

بررسی و تعیین عامل اصلی واماندگی های غیرعادی رشته حفاری در میادین نفتی گچساران و بی بی حکیمه ایران

رحمت الله قاجار

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

غلامرضا راشد

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۸۳/۹/۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۱۲/۸، تاریخ تصویب ۸۴/۲/۳)

چکیده

واماندگی های^۱ بیش از حد و غیر عادی رشته حفاری^۲ در حفر یکی از چاههای نفت حوزه خاصی از میادین نفتی جنوب ایران، برای نمونه ارائه شده است. در این مقاله تلاش گردیده تا این مسئله به طور دقیق تعریف گردیده و محل، نحوه و علت بوجود آمدن آن بیان شود. دلایل احتمالی و راه حل های عملی این مسئله مورد ارزیابی قرار گرفته است. نشان داده شده است که پدیده گیر و رهاش^۳ (ارتعاش پیچشی) رشته حفاری به دو دلیل، محتمل ترین علت واماندگی بیش از حد و غیر عادی لوله های حفاری^۴ در این حوزه خاص بوده است: اولاً واماندگی های بیش از حد و غیر معمول، تنها در سازنده^۵ به خصوصی رخ می دهند، ثانیاً این سازنده نسبت به سازندهای دیگر سخت تر و با جذب گل حفاری، چسبناک تر می باشد. همچنین بیان گردیده که ارتعاشات پیچشی خود تحریک رشته حفاری، به دلیل کوپله بودن سه نوع ارتعاشات پیچشی، محوری و عرضی (جانبی، خمشی) می تواند ارتعاشات محوری و عرضی شدیدی نیز در تجهیزات پایین چاه بوجود آورده و باعث آسیب آنها شود. با بررسی مدل دینامیکی و شناخت بهتر رفتار دینامیکی رشته لوله حفاری، پیشنهادهای برای کاهش واماندگی های بیش از حد مشاهده شده در این منطقه خاص، ارائه گردیده است.

واژه های کلیدی: واماندگی، رشته حفاری، لوله حفاری، پدیده گیر و رهاش، سازنده

مقدمه

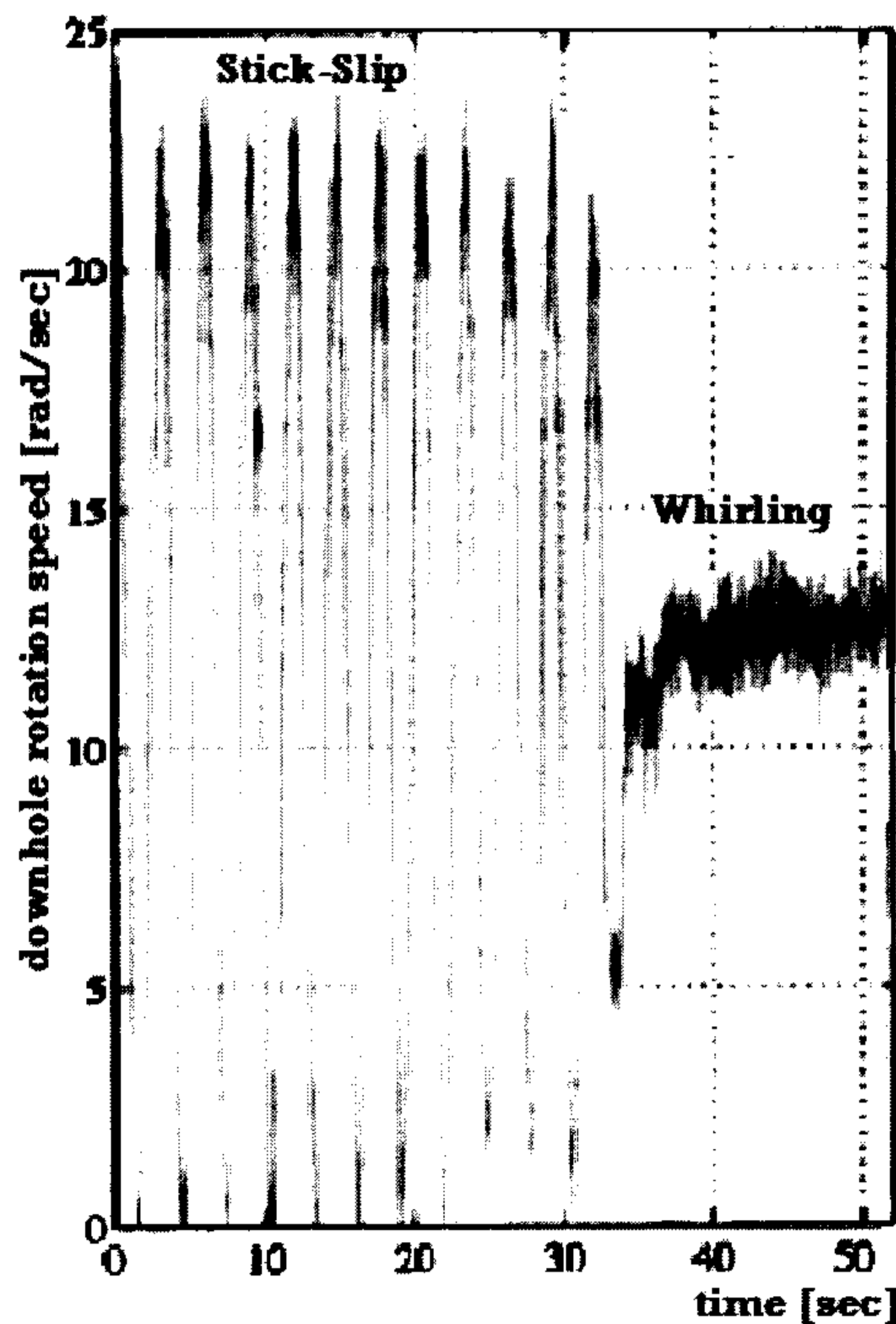
های سنگین عملیاتی گردیده است (در مناطق دیگر آن حوزه نفتی معمولاً ۱ تا ۲ مورد DSF در هر چاه گزارش شده است). جزئیات DSF در چاه A27 ایران که از موارد واماندگی بیش از حد و غیر عادی در منطقه خاص مذکور بوده در جدول (۱)، و شماتیک چاه نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.

سه نوع ارتعاشات رشته حفاری یعنی محوری، پیچشی و عرضی، می تواند در طی حفاری دورانی رخ دهد [۱]. این ارتعاشات در حفاری چاه های قائم یا با زاویه انحراف کم، به دلیل امکان آزادانه تر حرکت رشته حفاری در چاه نسبت به چاه های با زاویه انحراف زیاد، شدیدتر، و غالب می باشد. بیشترین نمود قابل تشخیص ارتعاشات پیچشی دائم، پدیده گیر و رهاش بوده که به دلیل اصطکاک بین مته و سازنده یا دیواره چاه و رشته حفاری بوجود می آید. پدیده گیر و رهاش شامل دو فاز گیر و رهاش بوده که

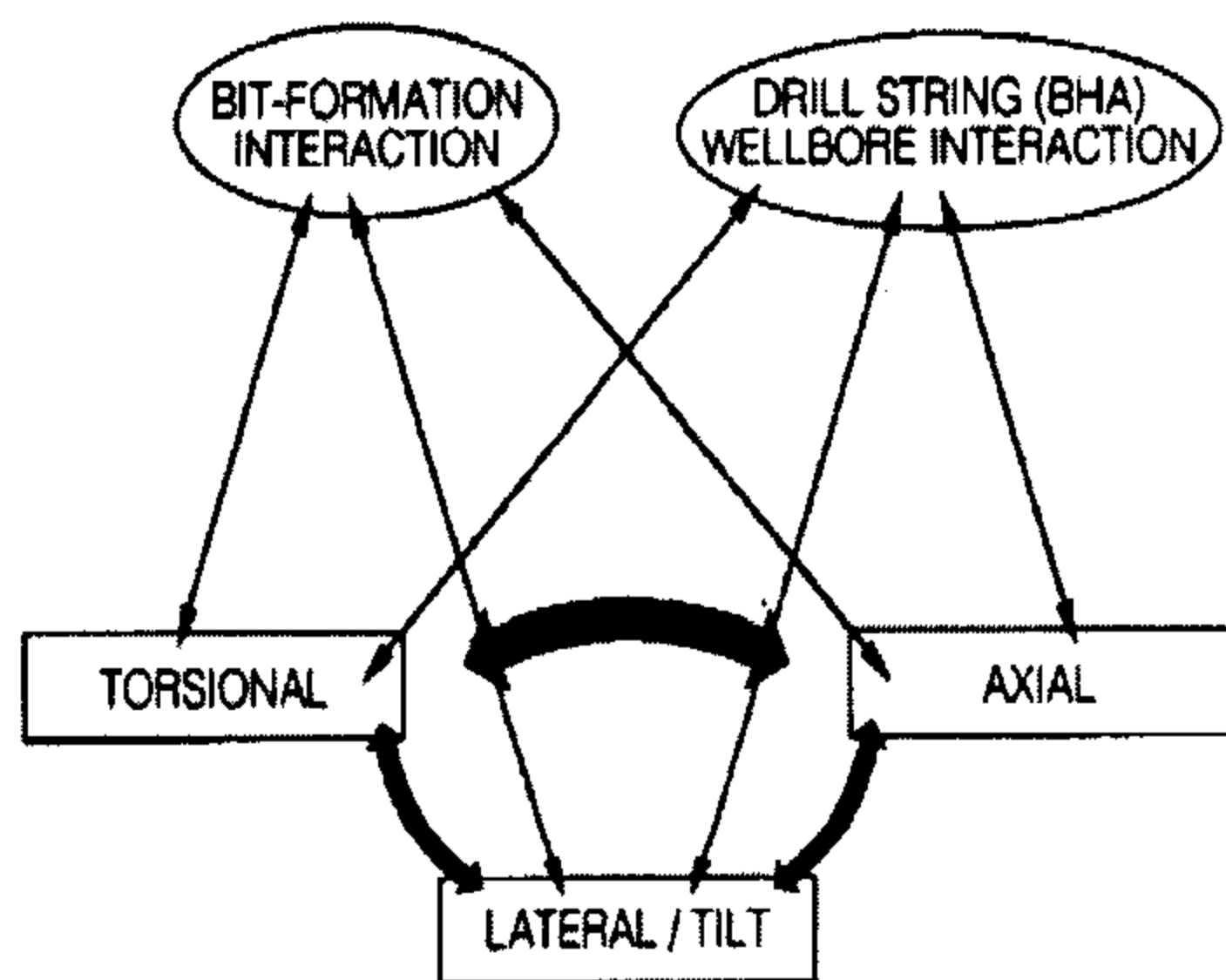
حفاری چاههای عمیق نفت و گاز توسط سیستم حفاری دورانی صورت می گیرد. واماندگی های رشته حفاری (DSF^۶) در این سیستم ها، هزینه های حفاری را به طور چشمگیری بالا می برند. معمولاً پیامد یک مشکل حفاری، مشکلی دیگر است. پیامد DSF می تواند: از دست رفتن مجموعه تجهیزات پایین چاه (BHA^۷)، کند شدن مته، عدم پایداری چاه و... باشد. رشته حفاری در معرض نیروهای مختلفی می باشد که یکی از مضرترین آن ها نیروهای ناشی از ارتعاشات آن است. طراحی نامناسب BHA، انتخاب نادرست پارامترهای حفاری، سازنده صخره ای سخت و چسبناک، می تواند به ارتعاشات ناخواسته منجر گردد. در منطقه خاصی از حوزه نفتی جنوب ایران (میادین بی بی حکیمه و لیشر شمالی)، تعداد ۱۰ تا ۷۰ مورد DSF در هر چاه گزارش شده، که باعث صرف هزینه

