

# بررسی پارامترهای موثر در ارتعاشات محوری رشته درون چاهی جهت بهینه‌سازی حفاری چاه

تورج بهروز<sup>۱</sup>، مسعود طرح‌بخارن هوشمند، پژوهشگاه صنعت نفت

منوچهر بهروز<sup>۲</sup>، قائم مقام طرح جلوگیری از سوزاندن گازهای همراه، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب

چکیده

رشته‌های حفاری تحت تاثیر نیروهای دینامیکی پیچیده‌ای قرار دارند. این نیروها باعث ایجاد ارتعاشات گوناگونی در رشته می‌گردند. یکی از انواع این ارتعاشات، ارتعاشات محوری است. مهمترین عامل ایجاد ارتعاشات محوری، برخورد پیشانی مته حفاری با کف چاه است. تاثیر این ارتعاشات به صورت پُرشِ کلی، حفاری ناهموار، و شلاق زدن کابل‌های نگهدارنده بروز می‌کند. در این تحقیق، پارامترهایی که دارای رفتار ارتعاشی مهم هستند، همانند برخورد رشته حفاری به دیواره چاه، اثرات لزجت گل حفاری، وزن اعمال شده روی مته، برهم کنش مته-سازند، پایدارکننده‌ها، میراثی‌های مختلف، تحریک ناشی از مته سه‌مخروطی و سرعت‌های چرخشی بر رفتار رشته‌ی حفاری مورد بررسی قرار گرفتند. در بررسی انجام شده، معادلات حاکم به صورت تئوری از روش ماتریس تبدیل به دست آمده و سپس با استفاده از روش عددی به کمک نرم افزار Ansys حل شدند. از تحلیل استاتیکی غیرخطی برای تعیین محل تماس رشته با دیواره‌ی چاه و طول موثر رشته و تحلیل‌های مودال و هارمونیک برای تعیین فرکانس‌های طبیعی محوری و سرعت‌های بحرانی استفاده شده و با تحلیل گذر رفتار دینامیکی سیستم در حوزهی زمان بررسی گردید.

واژه‌های کلیدی | رشته حفاری، وزن روی مته، پایدارکننده، لوله‌های وزنه و حفاری

## مقدمه

مختلف و عوامل گوناگونی هنگام دوران در رفتار آن تاثیر گذار هستند، بنابراین ارتعاشات مختلفی به صورت خمشی، پیچشی و محوری در آن بروز می‌نماید (شکل ۲).

ارتعاشات محوری در اثر برخورد پیشانی مته با کف چاه بوجود می‌آید و باعث از کار افتادگی مته و اجزای ساق مته می‌گردد. آثار این نوع ارتعاشات در شرایط بحرانی در سطح، به صورت پرش لوله چندبر مشاهده می‌شود.

سرعت دورانی رشته، برخورد مته با کف سازند<sup>۱</sup>، فشار پمپ‌های گل، پدیده تشدید<sup>۲</sup>، چسبیدن-لغزیدن و نامیزانی جرمی از عوامل مخرب ارتعاشات رشته‌ی حفاری محسوب می‌شوند که سبب بوجود آمدن نیروهای دینامیکی و ضربات شدید بین رشته و دیواره چاه شده و در نتیجه، باعث خستگی و شکست اجزای ساق مته<sup>۳</sup> می‌گردند. وجود این پدیده‌های ناخواسته و ارتعاشاتی که در سیستم‌های حفاری ایجاد می‌شود، موجب بروز اختلال در فرآیند حفاری و ایجاد صدمات به بخش‌های سیستم حفاری و دیواره چاه می‌شود. اگر عوامل بالا به درستی شناخته نشده و کنترل دقیقی بر روی نحوه عملیات حفاری اعمال نشود، حفاری چاه‌های عمیق که به عنوان اصلی‌ترین و حساس‌ترین بخش اکتشاف و بهره‌برداری از منابع به‌شمار می‌رود، بسیار پرهزینه خواهد بود و ممکن است به شکست عملیات حفاری منجر شود. در این میان،

سیستم‌های حفاری به صورت مکانیکی جهت رسیدن به اهداف هیدروکربوری، عمق زمین را حفر می‌کنند. مکان حفاری که از قبل توسط اداره مطالعات و عملیات مخازن مشخص شده، با استفاده از دکل حفاری جهت رسیدن به نقاط هدف، حفاری می‌گردد. سیستم‌های حفاری معمولاً سیستم بالابرنده، سیستم چرخش گل، سیستم دورانی، سیستم کنترل فوران و سیستم تأمین نیرو را شامل می‌گردد. در این سیستم به بخش‌هایی که از سطح زمین شروع شده و تا محل هدف حفاری ادامه دارد، رشته‌ی حفاری<sup>۱</sup> گفته می‌شود. رشته‌ی حفاری از قسمت‌های مختلفی از قبیل لوله‌های حفاری، لوله‌های وزنه<sup>۲</sup>، پایدارکننده‌ها<sup>۳</sup>، ارتعاش گیرها، اتصالات<sup>۴</sup> و مته تشکیل شده است. قسمت‌های تولید و انتقال قدرت در روی بستر زمین (سطح) قرار دارند و در اثر چرخش آنها، مجموعه رشته‌ی حفاری شروع به دوران می‌نماید و انرژی را از طریق لوله‌ها به مته و از مته به سازند وارد نموده، باعث حفر سازند می‌شود. مته علاوه بر نیروی چرخشی، وزن اعمالی روی مته را نیز تحمل می‌کند و رشته در اثر همین نیروها در عمق زمین پیشروی می‌نماید. نمای کامل یک دکل حفاری در شکل ۱ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه رشته حفاری دارای طول زیادی است و نیروهای



برای شبیه‌سازی و تحلیل رفتار رشته حفاری استفاده شده است. در این بررسی رشته حفاری به صورت یک میله پیوسته و همگن و دیواره چاه در ابتدا با محور اصلی چاه موازی در نظر گرفته شده و از اصطکاک بین پیشانی مته و کف چاه و اثر هیدرولیکی سیال چشم پوشی شده است.

