مقاله

اهمیت پدیدهٔ ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه در طراحی رایزرهای دریایی

انوشیروان فرشیدیان‌فر*
استاد دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه فردوسی مشهد
farshid@ferdowsi.um.ac.ir

سیدمهدی مظلوم مقدم
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه فردوسی مشهد
mah.mazloom.mo@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۲۰

چکیده

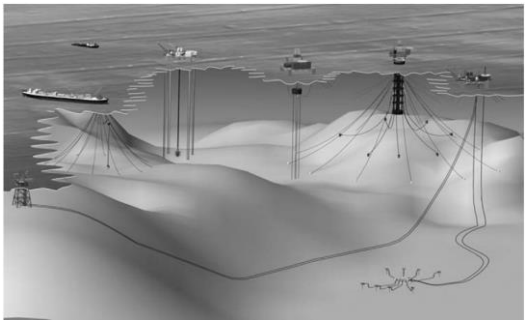
امروزه با افزایش میزان تقاضا در بازار محصولات نفت و گاز و اکتشافات جدید فراساحلی، صنایع فراساحلی به‌سمت آب‌های عمیق[۱] و فوق‌عمیق[۲] رفته‌اند. این مسئله منجر به بروز چالش‌های بسیاری در عرصهٔ تحلیل و طراحی سکوها و رایزرهای دریایی شده است. از جملهٔ این مشکلات، ویژگی خستگی رایزرهای باریک و بلند در این آب‌ها، به‌سبب ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه[۳] می‌باشد. ارتعاش فرکانس بالای لولهٔ رایزر به‌دلیل جدایش گردابه منجر به ایجاد تنش‌های متناوب شدیدی می‌شود که می‌تواند به نرخ بالای تخریب ناشی از خستگی بیانجامد. تغییرات زیاد سرعت جریان در طول ستون آب، بلند و باریک‌بودن رایزر و تغییر هندسهٔ رایزرهای آب‌های عمیق در طول بازه سبب پیچیدگی بیشتر تحلیل ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه می‌شود. در این مقاله، نخست رایزرهای دریایی معرفی می‌شوند، سپس مراحل اصلی طراحی رایزرها تشریح می‌گردد. پس از آن مقدمه‌ای دربارهٔ این پدیدهٔ ارتعاشی و ویژگی‌های آن گفته می‌شود و نهایتاً ویژگی‌های این پدیده در مورد رایزرها، چگونگی تحلیل آن در رایزرها، محاسبهٔ میزان تخریب و عمر خستگی و روش‌های کاهش آن تشریح می‌شود.

واژگان کلیدی: ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه، صنایع فراساحلی، رایزر

۱. مقدمه

رایزر[۴] مجموعه‌ای از لوله‌هاست که چاه‌های موجود در بستر دریا را به سکوهای موجود در سطح آب متصل می‌کند. رایزر ابزار اصلی در سیستم‌های استخراج شناور برای حمل سیالات از سکوها و به آنهاست و از جمله پیچیده‌ترین سیستم‌ها در مجموعهٔ استخراج آبهای عمیق محسوب می‌شود. در شکل ۱ انواع سکوهای دریایی و سیستم‌های رایزر زیردریایی به‌کار رفته در توسعهٔ میدانی آب‌های عمیق نمایش داده شده است. اساساً رایزرها به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: رایزرهای صلب و رایزرهای انعطاف‌پذیر. البته نوع دیگری از رایزها وجود دارند که به نام رایزهای

تلفیقی مشهور می‌باشند. این دسته از رایزها در واقع تلفیقی از رایزرهای صلب و انعطاف‌پذیرند. در ادامه به معرفی چهار نوع از رایزرهای استخراجی می پردازیم. این سیستم‌ها عبارت‌اند از: رایزرهای فولادی منحنی زنجیری[۵]، رایزرهای کشیده‌شده از بالا[۶]، رایزرهای انعطاف‌پذیر[۷] و نهایتاً رایزرهای ترکیبی[۸]. در ادامه هر یک از این سیستم‌ها تشریح می‌شوند.



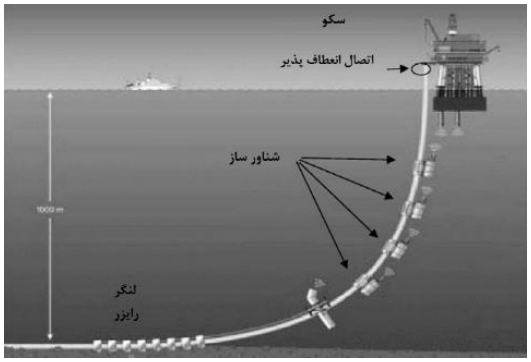
شکل ۱. انواع سیستم‌های رایزر [۱]

۱-۱. رایزرهای فولادی منحنی زنجیری

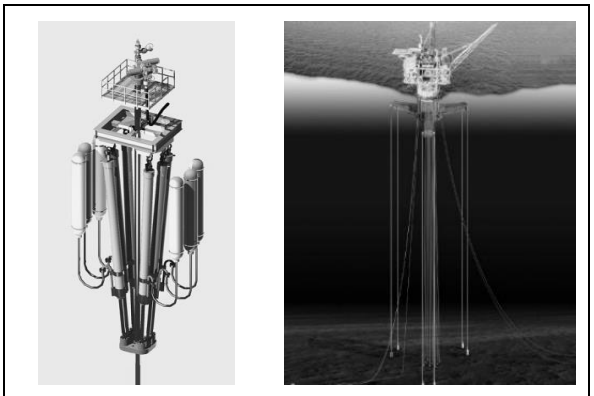
این دسته از رایزرها در ابتدا به‌عنوان خطوط صدور در سکوهای ثابت به‌کار می‌رفتند. این رایزرها در حالت آویزان در ناحیهٔ پایینی افقی بوده و در بالا عموماً با خط عمود زاویهٔ تقریباً ۲۰ درجه دارند. به این ترتیب، رایزر ادامهٔ خط جریان[۹] را تشکیل می‌دهد که در قالب یک منحنی ساده از سکو آویزان است. این رایزرها به‌دلیل پایین‌بودن میزان کشش مؤثر، نسبت به امواج و جریان حساس‌اند. آسیب ناشی از خستگی در اثر ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه می‌تواند برای آنها مخرب باشد. با استفاده از ابزار محدودکنندهٔ این دسته از ارتعاشات، مثل طوقه‌های مارپیچ[۱۰] و باله[۱۱]، می‌توان تخریب کلی را تا حد مناسبی کاهش داد. شکل ۲ یک رایزر فولادی را در آب‌های عمیق نمایش می‌دهد.