جدول ۱: جزئیات گزارش شده آسیب های رشته حفاری در چاه A27 جنوب ایران.

وضعیت سازند	عمق حفاری [متر]	قسمت آسیب دیده رشته حفاری - محل آسیب آن
سازند کم خطر	۰ تا ۷۸۲	واماندگی رشته حفاری دیده نشده است
سازند کم خطر	۷۸۲	لوله حفاری - بدنه ^۸
سازند کم خطر	۸۱۳	لوله حفاری - بدنه
سازند کم خطر	۸۸۸	لوله حفاری - بدنه
سازند کم خطر	۹۲۹	لوله حفاری - بدنه
سازند کم خطر	۱۰۶۲-۱۰۶۷-۱۰۵۳-۹۹۴	لوله حفاری - قسمت انحنا دار یا منطقه شیبدار ^۹ لوله حفاری (آپست)
سازند کم خطر	۱۰۸۶-۱۰۹۵-۱۱۵۱-۱۱۸۱	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۴۳۰-۱۴۰۰-۱۳۹۳-۱۳۶۵	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۴۸۹	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری و لوله وزین
سازند پرخطر	۱۵۰۱	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۵۲۸	لوله حفاری - بدنه
سازند پرخطر	۱۵۳۵	لوله حفاری - بدنه
سازند پرخطر	۱۵۴۱	لوله حفاری - بدنه
سازند پرخطر	۱۵۴۳	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۵۵۴	لوله حفاری - بدنه
سازند پرخطر	۱۵۵۶	لوله حفاری - بدنه
سازند پرخطر	۱۵۶۶	لوله حفاری - بدنه و لوله وزین ^{۱۰}
سازند پرخطر	۱۵۳۱-۱۵۸۰-۱۵۷۶-۱۵۶۹	لوله حفاری - بدنه
سازند پرخطر	۱۶۳۷	لوله حفاری - شکستن پیچشی بدنه لوله
سازند پرخطر	۱۶۹۷-۱۶۸۴	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۷۱۷-۱۷۱۳	لوله حفاری - تبدیل ^{۱۱}
سازند پرخطر	۱۷۲۱	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۷۵۹-۱۷۴۸-۱۷۳۸	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۷۷۰	لوله وزین
سازند پرخطر	۱۸۵۰-۱۸۳۳-۱۷۹۵-۱۷۸۱	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۸۶۸-۱۸۶۵-۱۸۶۴-۱۸۵۳-۱۸۵۱	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۸۷۰/۵	لوله وزین
سازند پرخطر	۱۸۹۲-۱۸۶۹-۱۸۸۴-۱۸۷۸-۱۸۷۳	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۹۲۵	لوله وزین
سازند پرخطر	۱۹۲۹	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۹۳۱	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۹۶۲	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۱۹۷۰-۱۹۶۶	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۲۰۳۱	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۲۰۳۶	لوله حفاری - منطقه شیبدار لوله حفاری
سازند پرخطر	۲۱۰۰	واماندگی رشته حفاری دیده نشده است
سازندهای بی خطر	۳۵۰۰-۲۱۰۰	واماندگی رشته حفاری دیده نشده است

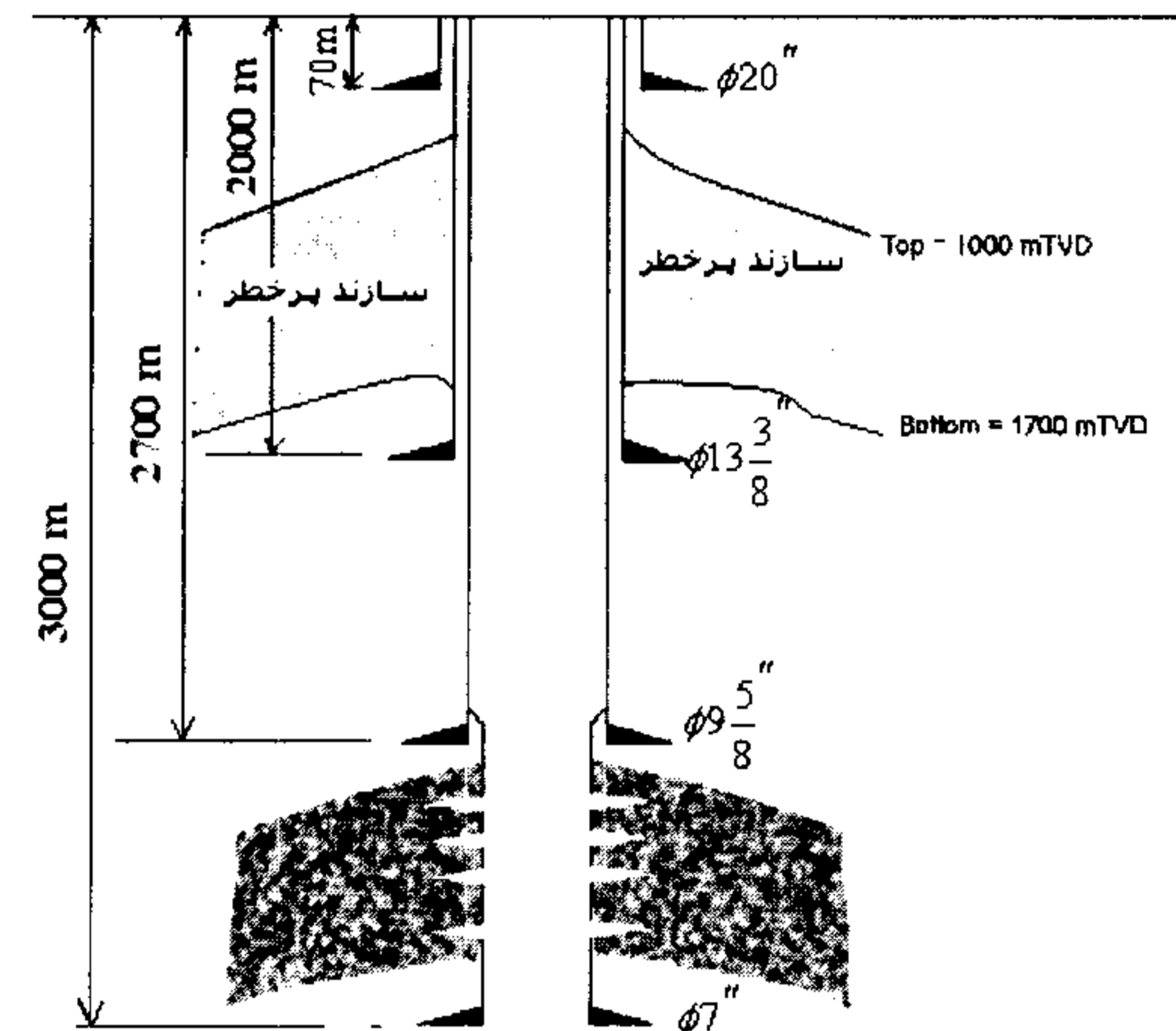


شکل ۲: تبدیل پدیده گیر و رهایش به پدیده لنگ زدن با افزایش سرعت میز دوار [۱].



شکل ۳: اثر متقابل مکانیزم های پایین چاه.