### تاریخچه و مرور برخی مقالات

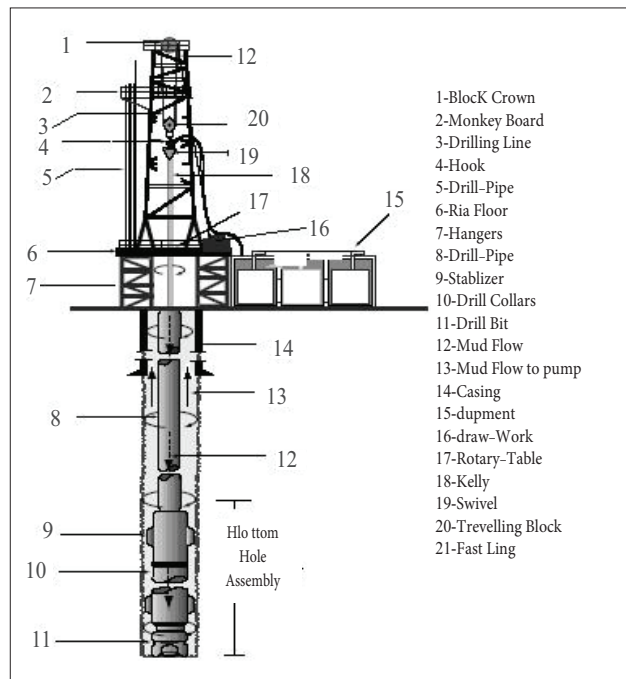
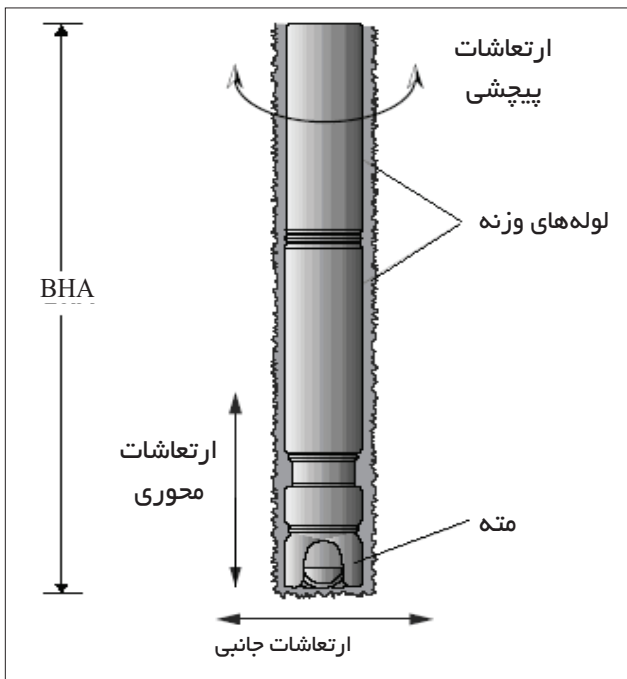
اولین مطالعات در سال ۱۹۶۰ توسط بایلی و فاینی (I.Finnie و J.J.Bailey) [۳] به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی به منظور مطالعه و بررسی ارتعاشات محوری و پیچشی رشته حفاری صورت گرفت. آنها با استفاده از روش سعی و خطا، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای یک رشته ساده را استخراج و بر اساس آن توانستند نقاط بحرانی را شناسایی کنند.

خان (Khaza zameerudin khan) [۵] به بررسی ارتعاشات محوری و پیچشی در رشته حفاری پرداخت و مدل‌های متفاوتی از رشته حفاری (یک سر گیردار، دوسر ثابت و جرم-فرد در دو انتها) را معرفی نمود و شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی را برای این حالت‌ها به دست آورد. وی بررسی خود را به صورت عددی (استفاده از روش FDM) و تحلیلی (مویلیتی) انجام داد و با استفاده از ارتباطی که بین قسمت بالا و پایین رشته برقرار کرد، توانست به پاسخ ارتعاشات نقاط غیرقابل دسترس (مانند مته) دسترسی پیدا کند.

برگس و همکارانش (T.M.Burges et al) [۹] به بررسی علت از

نحوه تأثیرات و کنش‌های مته و سازند، اثرات نوع مته حفاری، نرخ حفاری<sup>۹</sup>، چگونگی کنترل و تنظیم سرعت حفاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این تحقیق به بررسی و تحلیل ارتعاشات محوری در رشته حفاری ناشی از عوامل متعدد ذکر شده به‌ویژه کنش‌های متناوب بین مته و سازند که باعث پرش مته می‌شود، پرداخته شده است. در رأس این بررسی، عوامل متعددی چون اثرات نوع مته حفاری، تأثیر ویسکوزیته و میرایی ناشی از سیال، تنظیم سرعت چرخش هموار، شناخت سرعت‌های بحرانی، رفتار زمانی و چگونگی کنترل آن مورد توجه قرار گرفته است. رفتار دینامیکی رشته لوله به‌علت تغییر مکان‌های بزرگ ایجاد شده و تماس رشته با دیواره‌ی چاه به صورت غیرخطی بوده و حل معادلات آنها بسیار پیچیده است. محققان با استفاده از قوانین مکانیک، معادلات ریاضی مختلفی را برای حرکت و شبیه‌سازی رشته حفاری بدست آورده‌اند. اما نظریه پیچیدگی موضوع و دخیل بودن عوامل مختلف، اغلب این معادلات دربرگیرنده اثرات غیرخطی و پارامترهای تأثیرگذار از قبیل تماس رشته با بدنه، خارج از مرکز بودن رشته و سایر پارامترها نبوده و نمی‌توان صرفاً از روش‌های تحلیلی به حل دقیق معادلات حاکم پرداخت. لذا، پژوهشگران این عرصه دست به دامن روش‌های عددی شدند که در این میان روش المان‌های محدود یکی از گزینه‌ها برای حل این گونه معادلات می‌باشد. در بررسی حاضر، از نرم افزار Ansys که در مسایل غیرخطی کاربرد دارد،



نیروها شامل نیروهای عمل کننده داخلی ناشی از تنش مواد سازنده رشته، نیروهای ناشی از ویسکوزیته سیال، نیروهای داخلی ناشی از شتاب اجزای متحرک و نیروی کشش کابل ها هستند. با جمع نمودن نیروهای بالا رابطه ۱ بدست می آید. [۱]

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} + Ku = EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

با تأثیر جرم اضافه ناشی از ویسکوزیته سیال (m)، رابطه ۱ به صورت زیر خواهد شد.

$$(\rho A + m) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} + Ku = EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2)$$

در رابطه ۲، m جرم اضافه ناشی از سیال و ضریب میرایی ناشی از ویسکوزیته سیال است که این دو پارامتر به ترتیب از روابط ۳ و ۴ بدست می آیند. همچنین با توجه به اثر تماس، طولانی بودن طول رشته و بروز رفتارهای غیر خطی، معادلات بالا به روش عددی صورت پذیرفت [۱].