۱-۲. رایزرهای کشیده‌شده از بالا

این دسته از رایزرها به‌شکل استوانه‌هایی بلند هستند که برای اتصال بستر دریا به سکوی شناور به‌کار می‌روند. این نوع رایزرها در زمرهٔ رایزرهای صلب قرار دارند. وظایفی که این نوع از رایزرها انجام می‌دهند شامل استخراج، تزریق، حفاری و صدور می‌باشد. یک رایزر کشیده‌شده از بالای معمولی نسبت به حرکت‌های عمودی ناشی از امواج و نیروهای جریانی بسیار حساس است. لذا به وسیله‌ای نیاز دارد که کمبود کشش را جبران کند. زیرا اگر کشش از بالا کاهش یابد باعث بروز ممان خمشی بزرگ‌تری در طول رایزر خواهد شد و اگر کشش مؤثر منفی شود (یعنی رایزر تحت فشار قرار بگیرد) کمانش ائولر[۱۲] رخ خواهد داد. به این دلیل رایزر در سطح آب، از سکو به‌وسیلهٔ کشنده‌های نیوماتیک پشتیبانی می‌شود. این کشنده‌ها به رایزر اجازه می‌دهند تا به‌صورت محوری نسبت به سکو حرکت کند یا تکان داشته باشد.



شکل ۲. دیاگرام رایزر فولادی منحنی زنجیری [۱]



(الف) (ب)

شکل ۳. الف) یک سکوی شناور پایه کششی[۱۳] و مجموعه‌ای از رایزرهای کشیده‌شده از بالا متصل به آن [۱]، ب) سیستم کشندهٔ نیوماتیکی رایزر [۲]

۱-۳. رایزرهای انعطاف‌پذیر

این نوع از رایزرها راه‌حلی کارآمد برای آب‌های عمیق، کم‌عمق و سیستم‌های لولهٔ خطوط جریان در سراسر دنیا بوده‌اند. رایزرهای انعطاف‌پذیر برای کاربردهای فراساحلی در فرم رایزرهای استخراج، صدور و خطوط جریان ایده‌آل شناخته شده‌اند. رایزرهای انعطاف‌پذیر لوله‌های کامپوزیتی چندلایه با سفتی خمشی نسبتاً کم در مقایسه با سفتی محوری می‌باشند تا عملکرد نرم‌تری داشته باشند. ساختار لولهٔ انعطاف‌پذیر و وظایف هر لایه در شکل ۴ مشخص شده است.

۱-٤. رایزرهای ترکیبی

مفهوم رایزر ترکیبی برآمده از مفهوم رایزرهای کشیده‌شده از بالاست. ویژگی اصلی این دسته از رایزرها این است که حرکت نسبی بین یک سازهٔ شناور و یک رایزر صلب فلزی را به‌وسیلهٔ اتصال آنها با جامپرهای انعطاف‌پذیر اصلاح می‌کند.

۲. وظایف سیستم رایزر

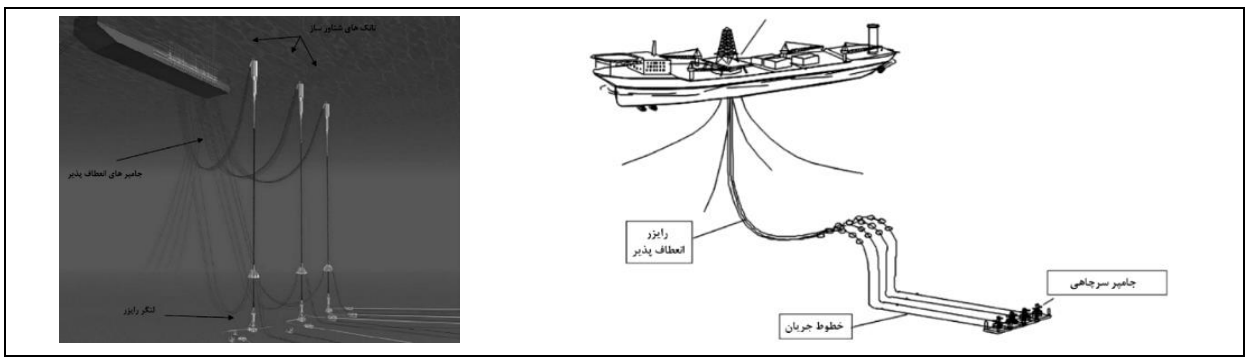
وظایفی که یک سیستم رایزر انجام می‌دهد شامل مواردی چون استخراج (نفت و گاز و ...)، تزریق (آب و مواد شیمیایی)، صادر یا وارد کردن و یا گرداندن سیالات، حفاری و نهایتاً آماده‌سازی چاه جدید برای استخراج و نگه‌داری و احیا چاه‌های موجود[۱۴] می‌باشد.

۳. طراحی رایزرهای دریایی

۳-۱. فرایند طراحی

برای یک رایزر فولادی، به‌عنوان معمول‌ترین نوع رایزر دریایی، اصلی‌ترین مراحل در فرایند طراحی طبق استانداردها و قوانین شامل موارد زیر می‌باشد [۴]:

۱. ایجاد اساس طراحی شامل مشخص‌کردن مواردی چون داده‌ها و اطلاعات مربوط به امواج، پروفیل سرعت جریان پایدار و جز این‌ها
۲. به‌دست آوردن داده‌های طراحی سکو
۳. تعیین حداقل ضخامت دیوارهٔ رایزر براساس فشار طراحی، اندازهٔ لوله، گرید ماده و خوردگی مجاز. این مقدار به‌وسیلهٔ کدهای استاندارد و تنش مجاز حلقه‌ای تعیین می‌شود.
۴. انتخاب آرایش پایه برای رایزر و انجام تحلیل‌های تنش استاتیکی و کمانش برای حالت‌های منتخب نیرو.
۵. انجام تحلیل ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه و محاسبهٔ خستگی با استفاده از روش‌های تخریب انباشته به‌منظور تعیین عمر رایزر.