معادلات پایه برای تحلیل دینامیکی رشته حفاری توسط لی [۸] بیان شده است. یک روش میدانی (در محل عملیات حفر چاه) نیز برای کنترل ارتعاشات پیچشی رشته حفاری در مرجع [۹] تشریح گردیده است. گر چه تلاش های اخیر موفقیت هایی جهت کنترل نوعی از ارتعاشات را به همراه داشته است، اما هنوز هم کنترل همزمان هر سه نوع ارتعاشات به طور کامل بررسی نگردیده است. در این جا تا حدی که به مسئله بررسی واماندگی مورد نظر مربوط می شود به ملاحظه همزمان انواع ارتعاشات رشته حفاری خواهیم پرداخت.



شکل ۱: شماتیک چاه A27.

فاز گیر کردن آن وقتی است که لوله حفاری در سطح چاه (میز دوار) با سرعت ثابت دوران می کند اما مته به دلیل اصطکاک با سازند (یا BHA با دیوار چاه) متوقف است و فاز رهایش وقتی است که بعد از مدت کوتاهی توقف مته، گشتاور پیچشی کافی ذخیره شده در سیستم رشته لوله حفاری، بر گشتاور مقاوم مته با سازند، غلبه کرده و با سرعتی چند برابر سرعت میز دوار، لغزش و دوران مته شروع می شود. ارتعاشات پیچشی خود تحریک بوده [۲] و معمولا با افزایش سرعت دورانی میز دوار و گذر از یک سرعت دورانی آستانه، ناپدید می شود [۱]. اما با این افزایش سرعت و ناپدید شدن ارتعاشات پیچشی، همزمان ارتعاش عرضی و پدیده لنگ زدن وارونه رشته لوله حفاری، ضربه خوردن به دیواره چاه و ناپایداری آغاز می شود، شکل (۲) [۱]. نتیجه آن که جهت رسیدن به بازه های سرعت مطمئن حفاری، بررسی و شناخت بهتر رفتار دینامیک کوپله رشته حفاری ضروری می باشد، شکل (۳). به همین دلیل در سال های اخیر، ارتعاشات رشته لوله حفاری و راه های کنترل آنها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. بطوریکه نحوه کوپلینگ بین ارتعاشات پیچشی و طولی (محوری) رشته حفاری در مرجع [۳].

ارتعاشات خمشی و پدیده لنگ زدن لوله های وزین رشته حفاری در مرجع [۴]، پایداری دینامیکی رشته حفاری تحت بارهای نوسانی روی مته در مرجع [۵]، و پدیده گیر و رهایش در مراجع [۶، ۷] مطالعه و بررسی شده است.

معادلات حرکت رشته حفاری درون چاه های نفت و گاز

رشته حفاری در حالت الاستیک دارای پیچیده ترین حالات حرکت شامل حرکت دورانی، محوری، لنگ زدن و ارتعاشات محوری (طولی)، پیچشی و جانبی می باشد.

فرضیات

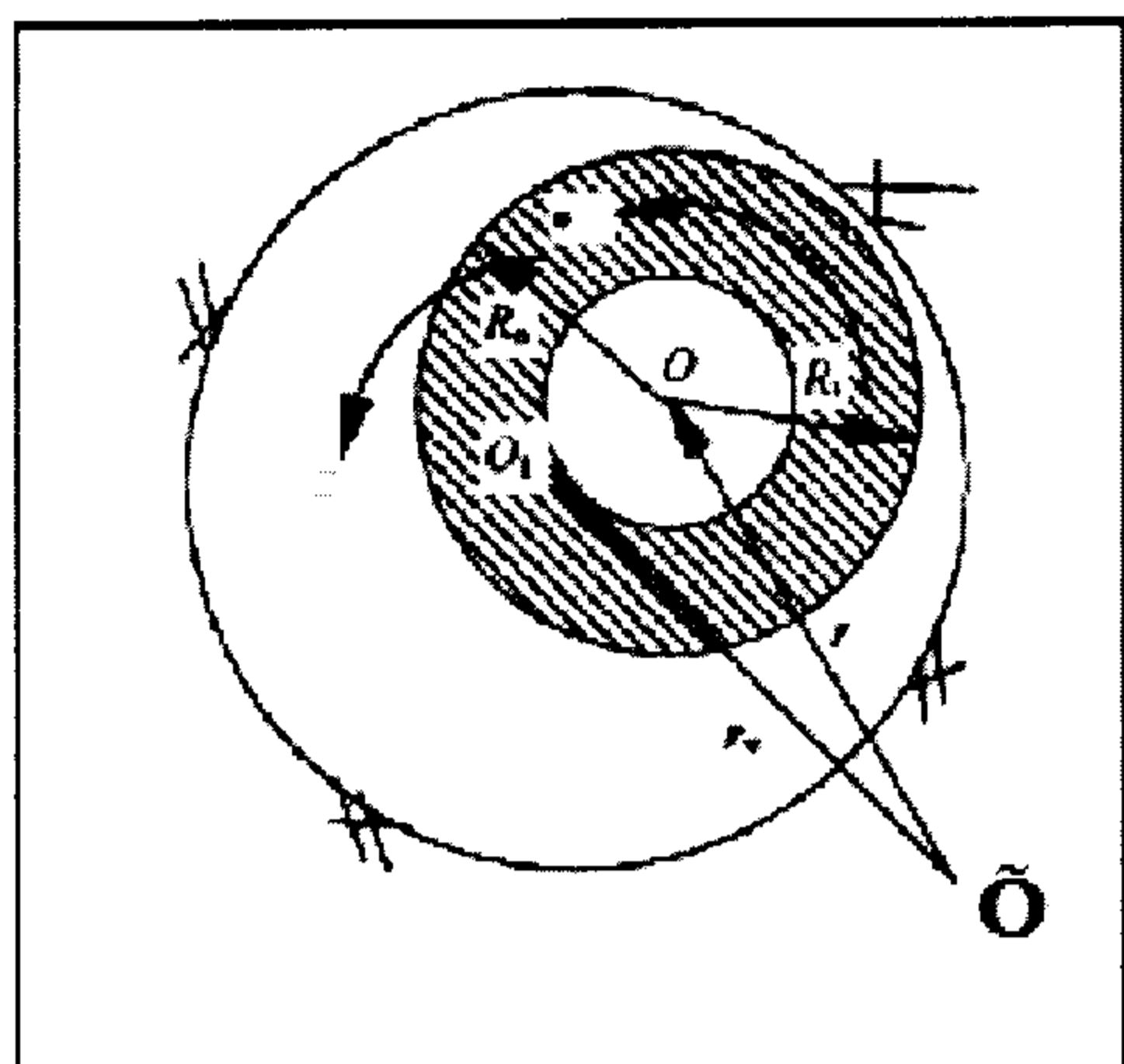
- ۱- رشته لوله حفاری به عنوان جسم الاستیک خطی در نظر گرفته می شود.
- ۲- مقاطع رشته لوله حفاری، مدور بوده و خواص مادی آن ثابت باقی می ماند.
- ۳- از اثر تنش برشی روی تغییر شکل صرف نظر می شود.

• **سیستم مختصات:** در حالت کلی دو سیستم مختصات راست گرد به صورت مجزا به کار برده می شوند، شکل (۴).

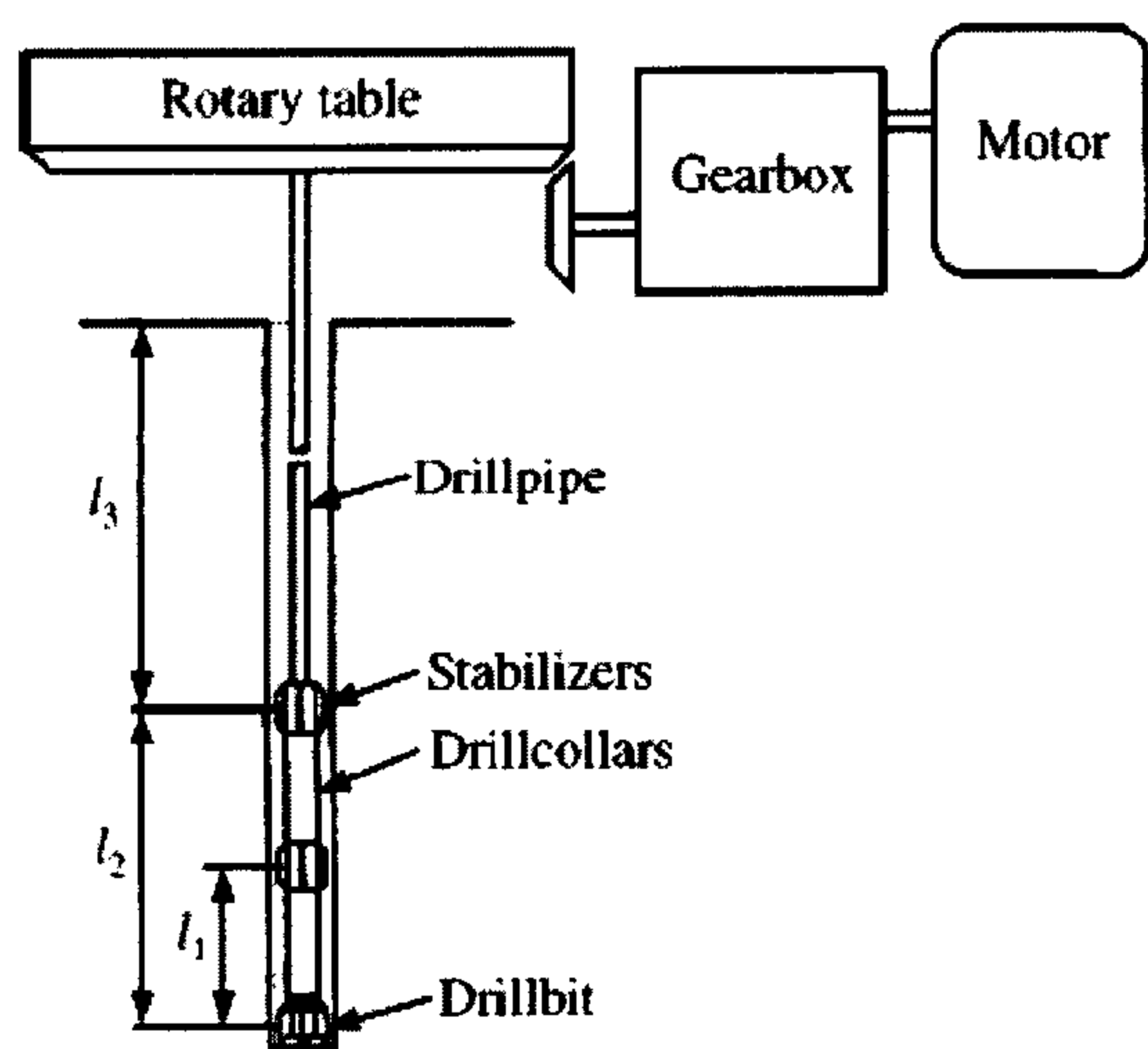
- ۱- سیستم مختصات کلی ثابت با بردارهای یکه ثابت نسبت به جهات قطب نما و مبدأ O در بالا یا پایین چاه.
- ۲- سیستم مختصات محلی (r, θ, z) که در مسیر خط مرکزی رشته لوله حفاری تعریف می شود.