### اثرات گل حفاری

در این تحقیق از اثرات هیدرولیکی گل حفاری چشم پوشی شده است و تنها به اثر لزجت آن پرداخته شده است. تأثیر ویسکوزیته سیال بر رشته حفاری به صورت جرم اضافه<sup>۲</sup> و میرایی<sup>۳</sup> است که در طول رشته توزیع شده است. (روابط ۳ و ۴) [۱].

$$m = 2\pi(a+b) \sqrt{\frac{\rho_m \mu}{2\omega}} \quad (3)$$

$$c_m = 2\pi(a+b) \sqrt{\frac{\rho_m \mu \omega}{2}} \quad (4)$$

### میرایی

میرایی، ترکیبی از استهلاک های مختلف (ناشی از سیال و برخوردها...) و تنش های درون سازه ای است. این استهلاک ها در حالت دینامیکی دامنه ای ارتعاشات رشته را کاهش می دهند [۲]. دارینگ [۲] تأثیر میرایی در حالت محوری را بررسی و منشأ میرایی را چهار عامل میرایی ویسکوز، میرایی تشعشی، میرایی اصطکاکی و مالشی و میرایی هیسترتیک داخلی ذکر کرده است.

### تأثیر وزن روی مته (WOB)

رشته حفاری در قسمت بالای دکل توسط سیستم بالابرنده، نگه داشته می شود. نیروی ناشی از کابل های نگهدارنده را نیروی هوک

کار افتادگی رشته حفاری پرداختند. آنها در این مطالعه، منابع اصلی تحریک را شناسایی کرده و با ارسال وسایل اندازه گیری ارتعاشات به درون چاه به این مسأله پی بردند که علت اصلی از کارافتادگی رشته حفاری، ارتعاشات جانبی، موقعیت، قطر و لقی پایدار کننده ها و تماس رشته با بدنه در قسمت پایین رشته است. سپس با تغییر محل پایدار کننده ها و لقی بین آنها و دیواره چاه، فرکانس های طبیعی و سرعت های بحرانی متفاوتی را به دست آوردند. تحلیل آنها در دو قسمت به صورت آنالیز استاتیکی غیرخطی دو بُعدی با تأثیر تماس رشته با بدنه و آنالیز ارتعاشات اجباری خطی با تأثیر دور چرخشی صورت پذیرفت و برای اثبات یافته های خود نمونه های متفاوتی از چاه های مختلف را مورد آزمایش عملی قرار دادند. آنها با انجام تحلیل استاتیکی، محلی که مجموعه ی پایین رشته به دیواره تکیه می کرد را پیدا نموده و با انجام تحلیل هارمونیک به تعیین فرکانس های طبیعی، سرعت های بحرانی و شکل مودهای سیستم بدون لحاظ نمودن اثرات گل حفاری پرداختند.

لی-هیون-یوپ (Lee HyonYup) [۱] به بررسی ارتعاشات محوری و انتشار موج در یک چاه پرداخت. کلیه ی بررسی ها و تحقیقات وی به صورت عملی روی چاه های نفت صورت پذیرفت. وی تأثیر ویسکوزیته گل، میرایی های مختلف، اتصالات، چرخش، نیروهای تحریک، شرایط مرزی و وزن روی مته را به طور مفصل بررسی کرده و از اثر هیدرولیکی گل حفاری چشم پوشی نمود. وی نتیجه گیری کرد که شرایط مرزی در قسمت پایین رشته، هنگامی که رشته بدون چرخش است، به شدت به وزن روی مته و هنگامی که در حال چرخش است، به دور چرخشی رشته (RPM) وابسته است. به همین سبب، سرعت های مطمئن (دور از سرعت بحرانی) جهت کارکرد دستگاه توسط ایشان پیشنهاد شد.

مک فرسون، جوجی و همکاران (J.D.Macpherson, N.Joji, et al) [۷و۸] به بررسی ارتعاشات مختلف رشته حفاری با نصب ابزار اندازه گیری ارتعاشات در نقاط مختلف رشته سرچاهی پرداختند. آنها با استفاده از این ابزار به محاسبه سرعت انتشار موج در لوله ها پرداخته و پاسخ های خود را با مدل های پیش بینی شده مقایسه و مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گیری کردند که اثرات گل حفاری در تغییر فرکانس های طبیعی محوری ناچیز است و پرش های مته که باعث ارتعاشات محوری می شود در فرکانس متفاوتی از فرکانس طبیعی محوری نیز اتفاق می افتد.

### معادلات حاکم

معادلات ساده حاکم بر ارتعاشات محوری رشته حفاری از مجموع نیروهای اعمالی در راستای ارتعاش رشته به دست می آید. این



ضخیم، مناسب بوده و بر اساس تئوری تیر تیموشنکو طراحی شده که تأثیرات تغییر شکل برشی را نیز در نظر می‌گیرد. المان ۱۸۸ Beam به صورت خطی (دونقطه) بوده و دارای شش و یا هفت درجه آزادی است و برای کاربردهای خطی و غیرخطی، چرخش‌ها و تغییر فرم‌های بزرگ مناسب است.

نرم افزار Ansys برای بررسی و تحلیل تیرهای موازی در حال تماس، المان تماسی "تیر با تیر" <sup>۱۴</sup> سه‌بعدی را که توانایی برقراری تماس بین دو تیر موازی، متداخل و متقاطع به شکل‌های مختلف (تماس سطوح صلب-انعطاف پذیر و انعطاف پذیر - انعطاف پذیر) را دارد، معرفی نموده است. با توجه به اینکه رشته و سازند به صورت دو لوله متداخل با هم تماس پیدا می‌کنند (شکل ۴)، بنابراین در این تحقیق از المان تماس "خط با خط" <sup>۱۵</sup> از زیر مجموعه تیر با تیر استفاده شده است.