شکل ٤. سیستم رایزر انعطاف‌پذیر [۱]

شکل ۵. دسته‌ای از رایزرهای ترکیبی [۱]

۳-۲. ابزار تحلیل رایزر

به‌طور کلی ابزارهای متنوعی برای تحلیل و طراحی رایزرها وجود دارد که در دادمه به برخی از آنها اشاره شده است:

۱. بسته‌های نرم‌افزاری اجزای محدود همچون آباکوس[۱۵]، انسیس[۱۶] و جز این‌ها

۲. ابزار تحلیل رایزر[۱۷] همچون فلکس‌کام[۱۸]، ارکافلکس[۱۹]، ریفلکس[۲۰] و جز این‌ها
۳. ابزار تحلیل ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه در رایزر همچون شیِر ۷[۲۱]، وایـوا[۲۲]، وایـوانـا[۲۳] و برنامه‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی[۲۴]
۴. برنامه‌های تحلیل حرکت کوپل‌شده مثل اچ. ای. آر. پی.[۲۵]
۵. ابزار تحلیل نصب و راه‌اندازی رایزر مثل آف‌پایپ[۲۶]، اورافلکس[۲۷]، پایپ‌لِـی[۲۸] و جز این‌ها

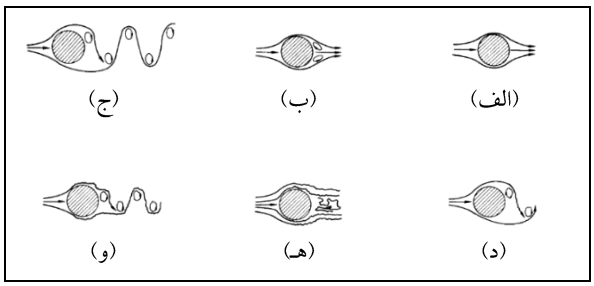
اما تحلیل‌هایی که عموماً توسط ابزار تحلیل برای رایزرها انجام می‌گیرد شامل موارد زیر است:

۱. تحلیل استحکام
۲. تحلیل خستگی
۳. تحلیل ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه
۴. تحلیل تداخل (با سایر رایزرها و قسمت غوطه‌ور سکو و دیگر شناورها).

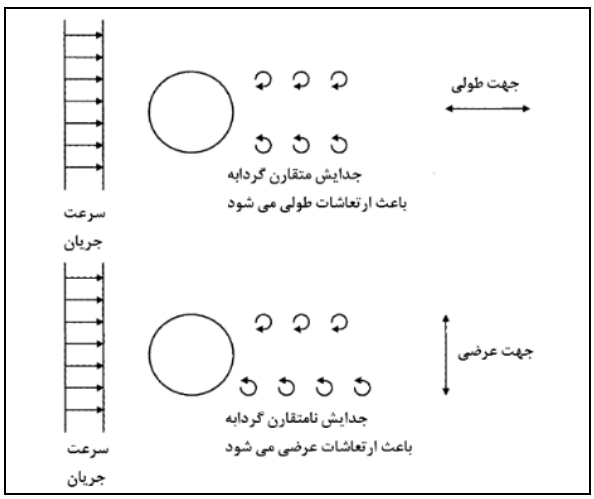
در بخش بعد به بیان تعریف‌ها و اهمیت پدیدهٔ ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه در طراحی رایزر، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عمر خستگی رایزر، و چگونگی تحلیل آن می‌پردازیم.

٤. ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه

بسیاری از سازه‌های پراهمیت همچون ساختمان‌ها، کابل‌ها، خطوط لوله و رایزرها، شکل ایرودینامیکی مناسبی ندارند. چنین سازه‌هایی اصطلاحا اجسام بلاف[۲۹] نامیده می‌شوند. برای یک جسم بلاف در جریان یکنواخت عرضی، دنبالهٔ پشت جسم عادی نیست و برای رینولدزهای بیشتر از ۵۰ حاوی گردابه‌های مجزای جداشونده‌ای به‌صورت شکل ۶ می‌باشد. این جدایش گردابه‌ها می‌تواند توزیع فشار در سطح جسم بلاف را تحت تأثیر قرار دهد. هنگامی‌که شکل‌گیری گردابه‌ها نامتقارن باشد، نیروهای جانبی برآی نوسانی بر کناره‌های جسم اثر می‌کند و به حرکت عرضی آن نسبت به راستای جریان می‌انجامد. در نتیجه جسم بلاف تحت اثر نیروهای جانبی نوسانی، در امتداد عرضی نوسان خواهد کرد. به این پدیده اصطلاحاً ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه گفته می‌شود. البته اگر جدایش گردابه از طرفین جسم بلاف به‌صورت متقارن صورت گیرد، نیروهای نوسانی در راستای طولی بر جسم وارد می‌شود و ارتعاشات در جهت طولی انجام می‌گیرد. هرچند دامنهٔ ارتعاشات طولی در مقایسه با ارتعاشات عرضی دارای مرتبهٔ بسیار پایین‌تری می‌باشد.



شکل ٦. رژیم‌های جریان سیال عبوری از روی استوانه‌ها [٥]



شکل ۷. جدایش گردابه از پشت یک استوانه [٦]

مطالعات تجربی نشان داده است که فرکانس نیروی نوسانی برآ در حالت جدایش نامتقارن گردابه (برای جسم ساکن) در مقیاس هرتز از رابطهٔ ۱ به‌دست می‌آید:

$$f_s = \frac{SU}{D} \qquad (1)$$

به‌طوری‌که در این رابطه U سرعت جریان آزاد، D فاصلهٔ عمودی بین نقاط جدایش (برای استوانه برابر با قطر آن)

می‌باشد. ثابت بدون‌بعد S عدد استروهال[۳۰] نامیده می‌شود که مقدار معمول آن برای استوانه‌ها ۰/۲ است.