حال می توان مطابق معمول معادلات هندسی، معادلات تعادل و معادلات پایه^{۱۲} را بر حسب نیاز به کار گرفت [۸]. شماتیک اجزای اصلی حفاری دورانی شامل سیستم رانش در سطح (موتور، جعبه دنده و میز دوار) و رشته حفاری (مجموعه ارتباطی و انتقال دهنده انرژی از سیستم رانش به مته حفاری، شامل لوله چندبر یا کارگر، لوله های جدار نازک یا لوله حفاری و لوله های جدار ضخیم یا لوله های وزین)، بعلاوه مته در شکل (۵)، و مقطع چاه با لوله وزین در حرکت دورانی و لنگ زدن درون آن، در شکل (۶) نشان داده شده است که این هندسه در مدل مورد استفاده قرار می گیرد.

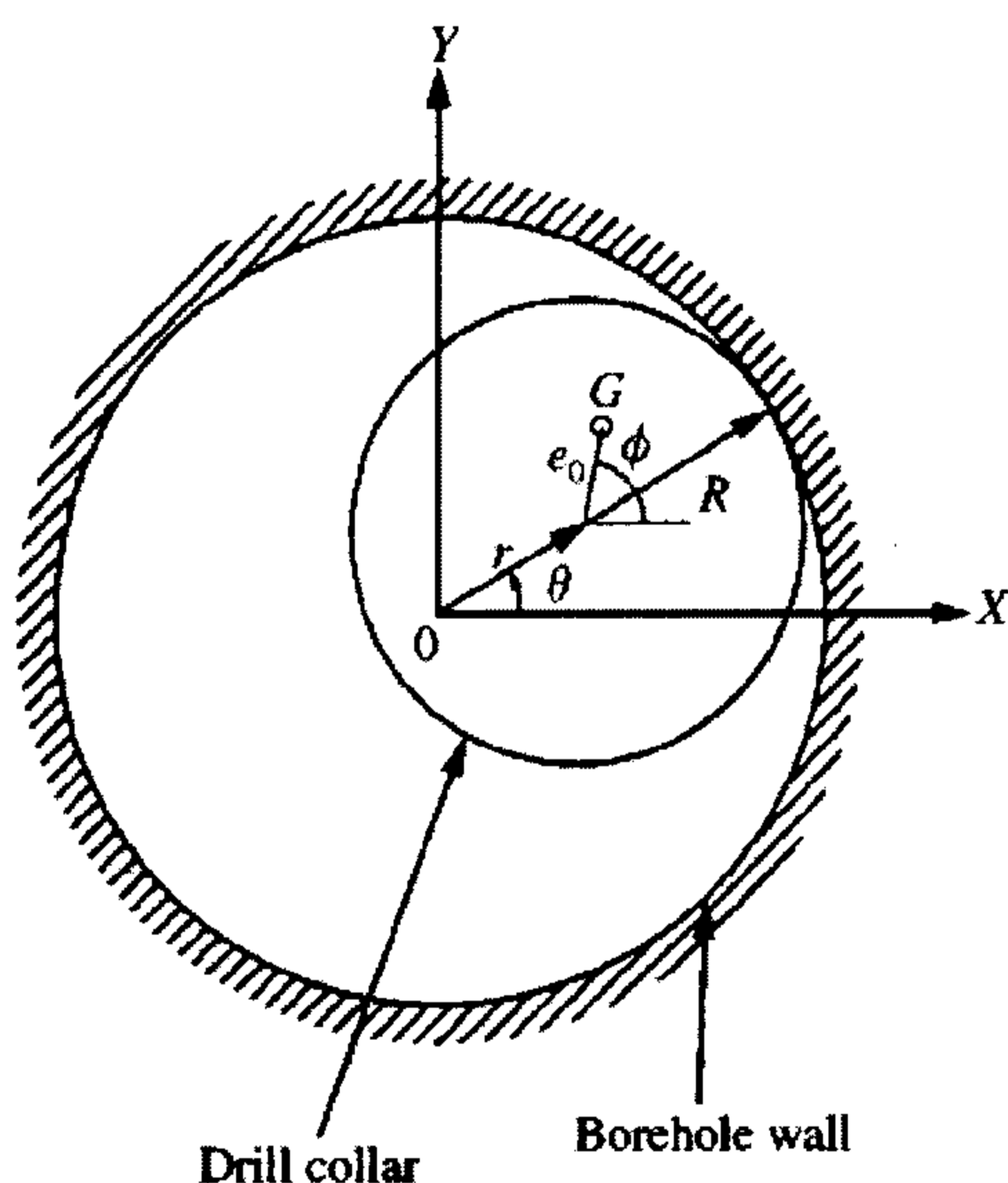
مدل گیر و رهائش: اگر تنها ارتعاشات پیچشی مد نظر بوده و از ارتعاشات دیگر صرف نظر شود، مجموعه تجهیزات پایین چاه یا BHA (شامل لوله های وزین، مته و متعلقات آنها) در انتهای پایین لوله های حفاری به صورت یک روتور (یا دیسک) به جرم m و ممان اینرسی J در نظر گرفته می شود.



شکل ۴: سیستم مختصات ثابت با مبدأ O و سیستم مختصات محلی با مبدأ O .



شکل ۵: شماتیک رشته حفاری (شامل: لوله چندبر، لوله های حفاری، لوله های وزین، مته) و سیستم رانش میز دوار.



شکل ۶: برش از مقطع لوله وزین خیز دار درون چاه.

فرض های مدل گیر و رهائش تنها (یعنی صلب فرض کردن لوله های وزین و تغییر شکل پیچشی لوله های حفاری) نیز به قوت خود باقی است. معادلات از معادلات اصلی مراجع [۲]، [۶]، [۸]، [۱۰] و [۱۱]، با فرض معین بودن سرعت میز دوار به صورت زیر بدست می آیند.

$$(m + m_f)(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) + k(x, \phi, \dot{\phi})r + c_h|V|\dot{r} = -F_r + (m + m_f)e_0[\dot{\phi}^2 \cos(\phi - \theta) + \ddot{\phi} \sin(\phi - \theta)]$$

(۳)

$$(m + m_f)(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}) + c_h|V|r\dot{\theta} = F_\theta + (m + m_f)e_0[\dot{\phi}^2 \sin(\phi - \theta) - \ddot{\phi} \cos(\phi - \theta)]$$

(۴)

$$J\ddot{\phi} + K_T(\phi - \phi_{ri}) + c_v\dot{\phi} + c_h|V|\dot{r}e_0 \sin(\phi - \theta) - c_h|V|r\dot{\theta}e_0 \cos(\phi - \theta) = -\{\mu[F_0 + k_c(x - x_0 \sin n_b \phi)] (\tanh \dot{\phi} + \frac{\alpha_1 \dot{\phi}}{1 + \alpha_2 \dot{\phi}^2})\} + F_\theta[R - e_0 \cos(\phi - \theta)] - F_r e_0 \sin(\phi - \theta)$$

(۵)

که عبارت داخل {} همان T_f ، گشتاور وارد بر مته یا TOB^{13} می باشد و اثر سرعت مته روی TOB در عبارت برانتر دوم آن دیده می شود.

$$m_a \ddot{x} + c_a \dot{x} + k_a x = k_c (x - x_0 \sin n_b \phi)$$

(۶)

که عبارت سمت راست معادله، مولفه نوسانی WOB^{14} در شرایط تماسی مته می باشد.

$$(J_{ri} + n^2 J_m)\ddot{\phi}_{ri} + K_T(\phi_{ri} - \phi) + C_{ri}\dot{\phi}_{ri} - nT_m = 0$$

(۷)

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta,$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$\dot{r} = \frac{x\dot{x} + y\dot{y}}{r}, \quad \dot{\theta} = \frac{y\dot{x} - x\dot{y}}{r^2},$$

$$\ddot{r} = \frac{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \ddot{x}x + \ddot{y}y - \dot{r}^2}{r}$$

(۸)