یکی از عوامل اصلی در کنترل حرکات جانبی رشته در حین عملیات حفاری، دیواره چاه است که رشته در هنگام عملیات حفاری در نقاط مختلف به جداری داخلی آن برخورد می‌نماید. شرایط برخورد با توجه به مشخصات فیزیکی و هندسی رشته و سازند، گل

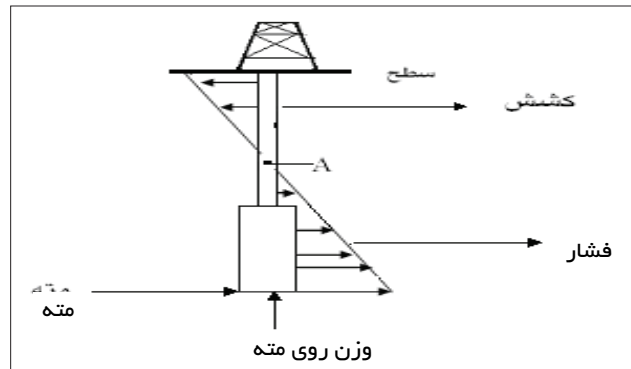
می‌نامند که همواره لوله‌های حفاری را در حالت کشش نگه می‌دارد. بخش پایین رشته به دلیل نیروی وزن رشته و درگیری مته-سازند، تحت فشار قرار می‌گیرد، ترکیب این دو نیرو ممکن است منجر به خمش ساق مته و نهایتاً کمانش رشته شود. وزن روی مته به عواملی چون نوع سازند، قطر چاه، نوع مته و انحراف چاه از موقعیت عمودی و نیروی کشش انتخابی در بالای رشته بستگی دارد. انتخاب نیروی کشش کابل‌ها در روی سطح باید با دقت صورت گیرد تا این که بتوان نیروی لازم جهت نفوذ مته برای حفر عمق مورد نظر به درون سازند به دست آورد. این وزن با کنترل نیروی کشش در روی سطح قابل تنظیم بوده و می‌توان میزان نفوذ مته و حفاری انجام شده را کنترل کرد، هرچه نیروی کشش در بالا بیشتر باشد، وزن روی مته کمتر خواهد شد (شکل ۳).

### مدل سازی

با توجه به انتخاب نرم افزار Ansys برای تحلیل عددی، در مدل‌سازی سه‌بعدی رشته‌ی حفاری و سازند، المان ۱۸۸ Beam انتخاب گردیده است. این المان برای تحلیل تیرها و سازه‌های نازک و گاهی

۱ | مشخصات ابعادی رشته‌ی حفاری شماره ۱ (۶۰۶ فوتی)

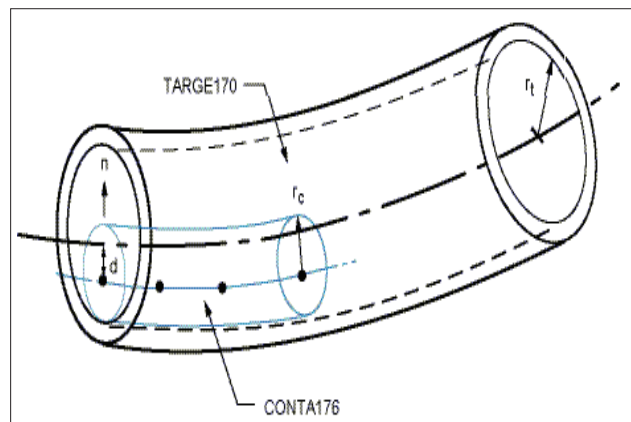
ردیف	نام قطعه	طول (فوت)	قطر خارجی (اینچ)	قطر داخلی (اینچ)	قطر پایدارکننده (اینچ)	مجموع طول (فوت)
۱	مته	۳/۲۵	۶/۲۵			۳/۳
۲	پایدارکننده	۶/۴۰	۴/۷۵	۲/۲۵	۶/۲۵	۹/۷
۳	لوله‌های وزنه	۳۰/۸	۴/۷۵	۲/۲۵		۴۰/۵
۴	پایدارکننده	۶/۶۰	۴/۷۵	۲/۲۵	۶/۲۵	۴۷/۰
۵	لوله‌های وزنه	۵۲۹/۱	۴/۷۵	۲/۲۵		۵۷۶/۲
۶	لوله‌های حفاری	۳۰/۴۲	۳/۵	۲/۰۶		۶۰۶



شکل ۳ | تغییرات تنش در طول رشته‌ی حفاری

۲ | مشخصات ابعادی رشته‌ی حفاری شماره ۲ (۵۲۶ فوتی) [۸۷]

ردیف	اجزاء	طول (فوت)	قطر خارجی (اینچ)	قطر داخلی (اینچ)	قطر پایدارکننده (اینچ)
۱	مته	۱	۱۲/۲۵		-
۲	پایدارکننده	۵/۱	۸/۲۵	۸/۲۵	۳/۰۰
۳	NBM: near bit mechanics tool/MWD	۵۱/۴۳	۸/۲۵	۲/۸۱	۱۲/۱۹
۴	پایدارکننده	۴/۶۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳/۰۰
۵	لوله‌های وزنه	۳۰/۳۰	۸/۰۰	۲/۸۱	
۶	پایدارکننده	۶/۵۵	۸/۰۰	۲/۸۱	۹/۸۸
۷	X/O	۲/۶۰	۷/۶۳	۳/۰۰	
۸	MWD	۴/۸۴	۶/۵۰	۲/۵۰	
۹	X/O	۱/۱۵	۶/۰۰	۲/۸۱	
۱۰	لوله‌های وزنه	۳۲۱/۸۵	۶/۳۸	۲/۲۵	
۱۱	لوله حفاری	۹۷/۳۳	۴/۵۰	۲/۸۱	



شکل ۴ | تماس داخلی دو تیر موازی

در این بررسی زاویه‌ی انحراف چاه یک درجه و طول هر المان برابر یک فوت در نظر گرفته شده است.

### مشخصات ابعادی رشته‌های مورد بررسی

جداول (۲۰۱) دو نمونه از رشته حفاری هستند که توسط بسایسو و پاسلای [۱۰]، برگس [۹] و پوشکار، مک فرسون [۷] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به همین دلیل برای اطمینان از پاسخ‌های به‌دست آمده در این تحقیق نیز از آنها استفاده شده است.

