

تاثیر پایدار کننده بر ارتعاشات همزمان طولی و عرضی رشته‌ی حفاری مورب درگیر پدیده چسبش-لغزش

محمد دم‌شناس^۱، محمد تقی احمدیان^۲
 Damshenas1987@yahoo.com

چکیده

بررسی ارتعاشات ایجاد شده در رشته حفاری همانند دیگر ماشین‌های دوار از اهمیت خاصی برخوردار است و با توجه به طولی بودن رشته‌های حفاری لنگ زنی احتمالی یکی از موضوعات مهم تلقی می‌گردد که باعث کاهش نرخ نفوذ و در نتیجه افزایش زمان و هزینه حفاری می‌گردد... هدف از انجام این مقاله بررسی شتاب خطی رشته حفاری در دبی‌های مختلف گل حفاری بر رشته حفاری مورب درگیر چسبش - لغزش در ایجاد لنگ زنی و شکم‌دادگی خواهد بود. بدین منظور معادلات مربوط به انرژی جنبشی و پتانسیل یک‌رشته‌ی حفاری دوار با در نظر گرفتن ارتعاشات طولی و عرضی نوشته شده و با استفاده از روش لاگرانژ معادلات حرکت سیستم به دست آمده‌اند. در این مدل‌سازی که توسط نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYSTM صورت پذیرفته اثر وزن رشته حفاری و پدیده چسبش-لغزش کف چاه نیز در نظر گرفته شده است. در نهایت مشخص می‌گردد که به علت ایجاد اصطکاک زیاد در صورت تعداد زیاد وجود پایدارکننده در حفاری یافتن مکان بهینه پایدارکننده‌ها از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است و پارامترهای زیادی در حفاری نقش کلیدی دارند که تعیین و اعمال صحیح نیروی محوری از بالای چاه برای کنترل شکم‌دادگی و جلوگیری از ایجاد ارتعاشات عرضی ناخواسته که مهم‌ترین علت بروز صدمات به چاه و تجهیزات حفاری است یکی از مهم‌ترین این عوامل است.

واژه‌های کلیدی: پدیده چسبش - لغزش، رشته حفاری، پایدارکننده، وزن روی تیغه، ارتعاشات غیرخطی، اجزاء محدود.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک در طراحی کاربردی

۲- استاد تمام بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف (ahmadian@sharif.edu)

۱- مقدمه

از زمان‌های گذشته برای دسترسی به منابع آب و یا بعضی از کریستال‌های معدنی عملیات حفاری انجام می‌شده است که امروزه کاربردهای گسترده‌تری پیدا کرده است که مهم‌ترین آن‌ها برای استخراج منابع انرژی همچون نفت و گاز هست. اولین و قدیمی‌ترین راه حفاری استفاده از روش کابلی (ضربه‌ای) بوده است که پیشینه چندین هزارساله دارد. در این روش با بالا بردن و رها نمودن یک وزنه سنگین در داخل چاه عمق چاه حفر می‌گردد که سپس از مدتی با تزریق سیال می‌بایست مواد خردشده از انتهای چاه خارج گردد که این روش تا به امروز برای حفر چاه‌های آب ادامه دارد [۱].

در بین سال‌های ۱۸۱۰ تا ۱۸۲۰ رشته‌های حفاری دوار مورد استفاده قرار گرفت که برای دوران این رشته‌های حفاری از موتور بخار استفاده می‌شد. در این روش خاک‌های کنده شده توسط مته و با استفاده از چرخش خود آن به سطح زمین آورده می‌شدند که کم بودن عمق حفاری یکی از مشکلات این روش محسوب می‌شد. در سال‌های ۱۸۷۰ تا ۱۸۸۰ با استفاده از مته‌های الماسی، حفاری تا عمق ۶۷۰ متر انجام شد که تا سال ۱۹۰۰ به عمق ۱۷۵۰ متر هم رسید. بعدازآن و تا به امروز با انجام اصلاحاتی و پیشرفت درزمینه‌ی افزایش مقاومت مکانیکی مواد به‌کاررفته در اجزای رشته‌های حفاری، استفاده از تیغه‌های برنده‌تر و استفاده از مته‌هایی از جنس تنگستن عمق حفاری را تا ۱۰ کیلومتر هم رسانده است [۱]. عملکرد رشته حفاری را می‌توان به دودسته عمده تقسیم کرد:

(۱) انتقال انرژی از سطح زمین به تیغه مته حفاری و حفر چاه

(۲) انتقال مواد خردشده از انتهای چاه به سطح زمین.

