در حالتی که جهت برخورد جریان به رایزر تغییر می کند می بایست از نوع لولایی آن استفاده می گردد.



شکل ۸- استفاده از Failing جهت کاهش ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه

۴- استفاده از تیغه حلزونی (helical strake)

helical strake سبب می گردد که شکل گیری گردابه ها با فرکانس خاصی شکل نگیرد و کاملاً بصورت آشفته صورت گیرد. یک نمونه از helical strake ها در شکل (۸) نشان داده شده است. ضخامت تیغه معمولاً در حدود ۰،۱D می باشد همچنین تعداد تیغه ها در هر مقطع ۳ و گام هر کدام بین ۳،۶D تا ۵D متغیر است [۱۶].



شکل ۹- استفاده از تیغه حلزونی جهت کاهش ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه

۶- جمع بندی

در این مقاله ارتعاشات رایزرها و نحوه جلوگیری از ارتعاشات رایزرها بررسی گردید. ابتدا مکانیزم ایجاد ارتعاشات ناشی از پیدایش گردابه در رایزرها بررسی شد. سپس روابط لازم جهت تعیین فرکانس های طبیعی، شکل موده های رایزر، دامنه ارتعاشات رایزر و همچنین اثر موج در ارتعاشات رایزرها ارائه شد. در ادامه روش های عملی متداول جهت جلوگیری و یا کاهش ارتعاشات رایزر نیز بررسی گردید.

۷- مراجع

- ۱- Richard H.J. Willden, J. Michael R. Graham, Multi-modal Vortex-Induced Vibrations of a vertical riser pipe subject to a uniform current profile, European Journal of Mechanics B/Fluids ۲۳ (۲۰۰۴) ۲۰۹-۲۱۸.
- ۲- Howells H., Deep Water Drilling Riser Technology, VIV & Fatigue Management, Drilling Engineering Association (Europe), ۴th Quarter Meeting, Paris ۱۹۹۸.
- ۳- Ferrari A., Bearman W., A three Dimensional model for wav and Vortex-Induced Vibrations of deepwater Riser pipes, Proceedings of the ۷th



- international conference on flow-induced vibration-FIV ۲۰۰۰, Switzerland pp ۳-۱۰.
- ۴- Yamamoto C.T., Meneghinib J.R, Saltarab F., Fregonesib R.A., Ferrari J.A., Numerical simulations of vortex-induced vibration on flexible cylinders, Journal of Fluids and Structures, *In Press*.
- ۵- C. Le Cunff\, F. Biolley, E. Fontaine, S. Etienne and M.L. Facchinetti, Vortex-Induced Vibrations of Risers: Theoretical, Numerical and Experimental Investigation, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. ۵۷ (۲۰۰۲), No. ۱, pp. ۵۹-۶۹.
- ۶- C.P. Sparks, Transverse Modal Vibrations of Vertical Tensioned Risers, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. ۵۷ (۲۰۰۲), No. ۱, pp. ۷۱-۸۶.
- ۷- Halse, K.H. and Larsen, C.M. "Prediction of Vortex-Induced Vibrations of a Free-Spanning Pipeline by Direct Numerical Simulation of the Flow Field", OMAE, Lisboa ۱۹۹۸.
- ۸- R. Govardhan, C. H. K. Williamson, Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder, J. Fluid Mech. (۲۰۰۰), vol. ۴۲۰, pp. ۸۵-۱۳۰.
- ۹- Vadim S. Tikhonov A, Alexander I. Safronov B, Effect of Fluid Column Dynamics on Longitudinal Vibrations of an Ultra Deepwater Riser Covered by an Orifice Plug, Ocean Engineering ۲۹ (۲۰۰۲) ۹۹-۱۱۲.
- ۱۰- Naudascher, E., Rockwell, D., ۱۹۹۴, Flow-Induced Vibrations: An Engineering Guide, Blakema, Rotterdam.
- ۱۱- Blevins, R. D, "Flow Induced Vibration", ۱۹۹۰, Van Nostrand Reinhold.
- ۱۲- Matteo Luca Facchinetti And Emmanuel De Langre, Francis Biolley, Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations, Submitted to the Journal of Fluids and Structures, Aug. ۲۰۰۳.
- ۱۳- Vikestad, K., Larsen, C.M. and Vandiver, J.K.: "Added mass and oscillation frequency for a circular cylinder subjected to vortex induced vibrations and external disturbance", International conference on Hydroelasticity in marine technology, Fukuoka, Japan Dec. ۱۹۹۸
- ۱۴- G. K. Furnes, On Marine Riser Responses In Time- And Depth-Dependent Flows, Journal of Fluids and Structures (۲۰۰۰) ۱۴, ۲۵۷-۲۷۳
- ۱۵- C. Homescu , I. M. Navon; and Z. Li, Suppression of vortex shedding for flow around a circular cylinder using optimal control, International Journal For Numerical Methods In Fluids ۲۰۰۲; ۳۸:۴۳-۶۹.



۱۶- F. S. Hover, H. Tvedt, M. S. Triantafyllou, Vortex-induced vibrations of a cylinder with tripping wires, J. Fluid Mech. (۲۰۰۱), vol. ۴۴۸, pp. ۱۷۵-۱۹۵.