### شرایط مرزی مساله

برای اعمال شرایط رشته‌های مرزی فرض شده که رشته از پایین (در محل مته) توسط سازند و از بالا توسط کابل‌های نگهدارنده مهار شده است و در فواصل مختلف پایدار کننده‌ها به‌عنوان یک نقطه پین شده و وظیفه کنترل حرکات جانبی آنرا برعهده دارند ( $u_x = u_y = 0$ ). در پایین‌ترین و بالاترین نقاط یعنی در محل مته و صفحه دوار از حرکات جانبی (جابجایی و چرخش) جلوگیری به‌عمل آمده اما اجازه جابجایی و چرخش در امتداد رشته ( $u_x \text{ ROT} \neq 0$ ) داده شده است. در رشته شماره ۲ شرایط مرزی در محل مته ثابت و در محل صفحه دوار آزاد در نظر گرفته شده است.

### بحث و بررسی نتایج

فرکانس‌های طبیعی محوری و سرعت‌های بحرانی رشته دارای اهمیت ویژه و قابل ملاحظه‌ای هستند، بنابراین نیاز است این فرکانس‌ها و سرعت‌ها محاسبه و تعیین شوند. رشته حفاری شماره ۱ درغیاب گل حفاری با اعمال وزن ۱۵۰۰۰ پوندی بر روی مته مورد تحلیل قرار گرفت. حل عددی و پاسخ‌های مودال و هارمونیک این رشته در فاصله فرکانسی صفر تا سی هرتز برای مته‌های غلطکی سه‌مخروطی انجام شده است. تحلیل هارمونیک این رشته برای سه نقطه از آن بررسی شده است. اولین دو فرکانس طبیعی آن برابر ۷/۸۷۵ و ۲۳/۶۲۵ هرتز و سرعت‌های بحرانی حالت محوری در شکل ۵ نشان داده شده است. پاسخ‌های به‌دست آمده به‌علت در نظر نگرفتن اثرات گل حفاری با واقعیت موضوع مطابقت ندارد به‌همین منظور با احتساب اثرات گل موضوع پیگیری می‌شود.

با انتخاب گل با دانسیته  $\frac{Ib}{gal}$  ۹/۱۸، و ضریب شناوری ۰/۸۵۹، تحلیل‌های مودال و هارمونیک برای رشته شماره ۱ انجام شد که نتایج فرکانس‌های طبیعی محوری در جدول ۳ و شکل ۶ نشان داده شده است. پاسخ‌های به‌دست آمده با مقادیر تجربی که توسط بسایسو (Besaisow) [۱۰] به‌دست آمده، مقایسه شده‌اند. در جدول ۴ مقایسه فرکانس‌های

حفاری، سرعت چرخشی و نحوه‌ی عملیات حفاری برای رشته‌های مختلف، متفاوت خواهد بود. از طرفی به‌دلیل تاثیر عوامل مختلف، رفتار دینامیکی سیستم پیچیده و پیش‌بینی نشده است. در نتیجه نمی‌توان یک رفتار ساده و خطی از پیش تعیین شده‌ای برای آن در نظر گرفت. بدین سبب، بررسی رفتار دینامیکی و تماس رشته با دیواره به‌صورت غیرخطی خواهد بود. تماس رشته با بدنه به وزن، طول، هندسه رشته، ویسکوزیته گل حفاری و شرایط مرزی وابسته است. جفت سطح‌هایی که با هم در تماس هستند، "جفت سطوح تماسی" نامیده می‌شوند و تحت عنوان سطح تماس دهنده (Contact) و سطح هدف (Target) معرفی می‌گردند. این سطوح ضرورتاً دارای اندازه یکسان نیستند.

### مشخصات فیزیکی رشته

فرض شده است لوله‌های حفاری از لوله‌های فولادی G و لوله‌های وزنه از فولاد AISI 4151H تشکیل شده است.

### هندسه و مدل‌سازی مساله

دستگاه مختصات کارتزین روی رشته‌ی حفاری نصب می‌شود، به‌نحوی که مرکز این دستگاه روی مته واقع شده و محور Z در راستای رشته حفاری قرار می‌گیرد. هنگام عملیات حفاری به‌دلیل حرکات پیچیده رشته و شرایط سازند، رشته از امتداد قائم منحرف شده و با این امتداد زاویه پیدا می‌کند. معمولاً این زاویه بین نیم تا یک درجه است.

۳ | فرکانس‌های طبیعی محوری اول و دوم (هرتز) رشته ۱ در حضور گل حفاری

مقادیر تجربی		مدل پاسلای		ANSYS	
فرکانس اول	فرکانس دوم	فرکانس اول	فرکانس دوم	فرکانس اول	فرکانس دوم
۷/۷۶	۱۶/۰۵	۷/۹۵	۱۵/۹۰	۷/۷۴	۲۲/۸۷

۴ | فرکانس‌های طبیعی محوری رشته ۲ با مدل‌های پیش‌بینی شده

مود	ANSYS (HZ)	WHIRL (HZ)	NATFREQ (HZ)	BHASYS (HZ)	MEAEASURED (HZ)
۲	۹/۷۶	۸/۵۳	۸/۷	۹/۰۶	۹/۷
۴	۲۷/۶	۲۴/۸۶	۲۵/۴	۲۶/۰۱	۲۶/۳
۵	۴۱/۲۶	۳۹/۴۳	۴۰/۱	۴۰/۷۴	۴۰/۳
۶	۵۳/۷۱	۵۴/۰۲	۵۵/۰	۵۶/۶۰	۵۶/۶۰
۷	۶۹/۹۴	۷۰/۳۷	۷۱/۷	۷۴/۴۸	۷۱/۳
۸	۸۹/۰۵	۸۷/۳۴	۸۹/۰	۹۲/۰۶	۸۸/۴
۹	۱۰۷/۶۶	۱۰۳/۴	۱۰۵/۲	۱۰۳/۴	۱۰۴/۸



دانسیتته رشته شده و این افزایش بر روی فرکانس ارتعاشات مجموعه تأثیر گذار است (رابطه ۳). اسپانوس و همکارانش نشان دادند که اثر گل درون رشته‌ی حفاری در افزایش جرم سیستم ناچیز است و فقط گل موجود در فضای حلقوی چاه است که باعث افزایش جرم می‌شود [۱۱]. در تحلیل هارمونیک به عمل آمده با داده‌های جدول ۱، تأثیر دانسیته‌ی گل حفاری (۸/۳۵، ۹/۱۸ و ۱۳/۳۵ پوند بر گالن) بر فرکانس‌های طبیعی محوری مطابق شکل ۸ است.