٤-١. اهمیت ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه در طراحی رایزرها

با افزایش میزان تقاضا برای محصولات نفت و گاز در جهان و اکتشافات جدید فراساحلی، صنایع فراساحلی به‌سمت آب‌های عمیق و فوق‌عمیق متمایل شده است. تاکنون سازه‌های بسیاری در آب‌های عمیق نصب شده‌اند. مثلاً، در سال ۲۰۰۶ م، تعداد سکوهای نفتی موجود در خلیج مکزیکو در حدود ۴۰۰۰ عدد بوده است [۷] که برخی از آنها مثل سکوی تیر دکلی پردیدو[۳۱] در آب‌هایی با عمق بیش از ۲۰۰۰ متر نصب شده‌اند. رفتن به‌سمت آب‌های عمیق و فوق‌عمیق منجر به بروز چالش‌های بسیاری در تحلیل و طراحی سکوها و رایزرهای دریایی شده است. یکی از این مشکلات، ویژگی خستگی رایزرهای باریک و بلند در این آب‌ها، به‌سبب ارتعاشات ناشی از گردابه[۳۲] می‌باشد. با افزایش سرعت پروفیل جریان (و غیریکنواختی پروفیل جریان در عمق)، طبیعت پیچیدهٔ ارتعاشات ناشی از گردابه باعث بروز ابهامات عدیده‌ای در پیش‌بینی تنش‌های ناشی از ارتعاشات ناشی از گردابه می‌شود که تخریب خستگی انباشته[۳۳] در رایزر را بسیار حائز اهمیت می‌کند [۸]. مطالعات متعددی برای پیش‌بینی پاسخ رایزرها در برابر ارتعاشات ناشی از گردابه انجام شده است؛ هرچند پیش‌بینی دقیق نتایج این پدیدهٔ خاص، موضوعی است که هنوز به توجه بسیار نیاز دارد.

٤-٢. ویژگی‌های ارتعاشات ناشی از گردابه

آزمایش‌های تجربی نشان داده است که ارتعاشات عرضی استوانهٔ کوتاه (ارتعاش در جهت عمود بر جریان آزاد) با فرکانسی برابر فرکانس جدایش گردابه یا در نزدیکی آن، تأثیر بزرگی بر جدایش گردابه دارد. ارتعاش استوانه می‌تواند:

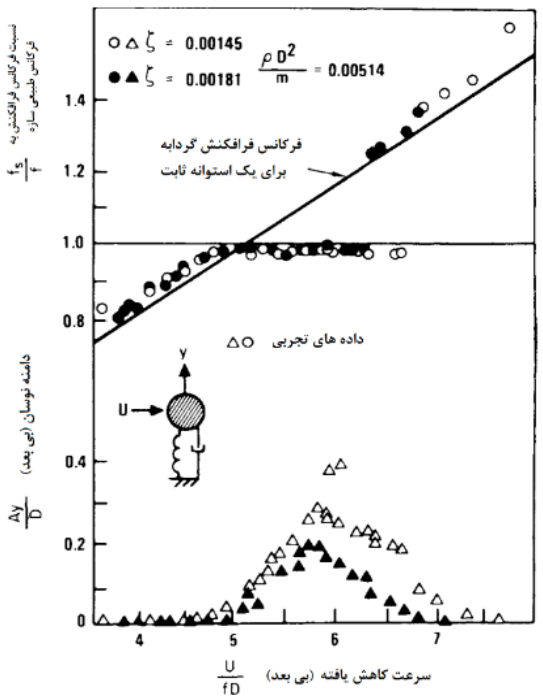
۱. قدرت گردابه‌ها را افزایش دهد.
۲. طول همبستگی در دنباله را افزایش دهد.
۳. باعث تغییر فرکانس فرافکنش گردابه از فرکانس مقدار طبیعی آن به فرکانس ارتعاش استوانه گردد. به این پدیده همگامی[۳۴] یا قفل‌شدن[۳۵] گفته می‌شود.
۴. نیروی پسای متوسط وارد بر استوانه را افزایش دهد.
۵. باعث تغییر فاز، ترتیب و شکل گردابه‌ها در دنباله شود.

شکل ۸ سکوی تیر دکلی پردیدو از جمله عمیق‌ترین سکوهای استخراجی جهان است که در خلیج مکزیکو، در عمق ۲٤۳۸ متری، قرار دارد [۹]

وقتی سرعت جریان افزایش یا کاهش یابد تا فرکانس فرافکنش گردابه به فرکانس طبیعی سازه نزدیک شود، فرکانس فرافکنش گردابه ناگهان به فرکانس سازه قفل می‌شود. ارتعاشات ناشی در فرکانسی برابر فرکانس سازه یا نزدیک به آن رخ می‌دهد. نواسانات تشدیدشده در قفل‌شدگی دنباله، انرژی قابل توجهی را به سازه وارد می‌کند که می‌تواند منجر به ارتعاشات با دامنه زیاد شود. شکل ۹ ارتعاشات انتقالی یک استوانهٔ صلب نصب‌شده روی

فنر برای دو سطح میرایی نمایش داده شده است. ارتعاشات عرضی عموماً در محدودهٔ سرعت کاهش‌یافتهٔ $4<V_r<8$ رخ می‌دهد.

$$V_r=\frac{U}{f_nD}$$

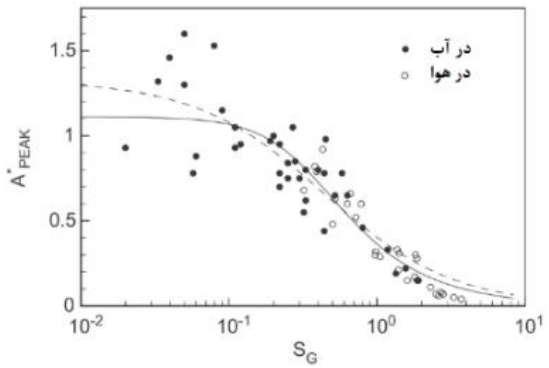


شکل ۹. پدیدهٔ قفل‌شدگی برای ارتعاشات انتقالی یک استوانهٔ کوتاه نصب‌شده با فنر برای دو مقدار میرایی [۵]

حداکثر دامنهٔ جابه‌جایی سازه در ناحیهٔ قفل‌شدن معمولاً به‌صورت تابعی از یک پارامتر جرم - میرایی به نام پارامتر اسکاپ - گریفین[۳۶] بیان می‌شود که حاصل آن نمودار گریفین[۳۷] خواهد بود. شکل ۱۰ نمودار گریفین را برای داده‌های تجربی در آب و هوا و نمودار فیت‌شده به هر یک را نمایش می‌دهد.