با فرض تقریب مود یک برای هر سه ارتعاشات محوری، عرضی و پیچشی، پارامترهای مدل سیستم گسسته معادل به صورت زیر حاصل می شوند:

$$m = \rho\pi(d_{co}^2 - d_{ci}^2)\frac{l_1}{8}$$

لوله های حفاری در انتهای پایین (متصل به روتور) به صورت آزاد و در انتهای بالا (متصل به میز دوار) به صورت تکیه گاه صلب برای پیچش فرض می شوند. روتور نسبت به انتهای بالای لوله های حفاری زاویه θ پیچش و نسبت به دستگاه ثابت زاویه ϕ ، چرخش دارد که داریم:

$$\phi = \omega t + \theta$$

(۱)

ω سرعت دورانی میز دوار و t زمان می باشد. تغییر شکل پیچشی فقط در قسمت لوله های حفاری در نظر گرفته می شود. اگر دیواره چاه استاتور فرض شود در این مدل روتور با استاتور هم مرکز بوده و بنابراین نیروهای تماسی لوله با جداره چاه و گشتاور آنها نیز صفر می باشند. معادله حرکت برای حرکت پیچشی خالص عبارت است از:

$$T_f - K_T \theta = J\ddot{\theta}$$

(۲)

که T_f گشتاور اصطکاکی وارد بر روتور فرضی و K_T سختی پیچشی لوله های حفاری ما بین روتور و میز دوار، و J ممان اینرسی روتور می باشند. این مدل گیر و رهائش یک تعادل ناپایدار در " $\dot{\theta} = 0$ " و $\theta = \frac{T_f(\omega)}{K_T}$ دارد. مدل پاندول ساده فوق برای حرکت گیر و رهائش مته در رشته حفاری دورانی، خود تحریکی غیر خطی را در پایین ترین مود پیچشی تشریح می کند [۲ و ۶].

مدل دینامیکی

برای بررسی همزمان هر سه ارتعاشات پیچشی، محوری و عرضی سیستم حفاری دورانی چاه های عمیق نفت و گاز از شکل های (۵) و (۶) که اجزای اساسی سیستم و هندسه مورد استفاده مدل را نشان داده، استفاده کرده و روابط ریاضی اصلی آن را متعاقباً بیان می کنیم. در این جا برای حرکت عرضی، قسمت پایدار شده لوله های وزین به صورت یک تیر با تکیه گاه های ساده و برای حرکت های محوری و پیچشی کل رشته لوله حفاری در انتهای بالا گیردار و در انتهای پایین آزاد فرض می شود. برای ارتعاشات پیچشی

زمان $\Delta t = t_2 - t_1$ در طی تماس لوله و دیواره حاصل می شود. معادلات پاسخ سیستم قبل از ضربه با انتگرال گیری عددی معادلات (۳) تا (۷) بدست می آید. اگر مدت تماس تقریباً صفر فرض شود وضعیت سیستم پیوسته است و معادلات تعادل مومنتم حاصل می شود. وقتی ضربه روی دهد انتگرال گیری با شرایط اولیه جدید، مجدداً شروع می شود. مقادیر ایمپالس شعاعی و مماسی برای ضربه خاص با استفاده از مدل اصطکاک-ضربه جسم صلب دو بعدی، محاسبه شده است.

معادلات حاکم حاصل شده، بیانگر آن است که کنترل سرعت میز دوار با در نظر گرفتن مدل دینامیکی در بر گیرنده وابستگی های متقابل ارتعاشات محوری، پیچشی و جانبی، می تواند ارتعاشات رشته حفاری را به حداقل برساند.

بحث

مقادیر پارامترهای طراحی چاه در منطقه مورد نظر، بصورت زیر بوده است:

- رشته لوله حفاری:

$$E: 210[\text{Gpa}], \quad \rho = 7850[\text{kg/m}^3],$$

$$d_{co}: 0.2286[\text{m}], \quad d_{ci}: 0.0762[\text{m}],$$

$$d_{pi}: 0.095[\text{m}], \quad d_{po}: 0.127[\text{m}],$$

$$c_a: 0[\text{Ns/m}], \quad e_0: 0.0127[\text{m}],$$

$$l_1: 19.81[\text{m}], \quad l_2: 200[\text{m}], \quad l_3: 1300[\text{m}]$$

- مته و بار و گشتاور روی آن:

$$F_0: 100[\text{KN}], \quad \alpha_1: 2.0, \quad \alpha_2: 1.0,$$

$$\mu: 0.04, \quad n_b: 1$$

$$F_f: 50[\text{KN}], \quad T_0: 4[\text{KN.m}], \quad T_f: 2[\text{KN.m}],$$

$$x_0: 0.01[\text{m}], \quad k_c: 25000[\text{KN/m}]$$

- گل حفاری

$$\rho_f: 1500[\text{kg/m}^3], \quad C_D: 1,$$

$$C_A: 1.7, \quad \mu_f: 0.2[\text{Ns/m}^2]$$

- جداره چاه:

$$E: 210[\text{Gpa}], \quad \rho = 7850[\text{kg/m}^3],$$

$$d_h: 0.4286[\text{m}]$$

- سیستم رانش دورانی:

$$J_{rt}: 930[\text{kgm}^2], \quad J_m: 23[\text{kg m}^2],$$

$$C_{rt}: 0, \quad n: 7.2$$

سرعت مطلوب میز دوار [rpm] ۱۱۰ (یا [rad/sec])
 ۱۱/۶ بوده و فرکانس های طبیعی: محوری، پیچشی و فرکانس بحرانی لنگ زدن (خمشی) به ترتیب ۳/۹، ۱/۸۵

$$m_a = 2(m + m_f) + \rho\pi(d_{po}^2 - d_{pi}^2) \frac{l_3}{12}$$

$$m_f = \pi\rho_f(d_{ci}^2 + C_A d_{co}^2) \frac{l_1}{8}$$

$$J = 2\rho I_A l_2 + \frac{1}{3} \rho I_P l_3$$

$$k(x, \phi, \dot{\phi}) = \frac{EI_A \pi^4}{2l_1^3} - \frac{T\pi^3}{2l_1^2} - \frac{F\pi^2}{2l_1}$$

$$K_T = \frac{GI_P}{l_3}$$

$$k_a = \frac{E\pi(d_{po}^2 - d_{pi}^2)}{4l_3}$$

$$c_h = \frac{2}{3\pi} \rho_f C_D d_{co} l_1$$

$$c_v = \frac{\pi\mu_f d_{co}^3 l_2}{2(d_h - d_{co})}$$

نمادهای مورد استفاده، در جدول نمادها و در شکل (۵) تعریف شده اند.

بار روی مته (WOB) و گشتاور روی مته (TOB) مستقیماً به حرکت های محوری و پیچشی وابسته بوده و به صورت تابعی از حرکت در نظر گرفته شده اند. بار روی مته از اثر متقابل سازند و مته حاصل شده و دارای دو مولفه استاتیکی (F_0) و مولفه نوسانی ناشی از شرط تماسی مته و سازند به صورت:

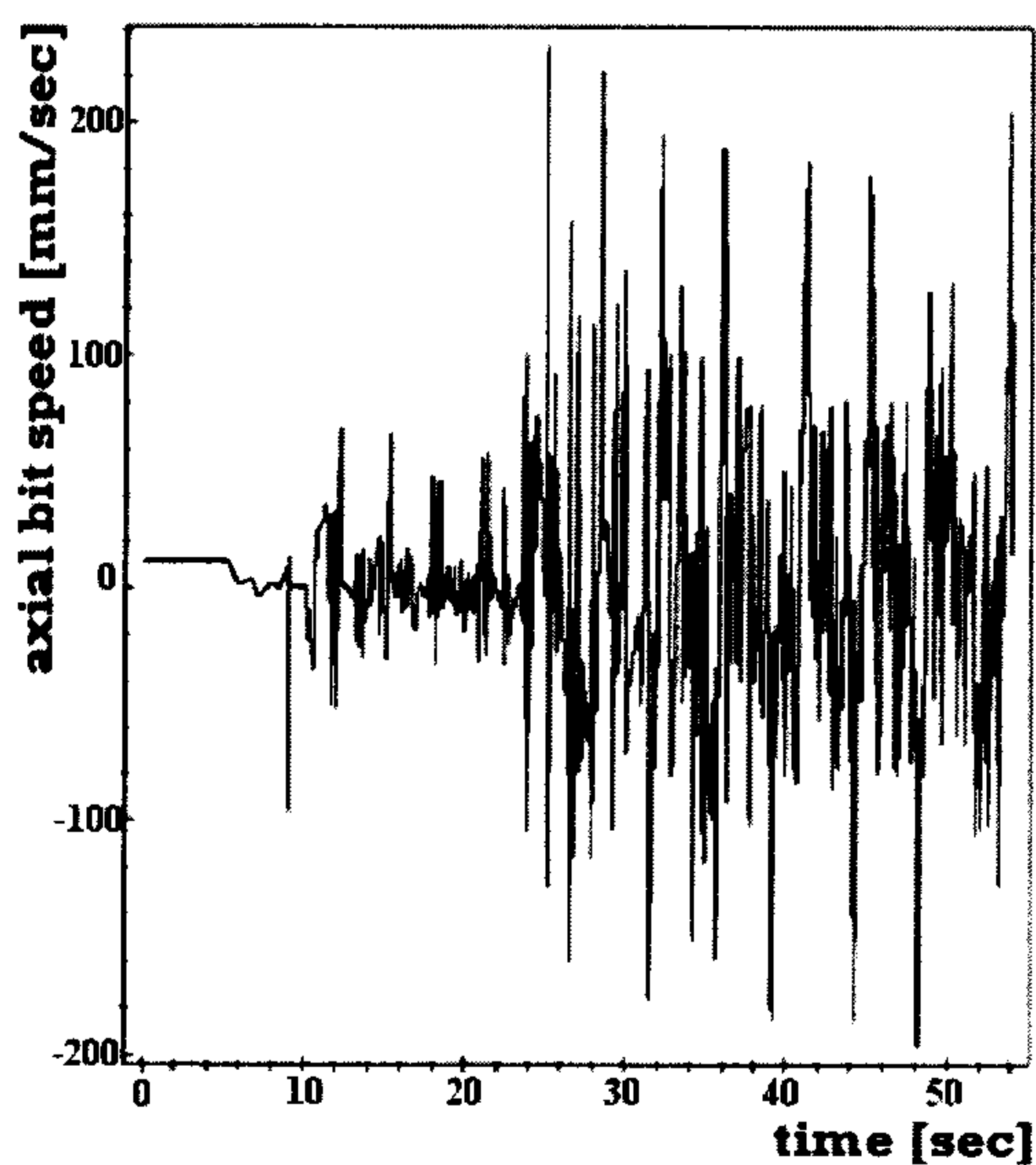
$k_c[x - x_0 \sin(n_b \phi)]$ می باشد. مقدار گشتاور روی مته هم به بار روی مته، نرخ نفوذ مته، سرعت مته، ضریب نیروی برشی وابسته می باشد. وابستگی WOB و TOB به جابجایی و سرعت زاویه ای مته در برخی مراجع به صورت بسط تابع هارمونیک زمانی پیشنهاد شده است. در بیشتر بررسی ها ضربه بین لوله های وزین و جداره چاه به صورت سختی تماسی خطی:

$$F(t) = \begin{cases} k_c(r - R_c) & r > R_c \\ 0 & r \leq R_c \end{cases}$$

مدل شده است و اثر اصطکاکی با فرض لغزش پیوسته بین آن دو سطح محاسبه می شود [۱۲]، حال آنکه امکان دارد لوله های وزین روی دیواره چاه بدون لغزش بغلتند که این روش جوابگو نمی باشد. لذا روش تعادل مومنتم مورد استفاده قرار می گیرد. معادلات ایمپالس-مومنتم از انتگرال گیری معادلات (۳) تا (۷) نسبت به

شرایط مختلف می باشد. برخی از پارامترهای لازم از نتایج M-File نرم افزار در جدول (۲) آورده شده است. سرعت های دورانی میز دوار و مته بر حسب زمان مطابق شکل (۷)، و تابع زمانی تغییر مولفه عمودی نوسان سرعت مته، بصورت شکل (۸) حاصل شده است.

افزایش در ارتعاش محوری از تغییر سازند، ناشی شده است. شکل (۹) موقعیت های مرکز رشته حفاری را درون چاه در مدت زمانهای معین نشان می دهد. اختلاف سرعتهای دورانی میز دوار و مته در ثانیه های نخست (حدود ۳۰ ثانیه اول)، که در شکل (۷)، حاصل از حل معادلات (۳) تا (۸)، دیده می شود، گویای رخ دادن پدیده گیر و رهایش و ارتعاشات پیچشی در طی این مدت می باشد.



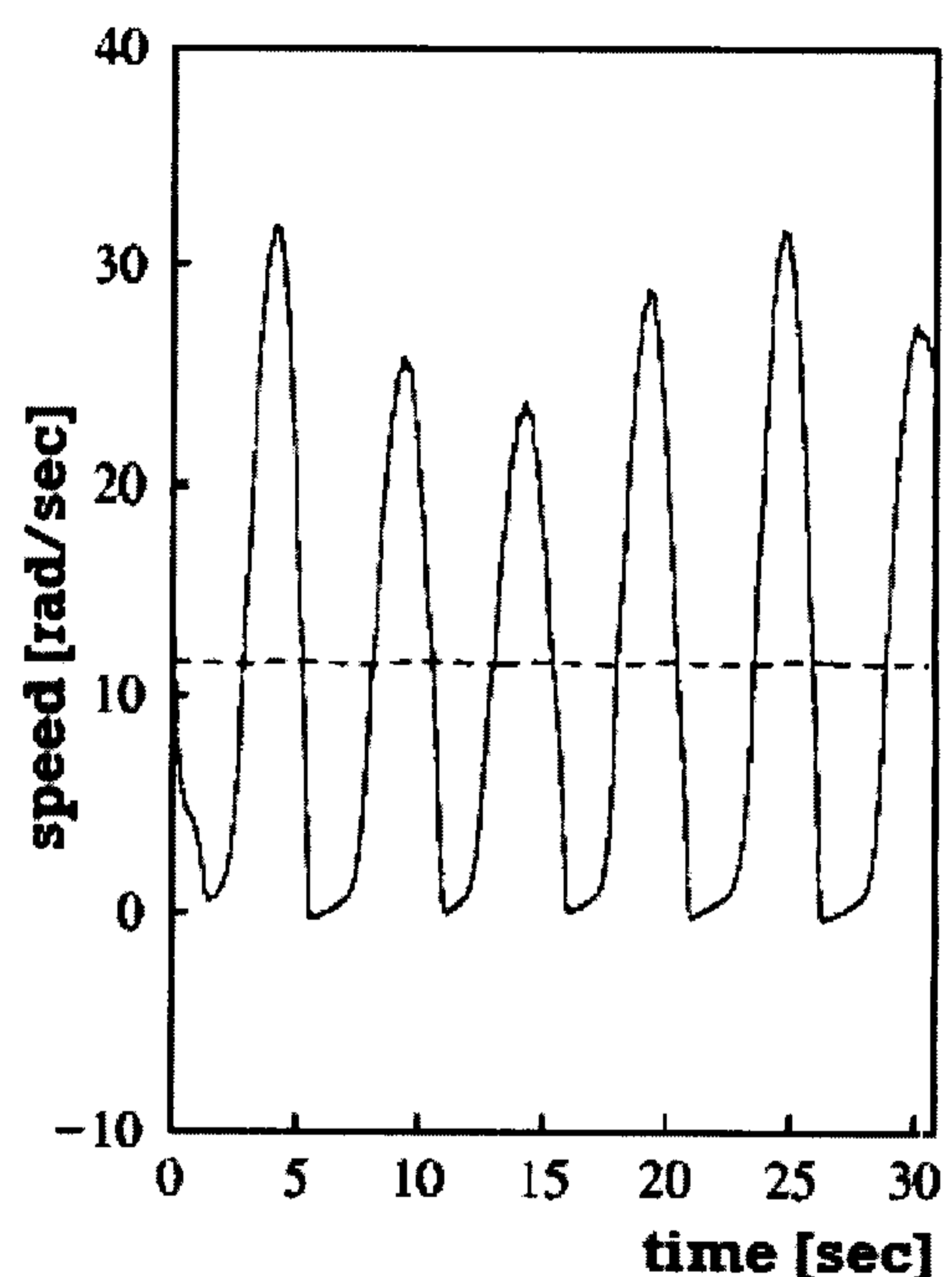
شکل ۸: سرعت ارتعاشات محوری مته.

در سرعت های پایین، یعنی در شروع و پایان هر مرحله از حرکت دورانی مته، علیرغم سرعت دورانی ثابت میز دوار، تغییرات سرعت دورانی در مته مشاهده می شود که نشان دهنده حاکم بودن پدیده گیر و رهایش در طی این مدت زمانی است. بعد از طی این مدت، افزایش سرعت ارتعاشات محوری در شکل (۸) و تغییرات Γ در شکل (۹) دیده می شود، که خود نشانگر این است که در مدل دینامیکی ارتعاشات کوپله، مقداری از انرژی ذخیره شده، صرف ارتعاشات محوری و خمشی شده است (تبدیل مودهای ارتعاشی) و در نتیجه از شدت ارتعاشات پیچشی کاسته شده است [۱۳].

و $6/14$ [rad/sec] حاصل شده است. همچنین فرض می شود وقتی مته متوقف است (فاز گیر)، میز با همان سرعت مطلوب دوران نماید.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای محاسبه شده.

پارامتر	مقادیر محاسبه شده
C_v	3.7530 [Nms]
I_a	1.3240e-004 [m ⁴]
I_p	1.7543e-005 [m ⁴]
K_T	1.0796e+003 [Nm/rad]
J	475.4044 [kg.m ²]
m	2.8367e+003 [kg]
m_f	1.1044e+003 [kg]
c_h	1.4415e+003 [Ns ² /m ²]
m_a	2.6862e+004 [kg]
k_a	5.8934e+006 [N/m]
k	1.4912e+005 [N/m]
ω	11.5192 [rad/sec]



شکل ۷: سرعت های دورانی میز دوار و مته.