مشاهده می‌شود با افزایش دانسیته‌ی گل حفاری، فرکانس‌های طبیعی محوری بطور جزئی کاهش می‌یابند. علت این موضوع این است که با افزایش دانسیته، افزایش وزن گل فضای حلقوی به‌عنوان جرم اضافه (Added Mass) در افزایش جزئی وزن مجموعه (رابطه ۳) تأثیر گذار است. این افزایش حدود یک تا سه درصد وزن رشته می‌باشد (در ارتعاشات عرضی تأثیر افزایش جرم ناشی از افزایش وزن گل فضای حلقوی ۲۵-۳۰ درصد وزن رشته می‌باشد). این افزایش جزئی، بار فشاری روی مته را افزایش می‌دهد و سختی رشته کمتر شده، موجب کاهش فرکانس مجموعه می‌شود.

### اثر زاویه انحراف چاه بر فرکانس‌های طبیعی محوری رشته‌ی حفاری

یکی از عوامل اصلی در نرخ نفوذ مته در حین عملیات حفاری،

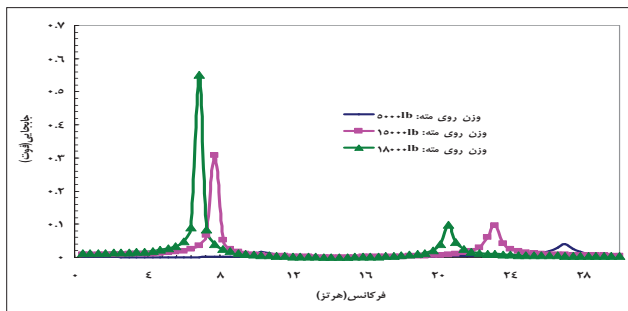
طبیعی محوری رشته‌ی شماره ۲ با وزن روی مته ۲۶۰۰۰ پوند و گل با دانسیته  $\frac{11}{6} \frac{\text{lb}}{\text{gal}}$  با مدل‌های پیش‌بینی شده و تجربی پوشکار و مک فرسون [۷ و ۸] نشان داده شده است.

### تأثیر وزن روی مته بر فرکانس‌های طبیعی محوری

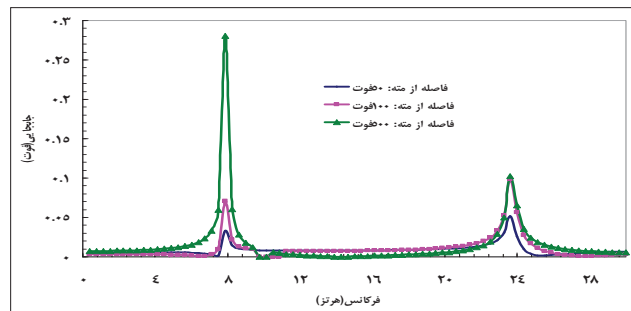
به دلیل تقابل وزن سنگین رشته و کشش کابل‌های نگهدارنده، مقدار وزن زیادی روی مته ایجاد می‌شود که با کنترل آن می‌توان میزان حفاری و نرخ نفوذ مته را کنترل نمود. بنابراین برای تأثیر این پارامتر بر روی فرکانس‌های طبیعی محوری، رشته در بارهای روی مته مختلف (۵، ۱۵، ۱۸ هزار پوند) در حالت بدون چرخش مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۷ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که از شکل پیداست با افزایش وزن روی مته، فرکانس‌های طبیعی محوری کاهش می‌یابند. علت این موضوع کاهش سختی رشته یا افزایش وزن روی مته و بار فشاری است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که افزایش وزن روی مته، دامنه نقاط ماکزیمم را نیز افزایش می‌دهد.

### تأثیر دانسیته گل حفاری بر فرکانس‌های طبیعی محوری و سرعت‌های بحرانی

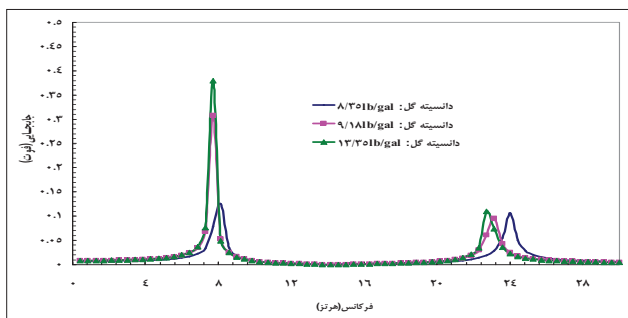
ویسکوزیته‌ی گل حفاری بطور جزئی باعث افزایش جرم و



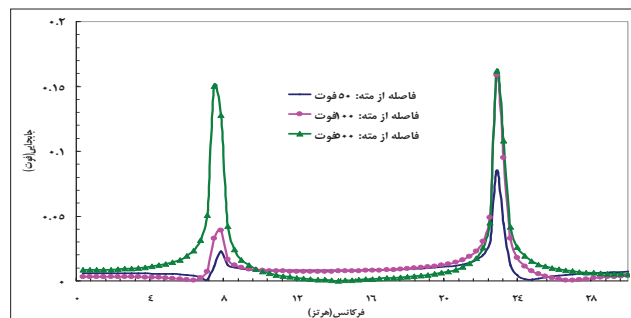
شکل ۷ | جابجایی محوری رشته ۱ در حضور گل حفاری تحت بارهای مختلف روی مته



شکل ۵ | جابجایی محوری رشته ۱ در غیاب گل حفاری



شکل ۸ | جابجایی محوری رشته ۱ در دانسیته‌ی مختلف گل



شکل ۶ | جابجایی محوری رشته ۱ در حضور گل حفاری

مته سه مخروطی به صورت محوری با جابجایی سینوسی و فرکانس سه برابر چرخش در نظر گرفته شده است. همچنین تأثیر سرعت زاویه‌ای به صورت جابجایی چرخشی و اعمال آن به صورت پله‌ای متناسب با زمان چرخش در آخرین گره (صفحه دوار) انجام شده است. دامنه این تحریک به میزان ۱/۱ اینچ انتخاب شده است.