٤-۳. ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه در جریان برشی[۳۸] (متغیر با عمق)

در حالی‌که توجه گسترده‌ای به ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه در استوانه‌های یکنواخت در جریان یکنواخت می‌شود، تنها طی سال‌یان اخیر بوده است که تأثیر جریان برشی (متغیر با عمق) مورد توجه قرار گرفته است. بررسی استوانه‌های انعطاف‌پذیر شناور در جریان‌های غیر یکنواخت پیچیدگی این پدیدهٔ ارتعاشی را روشن ساخته است. در جریان برشی، سازه‌های انعطاف‌پذیر ترکیبی از شکل موج‌های ایستاده و متحرک را نشان می‌دهند. جریان‌های اقیانوسی معمولاً سرعت‌های متغییر با عمق دارند، لذا درک جریان‌های برشی برای فهم پاسخ‌های رایزر ضروری است. جریان برشی سبب فرکانس‌های جدایش گردابهٔ متغییر در طول رایزر می‌شود. جدایش گردابه در سلول‌هایی صورت می‌گیرد که با ارتعاش استوانه طول بازه مؤثر آنها می‌تواند گسترده شود.



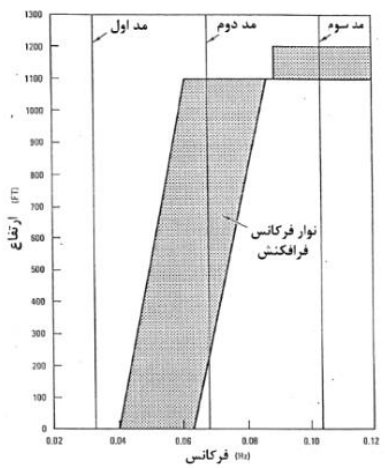
شکل ۱۰. نمودار گریفین برای داده‌های تجربی و خطوط فیت‌شده به آنها [۱۰]

طول این سلول‌ها، که هر کدام فرکانس جدایش گردابه خاص خود را دارند، برای استوانهٔ ثابت حدود ۴ برابر قطر می‌باشد. برای یک جریان با سرعت متغییر، پهنای باندهای مشخص فرکانس‌های جدایش گردابه در یک محدوده حول فرکانس‌های طبیعی ساختار رایزر عمل می‌کند. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داده است که فرکانس جدایش مربوط به سرعت جریان در سلول‌هایی که جدایش در آنها صورت می‌گیرد، در صورتی‌که در محدودهٔ باند ۲۵ درصد حول رزونانس باشد، به فرکانس طبیعی رایزر قفل می‌شود.

٤-۳-۱. میرایی در جریان برشی

به‌طور کلی، میرایی را می‌توان با مؤلفه‌های ساختاری و هیدرودینامیکی توصیف کرد. برای یک استوانه تنها در

جریان یکنواخت در رزونانس، نشان داده شده که مشخص‌بودن میرایی ساختاری برای پیش‌بینی پاسخ کافی است. این میرایی عموماً در صورت امکان از تست‌های تنزل[۳۹] در هوا مشخص می‌شود. برای رایزرهای کشیده‌شده مؤلفهٔ میرایی ساختاری در مقایسه با مؤلفهٔ هیدرودینامیکی بسیار کوچک است، لذا به‌ندرت برای پیش‌بینی پاسخ رایزر در جریان برشی به‌کار می‌رود. در شرایط جریان برشی، نواحی از رایزر که قفل‌شدگی در آنها رخ نداده است سهم زیادی در میرایی هیدرودینامیکی دارند. مدل‌های متعددی برای میرایی در جریان برشی وجود دارد. در یکی از آنها هر مد قابل تحریک بررسی می‌شود و میرایی در ناحیه‌هایی که فرکانس فرافکنش با فرکانس طبیعی همخوانی ندارد اعمال می‌گردد.



شکل ۱۱. دنبال‌کردن مدها برای رایزر آب‌های عمیق

برای مد اول امکان رزونانس وجود ندارد، اما مد دوم پتانسیل رزونانس را در بیشتر طول رایزر دارد و مد سوم امکان تشدید با اثر موج را دارد [۵]

٤-٤. خستگی

تخریب خستگی رایزرها عمدتاً به‌دلائل زیر اتفاق می‌افتد:

۱. نیروی موج مرتبهٔ اول[۴۰] و حرکت شناور مرتبط با آن
۲. حرکت مرتبهٔ دوم شناور[۴۱]
۳. ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه به‌دلیل وجود جریان

ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه احتمالاً مهم‌ترین مسئله در طراحی رایزرهای فلزی منحنی زنجیری، به‌ویژه برای موقعیت‌های با جریان شدید، می‌باشد. ارتعاش فرکانس بالای لولهٔ رایزر به‌دلیل جدایش گردابه منجر به ایجاد تنش‌های شدید متناوب می‌شود که می‌تواند به نرخ بالای تخریب ناشی از خستگی بیانجامد. رایزرهای آب‌های عمیق به‌دلائل زیر مستعد رخداد ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه‌اند:

۱. جریان در آب‌های عمیق معمولاً نسبت به مناطق کم‌عمق‌تر شدیدتر است.
۲. طول زیاد رایزر فرکانس طبیعی آن را کاهش می‌دهد، بنابراین سرعت جریان مورد نیاز برای وقوع ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه کاهش می‌یابد.
۳. سکوهای آب‌های عمیق عموماً سکوهای شناورند، لذا هیچ سازهٔ مجاوری وجود ندارد که بتوان رایزر را به آن کلمپ کرد.