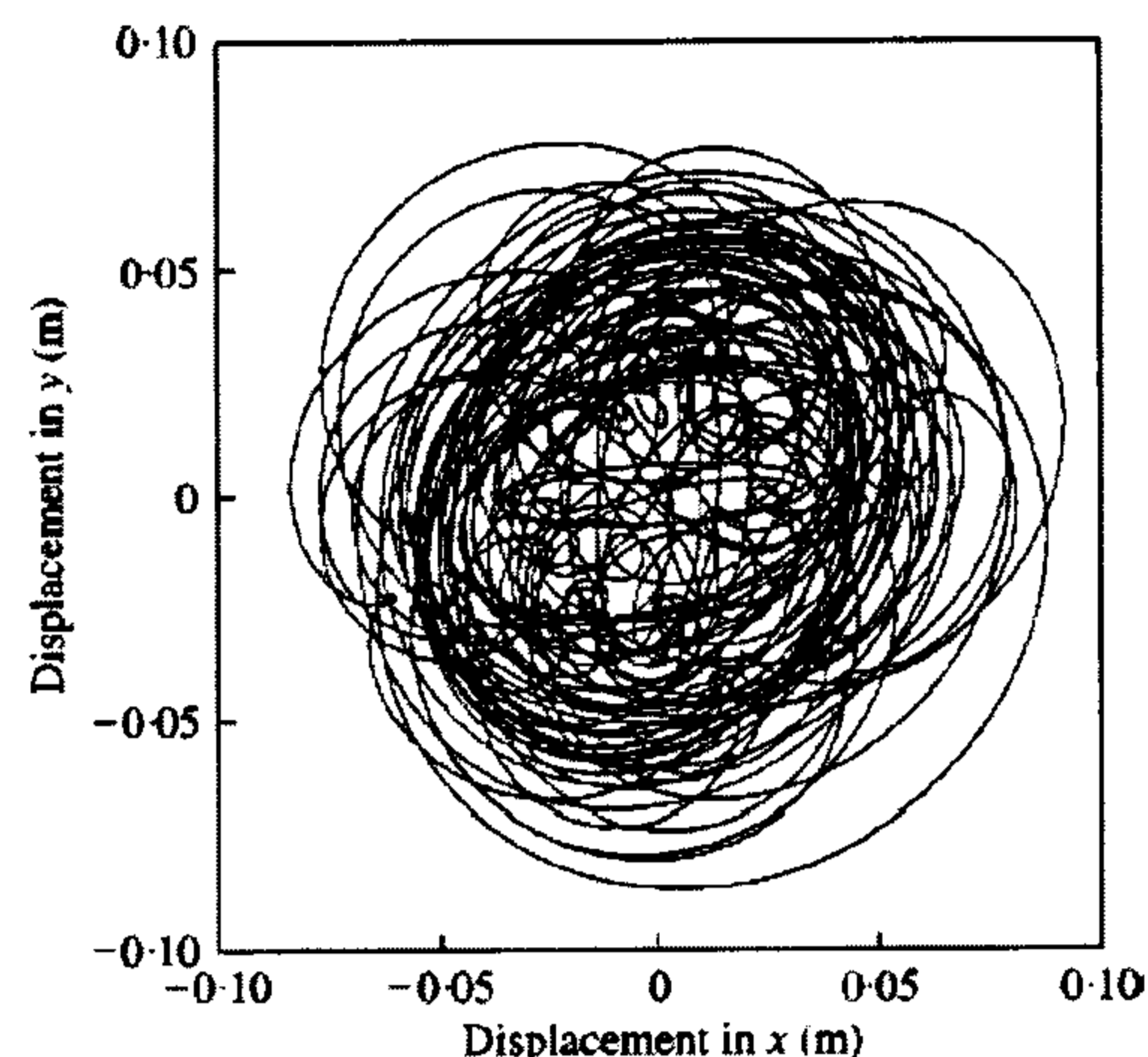
در اینجا رفتار ارتعاشی رشته حفاری مورد بررسی قرار می گیرد. به دلیل وابستگی معادلات به زمان ترجیح داده شد از نرم افزار MATLAB استفاده شود. استفاده از Simulink این نرم افزار، ابزار مناسبی برای تحلیل

در ترکیب با کیک فیلتر گل حفاری، کاملاً چسبنده می گردد [۱۴، ۱۵]. با عبور از این سازند، تعداد واماندگی ها به صفر کاهش یافته است. سازند پر خطر می تواند منجر به ارتعاشات رشته حفاری، بخصوص ارتعاش پیچشی خود تحریک گردد. بنابراین می توان گفت: ارتعاشات پیچشی به دو دلیل عمده، عامل اصلی واماندگی رشته حفاری در این حوزه نفتی جنوب ایران می باشد: اولاً واماندگی ها در سازند صخره ای خاصی (پرخطر) رخ می دهند و ثانیاً این سازند در مقایسه با سازند های دیگر (سازندهای بالا و پایین آن) سخت تر و در تماس با گل چسبناک تر می باشد. این سازند چسبناک با بوجود آوردن اصطکاک زیاد روی BHA، قابلیت پدیده گیر و رهایش را بوجود می آورد. بنابراین در اینجا سازند چسبنده، نوع گل حفاری و ارتعاشات پیچشی، از عوامل اصلی هستند که بر DSF موثرند. ارتعاشات محوری، ارتعاشات جانبی، انتخاب مته و BHA، بار روی مته، دور بحرانی و سختی سنگ در مرتبه دوم از لحاظ میزان تاثیر روی DSF قرار می گیرند. در مرتبه سوم هم عوامل: خستگی، کیفیت لوله، تغییرات سختی سنگ و انحنای چاه نقش داشته، و عوامل شیمیایی مثل محیط خورنده نیز تقریباً بی تاثیر می باشند. تعیین عامل اصلی واماندگی های زیاد رشته حفاری با بررسی های دلایل احتمالی زیر همراه بوده است:

انتخاب مته و BHA: به دلیل اینکه در اینجا سه شرط محدود کننده در طراحی طول BHA، یعنی: حداکثر بار روی مته، موقعیت نقطه خنثی کششی و فشاری در طول رشته حفاری، و اندازه فاصله بین چاه و سطح بیرونی لوله وزین رعایت شده است، انتخاب مته و BHA نمی تواند عامل اصلی تعداد بالای واماندگی رشته حفاری باشد.

خستگی ناشی از تنش سیکلیک: از آنجا که اولاً تنش سیکلیک اعمالی پایین تر از حد تحمل خستگی (S_e) بوده، و ثانیاً اگر تنش سیکلیک دلیل اصلی واماندگی های فوق باشد بایستی بعد از گذر مته از سازند پر خطر هم، واماندگی در لوله ها وجود داشته باشد که در عمل اینگونه نبوده است، جدول (۱). بنابراین خستگی ناشی از تنش سیکلیک نمی تواند علت اصلی واماندگی های غیرعادی باشد.

کیفیت لوله ها: (جنس، شکل هندسی و نوع آپست): چون این نوع لوله ها در حفر مناطق نفتی دیگر مناسب و جوابگو بوده است، نمی تواند عامل اصلی واماندگی های غیر عادی



شکل ۹: موقعیت مرکز رشته حفاری درون چاه.

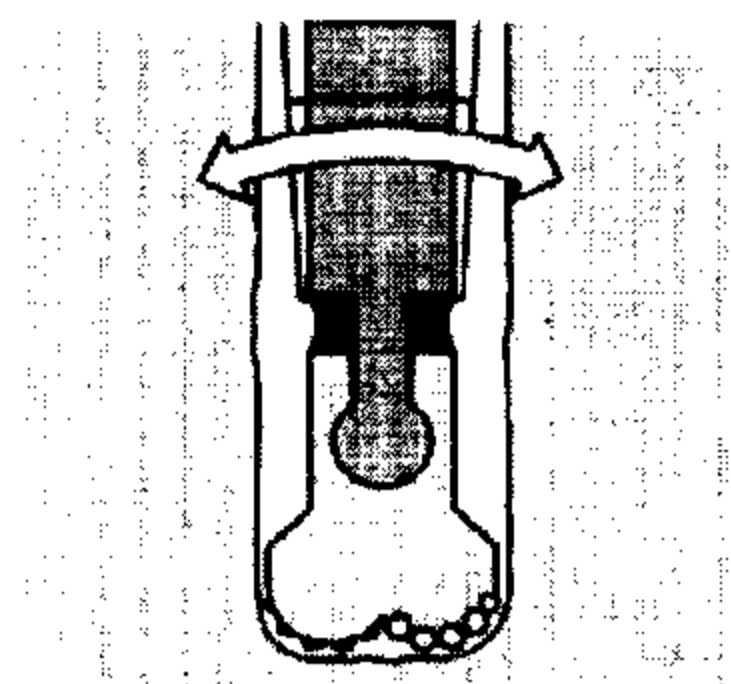
ارتعاشات محوری سبب حرکت پرشی^{۱۵} مته و در نتیجه وارد شدن خسارت به مته و تجهیزات پایین چاه می شود. شکل (۹) جابجایی مرکز لوله را در صفحه XY (تغییرات Z)، با تغییر زمان مشخص می نماید که گویای ارتعاشات عرضی و وقوع پدیده لنگ زدن می باشد. ارتعاشات عرضی نیز می تواند باعث تماس رشته حفاری با دیواره چاه و نیروهای ضربه - ای به آن شود.

شرایط فوق نشان می دهد که کنترل هر نوع از ارتعاشات می تواند در تغییر ارتعاشات دیگر موثر واقع شود، لذا قبل از هر تصمیم در باره شرایط عملیاتی بایستی تحلیل سیستم در مدل دینامیکی ارتعاشات کوپله صورت پذیرد. چنانچه در روابط هم دیده می شود، عواملی از قبیل: سازند، سرعت میز دوار، بار روی مته، نوع گل حفاری، نوع مته، آرایش رشته لوله حفاری، و اثرات ناشی از خود چاه (سنگ شناسی، پروفیل چاه و لوله جداری) در رفتار ارتعاشی رشته لوله حفاری نقش ایفا می کنند.

بررسی مورد خاص کاربردی

با بررسی جدول (۱) و شکل (۱) دیده می شود بیشتر واماندگی ها در سازند "پر خطر" اتفاق افتاده است، که گاهی به تعداد ۱۳ واماندگی در صد متر حفاری از این سازند هم رسیده است. در این حوزه نفتی، سازند فوق تقریباً در عمق ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ متری با ضخامت میانگین ۶۵۰ متر یافت شده است. این سازند دارای صخره سخت و در سنگ شناسی حاوی خاک رس آهکدار خاکستری بوده (بیش از ۷۰٪)، که

وابستگی حرکت دینامیکی مته و لوله، پایداری بیشتر مته و کاهش ارتعاشات بدست می آید [۱۹].



شکل ۱۰: شماتیک مته انعطاف پذیر.