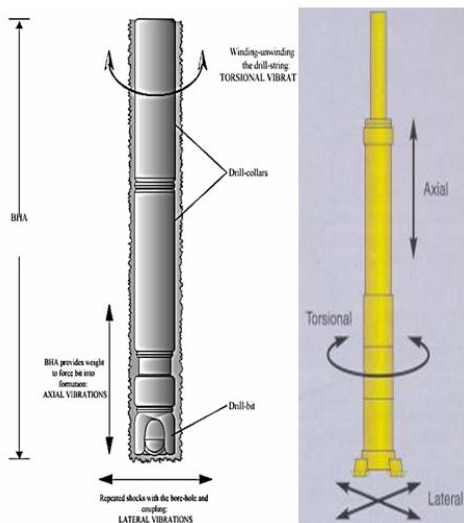
ارتعاش یکی از عوامل تأثیرگذار در طراحی، عملکرد و عمر رشته حفاری هست پس بررسی ارتعاشات ایجادشده در رشته حفاری همانند دیگر ماشین‌های دوار از اهمیت خاصی برخوردار است و با توجه به طول زیاد رشته حفاری، لزوم بررسی ارتعاشات در آن افزایش می‌یابد [۱، ۲، ۳]. ارتعاشات رشته حفاری می‌تواند نرخ نفوذ را کاهش و در نتیجه زمان و قیمت حفاری را افزایش دهد. همچنین می‌تواند خساراتی دائمی را به دیواره چاه وارد نموده و باعث خرابی زودهنگام مته و سایر تجهیزات حفاری شود [۴ و ۵]. قیمت زیاد مته و مشکل خارج کردن رشته حفاری شکسته از چاه سبب شده تا شرکت‌های حفاری توجه زیادی به بررسی ارتعاشات رشته‌های حفاری نمایند.

در رشته‌های حفاری ارتعاشات عرضی، طولی و پیچشی به‌طور همزمان اتفاق می‌افتد [۱]. پیوستگی بین این سه نوع ارتعاش باعث پیچیدگی عملکرد بررسی ارتعاشات رشته حفاری شده و سبب شده تا نتوان به‌طور کامل آن را مدل‌سازی کرد [۶]. در ضمن وجود تماس رشته حفاری با دیواره چاه، طول زیاد رشته حفاری و احتمال کمانش آن در قسمت‌های انتهایی، چسبش-لغزش تیغه مته در سنگ و جهش آن در هنگام رها شدن و... باعث مضاعف شدن پیچیدگی بررسی ارتعاشات رشته حفاری شده است [۵]. برای مدل‌سازی ارتعاشات از فرضیات ساده شونده‌ای استفاده می‌کنیم که در بخش نتایج توضیح داده می‌شود. شکل (۲) نمایشی از انواع ارتعاشات وارده بر رشته حفاری هست.

دسته‌بندی عواملی که باعث ایجاد ارتعاش در رشته حفاری شده و همچنین مدهای ارتعاشی ناشی از آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

مودهای تحریک شده اولیه، مدهایی می‌باشند که به دلیل وجود آن عامل، حتماً تحریک شده و شروع به ارتعاش می‌کنند ولی مودهای تحریک شده ثانویه مدهایی می‌باشند که عامل محرک ممکن است بتواند آن‌ها تحریک نمایند و یا ممکن است تحریک نشوند. با توجه به این که قطر رشته حفاری کمتر از قطر چاه است، رشته حفاری می‌تواند به‌صورت عرضی ارتعاش کند که مطابق جدول (۱) این مود ارتعاشی به‌عنوان مهم‌ترین عامل خرابی رشته حفاری خصوصاً بخش پایینی رشته حفاری مطرح است [۷]. البته میرایی سیستم باعث می‌گردد تا این ارتعاش در سطح زمین قابل تشخیص نباشد و این موضوع باعث پیچیدگی

بیشتر تحلیل آن می‌گردد و همین عامل باعث شده ارتعاشات عرضی رشته حفاری طی سالیان اخیر در کانون توجه تحقیقات قرار گیرد.
 پدیده چسبش-لغزش یکی از اتفاقات شایع در صنعت حفاری است که تاکنون مورد غفلت واقع شده است که این عدم بررسی کامل، امروزه در حفاری مورب بیشتر به چشم می‌آید. هدف از این سلسله مقالات بررسی جامع این اتفاق شایع در حفاری مورب خواهد بود.