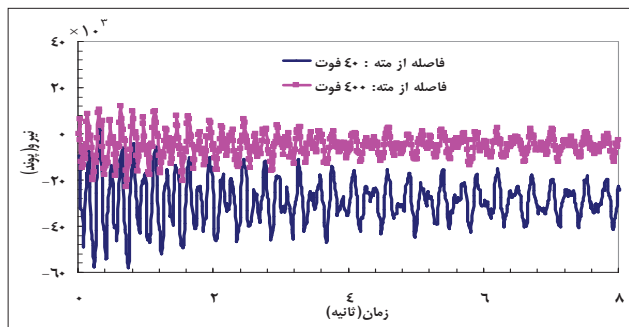
برای اینکه رفتار ارتعاشی در حوزه‌ی زمان بررسی شود، رشته در سرعت‌های چرخشی متفاوت (سرعت بحرانی و کمتر از آن) دوران داده شده است. ابتدا رشته‌ی حفاری با سرعت ۷۵ دور بر دقیقه (کمتر از سرعت بحرانی) دوران داده شده است. در این حالت عملیات حفاری به صورت هموار انجام می‌شود. پاسخ‌های جابجایی و نیروی محوری در حوزه‌ی زمان رشته‌ی حفاری برای این سرعت در دو نقطه متفاوت ۴۰ و ۴۰۰ فوتی از مته به ازای جابجایی اولیه و به صورت سینوسی به اندازه ۰/۱ اینچ در محل مته بدست آمده است که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در این سرعت رشته وضعیت پایداری دارد. سپس رشته حفاری در سرعت ۱۵۵ دور بر دقیقه (سرعت بحرانی پیش بینی شده) دوران داده شده است. این سرعت متناسب با اولین فرکانس طبیعی به دست آمده از رشته شماره ۱ با احتساب مته سه مخروطی طبق جدول ۳ است. پاسخ‌های ارتعاشی مربوط به جابجایی و نیرو در حالت محوری سیستم در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. در این حالت، برخورد رشته‌ی حفاری با دیواره‌ی چاه و پرش‌های پی‌درپی

وزن رشته حفاری است. چنانچه این وزن در راستای محور اصلی رشته (Z) قرار گیرد، بیشترین نرخ نفوذ در محل مته ایجاد می‌شود. معمولاً در هنگام حفاری به دلیل حرکات رشته و شرایط سازند، رشته از امتداد قائم منحرف شده و با این امتداد زاویه پیدا می‌کند. به همین دلیل بخشی از وزن رشته در امتداد محور دیگری قرار می‌گیرد و در نتیجه وزن رشته در امتداد محور اصلی کمتر خواهد شد و باعث افزایش سختی رشته می‌شود. برای بررسی این موضوع رشته شماره ۱ با زوایای انحراف ۵/۵، ۱/۵ و ۳ درجه با آنالیزهای هارمونیک مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است.

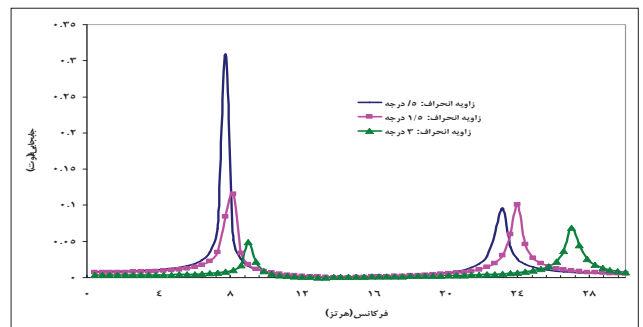
باتوجه به شکل ۹ با افزایش زاویه انحراف چاه، فرکانس‌های طبیعی محوری و سرعت‌های بحرانی افزایش یافته است. علت این موضوع در حقیقت کم شدن اثر وزن رشته در راستای محور رشته است که درگیری مته با کف چاه را کمتر نموده و به سبب اینکه نیروی کشش از بالا ثابت است، سختی رشته بیشتر شده و در نتیجه فرکانس‌های طبیعی محوری افزایش یافته است.

## بررسی آنالیز گذرا در حل مسأله ارتعاشات محوری رشته‌ی حفاری

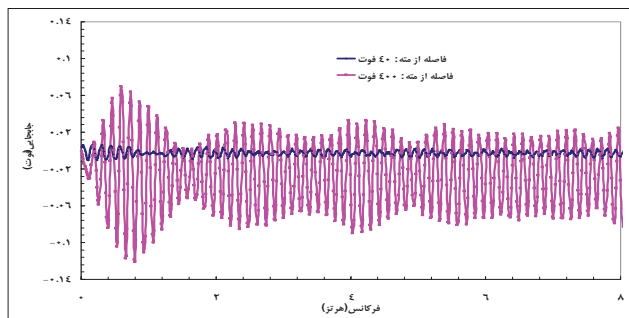
در این بررسی به تحلیل گذرای رشته شماره ۱ با تأثیرات جرم اضافه و میرایی ناشی از گل حفاری پرداخته شده است. تحریک رشته در محل



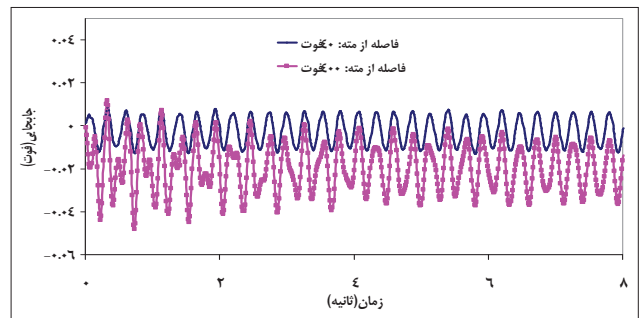
شکل ۱۱ | تغییرات نیروی محوری رشته ۱ در سرعت ۷۵ rpm



شکل ۹ | جابجایی محوری رشته ۱ در زوایای مختلف انحراف



شکل ۱۲ | جابجایی محوری رشته ۱ در سرعت ۱۵۵ rpm



شکل ۱۰ | جابجایی محوری رشته ۱ در سرعت ۷۵ rpm



سیستم، نقش جزئی در جابجایی فرکانس‌های طبیعی محوری و سرعت‌های بحرانی رشته‌ی حفاری دارد. علت این موضوع این است که گِل بین رشته و دیواره به علت پیوستگی سیال، بالا و پایین نمی‌شود و فقط رشته جابجا می‌شود. (۳) وزن روی مته در تغییر فرکانس‌های طبیعی محوری و دامنه ارتعاشات نقش اساسی دارد. این پارامتر به علت تقابل وزن رشته و نیروی کشش کابل‌ها بوجود آمده و تغییرات آن در سختی رشته تأثیرگذار است و بدین گونه فرکانس‌های طبیعی محوری را متأثر می‌کند.