رایزر آب‌های عمیق عموماً بسیار بلند هستند، به‌طوری‌که جریان‌های قابل توجه یکی از مدهای خمشی طبیعی را که بسیار بالاتر از مد ارتعاشی خمشی اصلی می‌باشد، تحریک می‌کند. به‌علاوه همان‌طور که گفته شد، در جریان برشی امکان تحریک چندین مد ارتعاشی رایزر در ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه وجود دارد. این مسئله پیش‌بینی ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه رایزرهای آب‌های عمیق را نسبت به بازه‌های کوتاه رایزر سکوهای ثابت در آب‌های کم‌عمق بسیار پیچیده‌تر می‌کند.

٤-٥. تحلیل و کاهش ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه رایزر

٤-٥-١. روش‌های تحلیل

روش‌های تحلیلی مورد استفاده برای محاسبهٔ پاسخ ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه براساس مشاهدات تجربی می‌باشد. تا همین اواخر، بیشتر دستورالعمل‌ها دربارهٔ رفتار ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه تنها ارتعاش

قفل‌شونده در جریان یکنواخت را در نظر می‌گرفت. این مسئله پیش‌بینی‌های محافظه‌کارانه‌ای از تخریب خستگی ارائه می‌دهد. لذا روش‌ها باید رژیم جریان متغییر در طول رایزر و اثر متقابل مدهای ارتعاشی تحریک‌شده در نقاط گوناگون در طول آن را در نظر بگیرند.

٤-٥-٢. بسته‌های نرم‌افزاری

طراحی مقدماتی رایزرهای مقاوم در برابر خستگی نیازمند مدل‌های دینامیکی ساختاری نسبتاً ساده برای استفاده می‌باشد که قابلیت تخمین سطوح تنش دینامیکی در رایزر را به‌صورت تابعی از ویژگی‌های سازه و پروفیل‌های سرعت اعمالی داشته باشند. این برنامه‌ها باید تغییرات پارامتری آسان پروفیل‌های سرعت، کشش رایزر و ویژگی‌های ساختاری را مد نظر قرار دهند. کاربر نیز باید از فرض‌ها و محدودیت‌های برنامهٔ آگاهی داشته باشد. پرکاربردترین برنامه در حال حاضر، برنامه شِیر ۷[۴۲] مؤسسهٔ فناوری مساچوستس می‌باشد. علاوه بر شِیر ۷، مدل‌های عددی شناخته‌شدهٔ دیگری برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌ها، انحناها و فرکانس‌های رایزرها وجود دارد. این کدها در سه گروه جای می‌گیرند: در گروه اول، که شامل چهار کد می‌باشد[۴۳]، از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به‌منظور محاسبهٔ جریان دوبعدی حول رایزر بر روی تعداد زیادی صفحات افقی، که در طول رایزر توزیع شده‌اند، استفاده می‌شود. در گروه دوم، شامل دو کد، از نظریهٔ نواری مشابه استفاده می‌شود، اما از روش‌های عملی‌تری (مثلاً تئوری لایهٔ مرزی و مدل همرفتی سیال) برای محاسبهٔ نیروی رایزر در هر صفحه بهره می‌گیرد. کدهای موجود در دو گروه یادشده همگی در حوزهٔ زمان عمل می‌کنند. گروه سوم[۴۴] به‌طور متنوعی از داده‌های اندازه‌گیری مربوط به استوانه‌های صلب تحت تأثیر ارتعاشات ناشی از گردابه یا ارتعاشات اجباری به‌منظور شناسایی دامنهٔ مدی (یا محدوده‌ای از مدها) که بیشترین امکان تحریک را دارد، استفاده می‌کند. در اکثر این مدل‌ها تلاشی برای محاسبهٔ پاسخ طولی انجام نشده است [۱۱]. کمبود نسبی داده‌ها در اعداد رینولدز فوق‌بحرانی دقت مطلق همهٔ برنامه‌های موجود را محدود می‌کند. در بسیاری از رایزرهای موجود در جریان‌های برشی، که امروزه در صنعت معمول است، خطای احتمالی در پیش‌بینی دامنهٔ پاسخ می‌تواند به بزرگی ضریب دو باشد. دلیل این عدم دقت، ضعف در مدل‌کردن هیدرودینامیک و کمبود داده‌های کالیبراسیون در اعداد رینولدز بالاست.

٤-٦. عمر خستگی

تخریب خستگی تولیدشده به‌وسیلهٔ پروفیل‌های جریان و ناشی از موج مرتبهٔ اول به‌سبب وضعیت‌های دریایی را می‌توان با استفاده از قانون ماینر[۴۵] با هم جمع کرد. باید به توزیع تخریب خستگی حول محیط رایزر توجه شود، تا از محافظه‌کاری غیرضرور و همچنین تخریب که برای ۸ نقطهٔ محیطی محاسبه می‌شود جلوگیری شود. ارزیابی خستگی براساس منحنی‌های S-N انجام می‌گیرد. تخریب خستگی با استفاده از قانون تجمیع ماینر به‌صورت زیر داده شده است:

$$D = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \le \eta \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه، D نسبت تخریب انباشته‌شدهٔ خستگی، n_i تعداد سیکل‌های محدودهٔ تنش در بلوک تنش i ام، N_i تعداد سیکل‌های تنش مجاز در محدودهٔ مشخص تنش و η نسبت تخریب خستگی مجاز است.