شکل ۱ انواع ارتعاشات وارده بر رشته حفاری

جدول ۱ عوامل ارتعاشات رشته حفاری و مودهای تحریکی

عوامل فیزیکی	تحریک اولیه	تحریک ثانویه
عدم توازن در وزن	عرضی	عرضی-پیچشی-محوری
ریزش (رها شدن)	عرضی	محوری
مته سه مخروطی	محوری	عرضی-پیچشی
رشته مته سست	عرضی-پیچشی-محوری	-----
جابه‌جائی چرخشی	عرضی	محوری-پیچشی
جابه‌جائی ناهمگام	عرضی	محوری-پیچشی
حرکت تند رشته حفاری	عرضی	محوری-پیچشی

۲- فرضیات حاکم بر مسئله

در این بخش با بررسی فرضیات حاکم بر مسئله معادلات حاکم بر ارتعاشات رشته‌های حفاری به دست آورده خواهند شد. برای محاسبه این معادلات از روش انرژی استفاده می‌گردد و بر خلاف مقاله گذشته که بیشتر در مورد مکانیزم کلی حل در یک نرم افزار اجزا محدود مثل ANSYS™ یا ABAQUS™ مورد بحث قرار گرفت و در مقاله حاضر به روش لحاظ کردن اثر سیال در این دو نرم افزار اشاره می‌گردد که ماهیت آن‌ها با هم تفاوت چشم‌گیری دارند و در پایان قسمت چهارم بیان می‌گردد.



شکل ۲ مکانیزم کلی کارکرد رشته حفاری

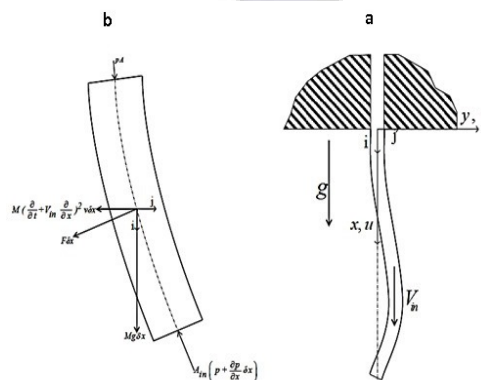
- برای ساده‌تر نمودن مدل‌سازی ارتعاشات رشته حفاری و به دست آوردن معادلات حاکم بر آن فرضیات منطقی لحاظ شده‌اند که در ذیل به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.
- ارتعاشات رشته حفاری در هر سه جهت فضایی مورد بررسی قرار می‌گیرد یک راستای طولی (U) و دو راستای عرضی (V, W). بررسی ارتعاشات در این راستاها به صورت پیوسته خواهد بود.
 - معادلات حاکم بر ارتعاشات عرضی رشته حفاری، به کمک روابط تیر اویلر- برنولی به دست می‌آید که با توجه به طول زیاد رشته حفاری، فرض بسیار مناسبی است.
 - از بررسی ارتعاشات پیچشی رشته حفاری خودداری کرده و متوجه صورت یک تیر در نظر گرفته می‌شود.
 - دوران متوجه با سرعت زاویه‌ای ثابت مدل شده است.
 - برای شرایط اولیه در حفاری مورب، از اثر مؤلفه عرضی وزن صرف نظر خواهد شد و رشته حفاری بدون شکم‌دادگی فرض می‌شود، اما افزایش طول آن در راستای محوری (به علت مؤلفه نیروی وزن) در نظر گرفته می‌شود.

۳- استخراج معادلات حاکم بر سیالات

می‌توان نیروهای وارد شده از طرف گل بر رشته حفاری را به صورت لزج، غیر لزج و اصطکاکی تقسیم نمود. در ادامه به بررسی روابط مربوط به هر کدام از این نیروها پرداخته می‌شود.

۳-۱- نیروی جریان داخلی گل حفاری

برای بدست آوردن روابط مربوطه، المان کوچکی از رشته حفاری و المان گل داخل آن که دارای طول Δx است در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳-۲ نمای کلی از جریان داخلی گل، b، المان گل در داخل رشته حفاری

با فرض آن که حجم این المان δD در نظر گرفته شود، تغییر تکانه خطی در داخل این المان برابر است با [۸]

$$\frac{dM}{dt} = \iiint_{\delta D} \left[\frac{\partial V}{\partial t} + (V_{in} \cdot \nabla) \cdot V_{in} \right] \rho_f dD \quad (1)$$

$$V = V_{in} \hat{i} + \frac{\partial v_f}{\partial t} \hat{j} + \frac{\partial w}{\partial t} \hat{k} \quad (2)$$

با فرض کوچک بودن تغییرات سرعت گل در راستای شعاعی و با صرف نظر از ایجاد جریان‌های ثانویه، سرعت گل را می‌توان بصورت رابطه (۲) در نظر گرفت [۸].