(۴) ارتعاشات محوری مانند یک موج به سطح منتقل می‌شوند و قسمت بالایی رشته نسبت به بخش پایین، دامنه ارتعاشات بزرگتری را تجربه می‌نماید. این در حالی است که تحریک محوری رشته از بخش پایین (مته) اعمال شده است.

(۵) افزایش زاویه انحراف چاه باعث افزایش فرکانس‌های طبیعی محوری می‌شود. افزایش زاویه در حین عملیات حفاری به دلیل نوع حرکات رشته و شرایط سازند بوجود می‌آید. با توجه به منحرف کردن بخشی از وزن رشته نسبت به امتداد محور آن، اثر وزن در راستای ارتعاش محوری را کمتر شده و سختی رشته بالا می‌رود که فرکانس‌های طبیعی محوری را متأثر کرده بگونه‌ای که افزایش زاویه باعث افزایش فرکانس‌های طبیعی محوری می‌شود.

مته با شدت بیشتری رخ داده و تکرار می‌شود و همان‌گونه که قابل پیش‌بینی بود با توجه به بحرانی بودن سرعت، رشته تغییرات دامنه‌ی بزرگتر و آشفته‌تری را تجربه می‌کند که این بزرگتر بودن دامنه‌ها در درازمدت ممکن است اثرات سوء و زیانباری را به اجزای رشته‌ی حفاری و دستگاه حفاری وارد و خسارات جبران‌ناپذیری را به بار آورد. بنابراین باید تا حد امکان از انجام عملیات حفاری در سرعت بحرانی پرهیز نمود. همچنین به علت نزدیک بودن فرکانس تحریک با فرکانس طبیعی مجموعه پدیده تپش کاملاً مشهود است.

### نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج حاصله می‌توان نکات زیر را به عنوان نتیجه‌گیری برشمرد:  
 (۱) برخورد رشته‌ی حفاری با دیواره چاه و مشخص کردن موقعیت شروع تماس آن در تعیین و جابجا کردن فرکانس‌های طبیعی محوری بی‌تأثیر است. محل این نقطه که با استفاده از تحلیل غیرخطی استاتیک به دست می‌آید، بستگی به تعداد، موقعیت و قطر پایدارکننده‌ها، شرایط مرزی، طول رشته، نوع گل حفاری و قطر چاه دارد.  
 (۲) تأثیر گل حفاری به صورت شناوری، میرایی و افزایش جرم اضافه

### پانویس‌ها

<sup>1</sup>Drill String  
<sup>2</sup>Drill Collar  
<sup>3</sup>Stabilizers  
<sup>4</sup>Tools joint  
<sup>5</sup>Kelly  
<sup>6</sup>Formation

<sup>7</sup>Resonance  
<sup>8</sup>Bottom Hole Assembly  
<sup>9</sup>Rate of Penetration  
<sup>10</sup>Finite Difference Method  
<sup>11</sup>Material Stress  
<sup>12</sup>Added Mass

<sup>13</sup>Damping  
<sup>14</sup>Beam to Beam  
<sup>15</sup>Line to Line  
<sup>16</sup>Contact Pairs

### منابع

- [1] Hyon-Yup-Lee, "Reporting and Wave Propagation in Borhole" MIT, Department of Ocean Engineering Supervised by J.K. Vandiver, June 1991.
- [2] Daing, D.W.; Livesay, B.J. "Longitudinal and Angular Drill String Vibration With Damping", Journal of Engineering for Industry, PP.671-679, November 1968.
- [3] Bailey, J.J.; and Finnie, I., "An Analytical Study of Drill String Vibration", Journal of Engineering for Industry", TRANS. ASME vol. 82, No. 2, May 1960.
- [4] Paslay, P.R.; Jan, Yih-Min., Cpherson, J.D., "Detection of BHA Lateral Resonances While Drilling With Surface Longitudinal and Torsional Sensors" SPE 24583 Presented Washington, DC, October 1992.
- [5] Khaja, Z. Khan. "Longitudinal and Torsional Vibration of Drill String". Master Thesis MIT, May 1986.
- [6] Y.A. Khulif, H. Alnaser, "Finite Element Dynamic Analysis of Drill String" Elsevier PP.1270-1288, 2005.
- [7] Pushkar N. Jogi., John D. Macpherson. "Field Verification of Model-Driven Natural Frequencies of a Drill String," Presented at the 1999 Energy-Sources Technology Conference, Houston, TX, February.
- [8] Macpherson, J.D., Joji P., and Kingman, J.E., 1998, "Application and Analysis Simultaneous Near Bit and Surface Dynamics Measurements," Paper SPE 39397 Presented at the 1998 IADC/SPE drilling conference, Dallas, TX, March, pp. 857-869.
- [9] Burgess, T.M.; MC, Daniel, G.L. and Das P.K. "Improving BHA Tool Reliability With Drilling Vibration Models Field Experience and Limitations" SPE/IADC 16109, Presented at 1987 SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, LA, March, 1987.
- [10] Besaisow, A. and Payne L. Milk; "A Study of Excitation Mechanisms and Resonances Inducing Bottom Hole Assembly Vibrations", SPE Drilling Engineering, March 1988, PP. 93-101
- [11] Spanson, P.D. Rice, U. and Payne, M.L. "Advanced in Dynamic Bottom Hole Assembly Modeling and Response Determination", IADC/SPE 23905, Presented at 1992 IADC/SPE Conference, New Orleans, February.