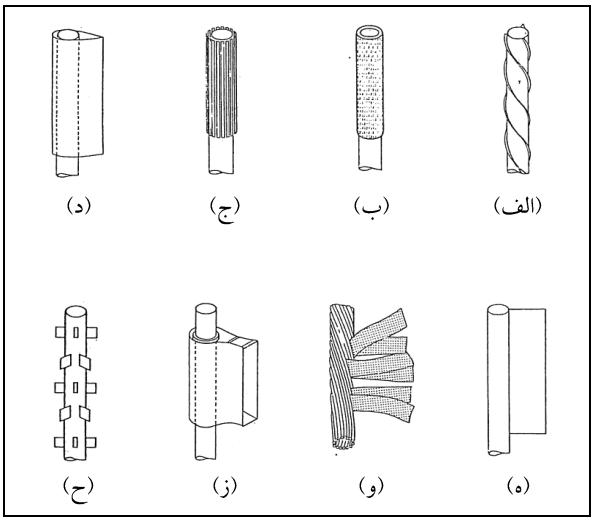
٤-٧. ابزارهای کاهش ارتعاش ناشی از گردابه[۴۶]

اغلب یک رایزر آب‌های عمیق نمی‌تواند معیارهای طراحی خستگی را برآورده کند. طراح می‌تواند انتخاب کند تا:

۱. رایزر را مجدداً طراحی کند، چه با تغییر جرم (برای مثال حذف شناورسازها)، افزایش کشش یا تغییر بنیادی طراحی رایزر (برای مثال استفاده از رایزر کشیده‌شده از بالا به‌جای رایزر منحنی زنجیری)
۲. افزودن ابزارهای کاهندهٔ ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه به‌منظور کاهش ارتعاش

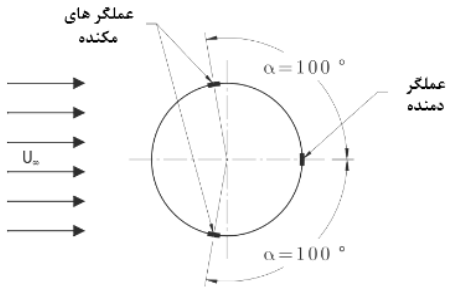
تغییر طراحی ساختاری رایزر عموماً در مقایسه با استفاده از ابزارهای کاهنده پرهزینه است. برای مثال چون فرکانس‌های طبیعی رایزر در خمش متناسب با جذر کشش می‌باشد، کشیدن محکم‌تر رایزر تنها یک اثر جزئی دارد. به‌علاوه سنگین‌تر یا سبک‌تر کردن رایزر در بهترین حالت تنها اندکی نسبت کشش به جرم را در معادلهٔ فرکانس طبیعی کاهش می‌دهد. فرکانس‌های طبیعی مدهای مورد نظر، عموماً به‌وسیله کشش و نه سفتی خمشی ساختاری رایزرها تأثیر می‌پذیرند. لذا معمولاً از ابزارهای کاهندهٔ ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه، که کم‌هزینه‌تر بوده و تأثیر بیشتری دارند، برای اصلاح ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه در رایزر استفاده می‌شود. در حال حاضر ابزارهای متعددی به‌صورت تجاری موجود است. انواعی که بیشترین کاربرد را دارند طوقه‌ها و باله‌ها می‌باشند. این ابزارها به‌وسیلهٔ مختل‌کردن شکل جریان سیال حول رایزر و ممانعت از تشکیل جریان‌های اِدی و گردابه‌ها، از ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه‌ها جلوگیری می‌کنند.

موارد اشاره‌شده در شکل ۱۲ ابزارهای غیرفعال[۴۷] کاهش ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه‌ها هستند.



شکل ۱۲. وسائل اضافه‌شونده به رایزرها به‌منظور کاهش ارتعاشات ناشی از فرافرکنش گردابه‌ها؛ لف) طوقه‌های مارپیچ، ب) شرود[۴۸]، ج) شیارهای محوری، د) باله، ه) شکاف‌دهنده، و) نوار، ز) پرهٔ لولاشدهٔ هدایت‌کننده، ح) صفحات اسپویلر [۵]

به‌تازگی روشی پیشنهاد شده که البته هنوز به‌صورت عملی برای رایزرها استفاده نشده است. در این روش، یک شیار دمنده در سمت بادپناه استوانه واقع شده، در حالی‌که دو شیار مکنده نیز با زاویهٔ مشخص در سمت دیگر قرار دارند. بررسی‌ها نشان داده است در صورتی‌که میزان سرعت دمش و مکش عملگرها حدود سه برابر سرعت جریان آزاد باشد، این سیستم می‌تواند به طرز مؤثری ارتعاشات را کاهش دهد.



شکل ۱۳. سیستم کنترل ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه‌ها با دو عملگر مکنده و یک عملگر دمنده [۱۲]

۵. جمع‌بندی

رایزر از جمله پیچیده‌ترین ابزارها در صنایع فراساحلی است که به‌منظور اتصال چاه‌های موجود در بستر دریا یا اقیانوس به سکوها به‌کار می‌رود. از جمله وظایف رایزرها می‌توان به حفاری و استخراج نفت و گاز اشاره کرد. رایزرها انواع متنوعی دارند که بسته به وظیفه، شرایط کاری و هزینه‌های موجود، نوع سیستم مناسب مشخص می‌شود.

از جمله موارد مهم و حساس در طراحی رایزرهای دریایی، اعم از رایزرهای استخراج و حفاری که در صنایع فراساحلی به‌کار می‌روند، خستگی ناشی از رخداد پدیدهٔ ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه‌ها در آنها می‌باشد. ارتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه‌ها می‌تواند منجر به افزایش نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر رایزرها و کاهش عمر کارکرد آن به‌سبب خستگی شود. در سال‌های اخیر، صنایع فراساحلی برای اکتشاف منابع جدید نفت بیشتر به‌سمت آب‌های عمیق و فوق‌عمیق رفته است. این مسئله سبب افزایش

طول نسبی قسمتی از رایزرها که در معرض ارتعاشات ایجادشده از جریان‌های دریایی قرار دارد، شده است. از طرف دیگر، جریان آب در دریاها و اقیانوس‌ها برشی (متغییر با عمق) است که این موضوع به‌همراه باریک و بلندبودن رایزر امکان تحریک چندین مد ارتعاشی را فراهم می‌کند و باعث پیچیدگی هرچه بیشتر تحلیل ارتعاشات برای تخمین عمر خستگی آن می‌شود.

روش‌های تحلیل و محاسبهٔ پاسخ رایزرها به اتعاشات ناشی از فرافکنش گردابه‌ها براساس آزمایشات تجربی یا روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشند. این روش‌ها در قالب بسته‌های نرم‌افزاری تحلیل ارتعاشات به‌منظور تعیین جابه‌جایی‌ها، تنش‌ها، تخریب خستگی و جز این‌ها به‌کار می‌روند. این نرم‌افزارها براساس نحوهٔ انجام محاسبات در سه گروه جای می‌گیرند:

گروه اول: نرم‌افزارهایی که از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبهٔ جریان دوبعدی حول رایزر روی تعداد زیادی صفحات موازی تولیدشده در طول رایزر، استفاده می‌کنند.