نتیجه گیری

پدیده گیر و رهایش و در نتیجه ارتعاشات پیچشی، عامل اصلی واماندگی های غیر معمول و بیش از حد رشته حفاری در میادین نفتی بی بی حکیمه و گچساران (لیشر شمالی) می باشد که در اثر دو عامل: اثر متقابل سازند-مته و دیواره چاه-رشته حفاری، ایجاد می شود. دو راه حل آشکار برای این مسئله: (الف) کنترل ارتعاشات رشته حفاری با بکارگیری اندازه گیرهای ارتعاشات در پایین و بالای رشته حفاری و استفاده از مدل حرکت دینامیکی کوپله ارتعاشات سیستم و تغییر مناسب و به موقع سرعت میز دوار، (ب) کاهش عوامل ایجاد ارتعاشات پیچشی با استفاده از گل حفاری پایه روغنی به جای پایه آبی، بکارگیری موتور پایین چاه، و استفاده از مته انعطاف پذیر، می باشد. با توجه به کوپله بودن ارتعاشات پیچشی، محوری و جانبی بایستی مدل دینامیکی مورد استفاده، شامل این وابستگی های متقابل بوده و همچنین در انتخاب پارامترهای عملیاتی دقت لازم به عمل آید.

فهرست علائم

- C_A : ضریب جرم اضافه شده
 C_a : استهلاک موثر برای حرکت محوری [Ns/m]
 C_D : ضریب نیروی مقاوم حرکت (درگ)
 C_h : ضریب استهلاک هیدرودینامیکی [Ns²/m²]
 C_v : ضریب استهلاک ویسکوز [Nms]
 t_{Cr} : ضریب استهلاک ویسکوز معادل [Nms]
 d_h : قطر سوراخ چاه [m]
 d_{ci} : قطر داخلی لوله وزین [m]
 d_h : قطر سوراخ چاه [m]

باشد.

تاثیر انواع فرسایش و خوردگی: به دو دلیل عمده اثر این عوامل نیز منتفی می باشد: الف) در این حوره خاص لوله ها بطور منظم بازرسی گردیده اند، و ب) سطح H₂S در هنگام حفاری سازند پر خطر تقریباً صفر بوده است.

پدیده گیر و رهایش: بدلیل اینکه سخت تر بودن سازند، افزایش وزن روی مته و سرعت پایین مته، باعث افزایش پدیده گیر و رهایش می شود [۱۶]، بنابراین سخت و چسبنده بودن سازند پر خطر و در نتیجه پدیده گیر و رهایش و ارتعاشات پیچشی منتج، عامل اصلی واماندگی های زیاد و غیر معمول رشته حفاری در این حوزه نفتی خاص بوده است.

راههای اصلی پیشگیری

با توجه به بحث صورت گرفته دو راه حل آشکار برای کاهش تعداد واماندگی ها پیشنهاد می شود:

۱- نظارت کنترلی بر ارتعاشات در سطح بالا و پایین رشته حفاری، یعنی با بکار بردن ابزارهای اندازه گیر مناسب در جعبه دنده میز دوار و در مته یا BHA، ارتعاشات در پایین و بالای رشته حفاری اندازه گیری، و با استفاده از سیستم کنترلی فعال، با تغییر درست و به موقع سرعت میز دوار، ارتعاشات کاسته و قابل کنترل شود.

۲ - کاهش ارتعاشات: الف) از معادلات (۳) تا (۵) نتیجه می شود که با بکارگیری گل حفاری پایه روغنی به جای پایه آبی، گشتاور اصطکاکی وارد بر روتور، حاصل از اصطکاک مته و سازند، کاهش می یابد. لذا پیشنهاد استفاده از گل حفاری پایه روغنی به جای پایه آبی جهت تغییر اصطکاک سنگ و مته [۱۷ و ۱۸]، می تواند در کاهش فاز گیر نمودن مته موثر واقع شود (اگر فاز گیر نمودن مته نباشد فاز رهایشی هم وجود نخواهد داشت).

ب) با استفاده از توربودریل و موتور در پایین چاه، تغییر در فنریت رشته حفاری بدلیل کاهش طول رشته حفاری حاصل می شود.

ج) با بکارگیری مته انعطاف پذیر، شکل (۱۰)، و کاهش

n_b : فاکتور مته	d_{ci} : قطر داخلی لوله وزین [m]
R_c : شعاع لوله وزین [m]	F_θ : نیروی تماسی عرضی (لوله با دیواره چاه) [N]
T_0 : گشتاور پیچشی متوسط [N.m]	F_r : نیروی تماسی شعاعی (لوله با دیواره چاه) [N]
T_f : دامنه گشتاور پیچشی [N.m]	G : مدول برشی $[N/m^2]$
T_m : گشتاور پیچشی به شافت موتور [N.m]	I_A : لنگر دوم سطح $[m^4]$
V : سرعت مرکز هندسی لوله وزین [m/s]	I_p : لنگر دوم قطبی سطح $[m^4]$
x_0 : دامنه پروفیل سطح [m]	J : لنگر دوم جرمی رشته لوله حفاری $[Kg.m^2]$
α_1, α_2 : ضرایب سرعت	K : سختی خمشی لوله های وزین [N/m]
ϕ : جابجائی زاویه ای لوله وزین [rad]	k_a : سختی محوری موثر [N/m]
ϕ_{rt} : جابجائی زاویه ای میز دوار [rad]	k_c : سختی تماسی [N/m]
μ : فاکتور نیروی برشی	K_T : سختی پیچشی لوله های حفاری [Nm/rad]
μ_f : ویسکوزیته گل حفاری $[Ns/m^2]$	m : جرم موثر لوله های وزین [kg]
ρ : دانسیته ماده رشته حفاری $[kg/m^3]$	m_a : جرم موثر رشته حفاری [kg]
ρ_f : دانسیته گل حفاری $[kg/m^3]$	m_f : جرم سیال اضافه شده [kg]
ω : سرعت میز دوار [rad/s]	n : نسبت دنده

مراجع

- ۱ - راشد، غ. ، هاشمی، س. ج. و قاجار، ر. "بررسی رفتار ارتعاشی رشته لوله حفاری." دوازدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، (۱۳۸۳).
- 2 - Richard, T., Germain, C. and Detournay, E. (2004). "Self-excited stick-slip oscillations of drill bits." *C.R. Mecanique* 332, PP. 619-626.
- 3 - Aarrestad, T.V. and Kyllingstad, A. (1988). "An experimental and theoretical study of coupling mechanism between longitudinal and torsional drillstring vibrations at the bit." *SPE Drilling Engineering* 3, Vol. 12.
- 4 - Vandiver, J. K., Nicholson, J. W. and Shyu, R. J. (1990). "Case studies of the bending vibration and whirling motion of drill collars." *SPE drilling Engineering* 5, Vol. 28, No. 2.
- 5 - Dunayevsky, V. K., Abbasian, F. and Judzis, A. (1993). "Dynamic stability of drillstrings under fluctuating weight on bit." *SPE drilling and Completion* 8, Vol. 84.
- 6 - Kyllingstad, A. and Halsey, G. W. (1988). "A study of slip/stick motion of the bit." *SPE drilling Engineering* 3, Vol. 369.
- 7 - Halsey, G. W., Kyllingstad, A. and Kylling, A. (1988). "Torque feed back used to cure slip-stick motion." *Paper SPE 18049*.
- 8 - Li, Z. (1999). "Fundamental equations for dynamical analysis of rod and pipe string in oil and gas wells." *Paper SPE 56044*.
- 9 - Sananikone, P., Komoshima, O. and White, D. B. (1992). "A field method for controlling drillstring torsional vibrations." *Paper SPE 23891*.
- 10 - Jansen, J. D., Van den Steen, L. and Zachariassen, E. (1995). "Active damping of self-excited torsional vibrations in oil well drillstring." *Journal of Sound and Vibration* 179, PP. 647-668.

- 11 - Khulief, Y. A. and Shabana, A. A. (1986). "Impact responses of multi-body systems with consistent and lumped masses." *Journal of Sound and Vibration* 104, PP. 187-207.
- 12 - Jansen, J. D. (1991). "Non-linear rotor dynamics as applied to oilwell drillstring vibration." *Journal of Sound and Vibration* 147, PP. 115-137.
- 13 - Aldred, W. D. and Sheppard, M. C. (1992). "Drilling vibrations: A new generation mechanism and control strategies." *Paper SPE 24582*.
- 14 - Pavone, D. R. and Desplans, J. P. (1994). "Application of high sampling rate downhole measurements for analysis and cure of stick-slip in drilling." *Paper SPE 28324*.
- 15 - <http://www.geolog.it/2/2e.htm>, SDC-String, "Dynamics control. mud logging service." *developed by AGIP*, (1982).
- 16 - <http://www.bakerhughes.com/inteq/D&P/dynamics/copilot.htm>.
- 17 - Dufeyte, M. P. and Henneuse, H. (1991). "Detection and monitoring of the stick-slip motion: field experiments." *SPE/IADC 21945*.
- 18 - Rappold, K. (1993). "Drill-string vibration measurements detect bit stick-slip." *Oil and Gas Journal*, PP. 66-70.
- 19 - Defourny, P., Security DBS. and Abbassian, F., BP Exploration. (1995). *Flexible bit: A new anti-vibration PDC bit*.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| 1-Failures | 2-Drillstring |
| 3-Stick-Slip | 4-Drillpipe |
| 5-Formation | 6-Drill string failure |
| 7-Bottom hole assembly | 8-Body |
| 9-Slip area | 10-Drillcollar |
| 11-Crossover sub | 12-Constitutive equations |
| 13-Torque on bit | 14-Weight on bit |
| 15- Bit bounce | |