گروه دوم: این گروه مشابه گروه اول از یک نظریهٔ نواری استفاده می‌کند، با این تفاوت که برای محاسبهٔ جریان روی هر یک از صفحات از روش‌های عملی‌تری استفاده می‌کند.

گروه سوم: در این گروه از داده‌های مربوط به آزمایشات استوانهٔ صلب تحت تأثیر ارتعاشات ناشی از گردابه یا ارتعاشات اجباری به‌منظور محاسبهٔ دامنهٔ مد یا مدهایی که بیش‌ترین امکان تحریک را دارد استفاده می‌شود. مدل‌های یادشده اشکالاتی دارند که سبب شده به‌عنوان مثال خطای محاسبهٔ دامنهٔ پاسخ در برخی موارد در جریان برشی به بزرگی ۲ باشد. از جمله مشکلات برنامه‌های تحلیل ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. عدم انجام محاسبهٔ ارتعاشات طولی در اکثر این مدل‌ها
۲. ضعف در مدل‌کردن هیدرودینامیک مسئله
۳. کمبود داده‌های کالیبراسیون در اعداد رینولدز بالا

پس از انجام تحلیل ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها، اگر معیارهای طراحی خستگی برآورده نشود، در این‌صورت طراح می‌تواند با تغییر جرم یا افزایش نیروی کشش و یا تغییر کلی سیستم رایزر، ارتعاشات را اصلاح کند تا معیارها برآورده شود. اما اغلب چنین روش‌هایی پرهزینه است و به‌علاوه تأثیر اندکی بر کاهش ارتعاشات دارند. لذا معمولاً از ابزارهای کاهش ارتعاشات استفاده می‌شود. این ابزارها می‌توانند فعال یا غیرفعال باشند که در این میان ابزارهای غیرفعال کاربرد تجاری دارند، اما روش‌های فعال در دست پژوهش و بررسی می‌باشند.

٦. مآخذ

[1] Bai, Yong, Qiang Bai, *Subsea Engineering Handbook*, Elsevier, New York, 2012.

[2] Technip engineering company, http://www.technip.com (accessed Jan 15, 2014).

[3] Offshore Products & Services –Wellstream, http://www.wellstream.com (accessed Jan 10, 2014).

[4] Boyun Guo, S. Song, *Offshore piplines*, Elsevier, New York, 2005.

[5] Blevins, Robert D., *Flow-Induced Vibration*, VNR, New York, 1990.

[6] Yong Bai, Qiang Bai, *Pipelines and Risers, Elsevier ocean engineering book series volume 3*, Amsterdam, 2001.

[7] Wikipedia, http://www.wikipedia.com (accssed Jan 16, 2014).

[8] Iranpour, Mohammad, Farid Taheri, J. Kim Vandiver, "Structural life assessment of oil and gas risers under vortex-induced vibration," *Marine Structures* 21 (2008): pp353-373.

[9] SubseaIQ offshore field development, http://www.subseaiq.com (accessed Jan 14, 2014).

[10] Williamson, C.H.K., R. Govardhan, "A brief review of recent results in vortex-induced vibrations," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96* (2008): pp713–735.
[11] Chaplin, J., et al., "Blind predictions of laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a tension riser." *Journal of fluids and structures*, 2005. 21(1): pp.25-40.
[12] Muralidharan, K., Sridhar Muddada, B.S.V. Patnaik, "Numerical simulation of vortex induced vibrations and its control by suction and blowing," *Applied Mathematical Modelling* 37 (2013): pp284–307.
[13] Marcollo, Hayden, "Multimodal Vortex-Induced Vibration," Doctoral Thesis, Monash University, Australia, 2002.
[14] Shell corporation in Alaska, http://www.shell.com/us/alaska (accessed Jan 10, 2014).
[15] Yong Bai and Qiang Bai, *Subsea Pipelines and Risers*, Elsevier, London, first edition, 2005.
[16] Shigehiko Kaneko, *Flow-Induced Vibrations: Classifications and Lessons from Practical Experiences*, Elsevier, New York, First Edition, 2008.
[17] Paidoussis, Michael P., *Fluid Structure Intaractions: Cross-Flow Induced Instabilities*, Cambridge University Press, New York, First Edition.

پی‌نوشت

۱. آب‌های عمیق اصطلاحاً به آبهایی با عمق بیش از ۵۰۰ متر گفته می‌شود.
۲. آب‌های فوق‌عمیق به آب‌هایی با عمق بیش از ۲۰۰۰ متر اطلاق می‌شود.
3. VIV
4. Riser
5. Steel Catenary Risers (SCRs)
6. Top Tensioned Risers (TTRs)
7. Flexible Risers
8. Hybrid Risers
9. Flowline
10. Helical strakes
11. Fairing
12. Euler
13. TLP (Tenstion Leg Platform)
14. Completion & workover
15. ABAQUS
16. ANSYS
۱۷. ابزار تحلیل رایزر برنامه‌های با هدف خاص برای تحلیل‌های مربوط به رایزرهای انعطاف‌پذیر، رایزرهای منحنی زنجیری، TTRها و سازه‌های باریک مثل خطوط مهار سکوها و خطوط لوله می‌باشند.
18. Flexcom
19. Orcaflex
20. Riflex
21. Shear7
22. VIVA
23. VIVANA
24. CFD
25. HARP
26. OFFPIPE
27. Oraflex
28. Pipelay
29. Bluff bodies
30. Strouhal
31. Perdido spar platform
32. VIV
33. Accumulated fatigue damage
34. Synchronization
35. Lock-in
36. Skop-Griffin
37. Griffin plot
38. Shear current
39. Decay tests
40. 1st order wave loading
41. 2nd order floater motion
42. SHEAR7
43. Norsk Hydro ،USP ،DeepFLow & VIVIC
44. VIVA, VIVANA, VICoMo, ABAVIV & SHEAR7
45. Miner's law
46. VIV suppression devices
47. Passive
48. Shroud