V_{in} سرعت گل داخل المان در هر لحظه، چگالی گل حفاری، M تکانه خطی و v و w جابه‌جایی عرضی رشته حفاری در دو راستا می‌باشد و با ترکیب روابط ۱ و ۲ می‌توان به رابطه ۳ رسید.

$$\frac{dM}{dt} = M_{in} \frac{\partial V_{in}}{\partial t} \delta x l + M_{in} \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_{in} \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 (v \hat{j} + w \hat{k}) \delta x l \quad (3)$$

که در این رابطه، M_{in} جرم بر واحد طول گل در رشته حفاری می‌باشد و برابر است با

$$(M_{in})_e = \frac{\pi}{4} \rho_f (d_{in})_e^2 \quad (4)$$

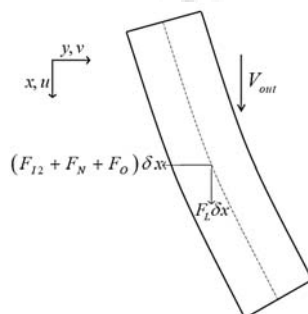
که برای رشته حفاری با فرض عدم تغییر سرعت جریان گل با زمان می‌توان نوشت

$$(F_{in})_e = - (M_{in})_e \left(\frac{\partial}{\partial t} + (V_{in})_e \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 (v \hat{j} + w \hat{k}) \quad (5)$$

F_{in} نیروی بازگرداننده که بر واحد طول بوده و توسط گل به رشته حفاری وارد می‌شود.

۳-۲- نیروی جریان خارجی گل حفاری

نیروهای وارده بر رشته حفاری از طرف جریان خارجی گل به ۳ دسته تقسیم می‌شوند که دو دسته در راستای عرضی و دسته سوم نیز در راستای طولی بر رشته حفاری تاثیر می‌گذارد [۸-۱۰].



شکل ۴ نمودار آزاد یک المان رشته حفاری و جریان خارجی گل و نیروهای وارد بر آن

F_{out} نیروی بازگرداننده در راستای عرضی (v) بر واحد طول می‌باشد که توسط جریان گل، به رشته حفاری وارد می‌شود و از رابطه ۶ محاسبه می‌شود

$$(F_{out})_e = -(M_{out})_e \left(\frac{\partial}{\partial t} + (V_{out})_e \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 (vj + wk) \quad (6)$$

$$(M_{out})_e = \frac{\pi}{4} \rho_f (C_M)_e (d_{out})_e^2 \quad (7)$$

V_{out} سرعت جریان خارجی گل در اطراف رشته حفاری و M_{out} جرم اضافی معادل گل می باشد.
 C_M ضریب تصحیح جرم معادل جریان خارجی گل است.

$$(C_M)_e = \frac{\left(\left(\frac{d_B}{(d_{out})_e} \right)^2 + 1 \right)}{\left(\left(\frac{d_B}{(d_{out})_e} \right)^2 - 1 \right)} \quad (8)$$

دومین نیروی وارده از طرف جریان خارجی گل بر رشته حفاری، نیروی پسای وارده در راستای عرضی و بر واحد طول می باشد که در اثر لزجت گل ایجاد می شود [۱۰]:

$$(F_N)_e = \frac{1}{2} C_f \rho_f (d_{out})_e (V_{out})_e^2 (C_f \sin \bar{\alpha} + C_D (\sin \bar{\alpha})^2) \quad (9)$$

که $\bar{\alpha} = \sin^{-1} \left[\frac{1}{(V_{out})_e} \left(\frac{\partial}{\partial t} + (V_{out})_e \frac{\partial}{\partial x} \right) \right]$ و

$$C_f = 0.0125 \quad 10$$

$$k = \frac{2\sqrt{2} (1 + \bar{v}^3)}{\sqrt{S} (1 - \bar{v}^2)^2} \rho_f A_{out} \Omega \quad 1$$

$$\bar{v} = \frac{d_{out}}{d_B} \quad 2$$

$$A_{out} = \pi (d_{out})_e L_e \quad 3$$

$$S = \Omega \frac{d_{out}^2}{4v} \quad 4$$

سومین نیروی وارده از طرف گل بر رشته حفاری، نیروی پسای وارده در راستای طولی است [۹]:

$$F_{L_i} = \frac{1}{2} C_f \rho_f (d_{out})_e (V_{out})_e^2 \cos \bar{\alpha} \quad 5$$

۳-۳- نیروی حاصل از فشار گل حفاری

نیروی حاصل از فشار گل را می‌توان به دو قسمت مجزا تفکیک نمود. قسمت اول، نیروی حاصل از فشار هیدرواستاتیک گل است که در اثر وزن آن ایجاد می‌شود. این نیرو به سادگی از قانون شناوری بدست می‌آید که حاصل تفاضل چگالی رشته حفاری از چگالی سیال حفاری است:

$$F_{ax} = (\rho_s - \rho_f)gA \quad (16)$$

قسمت دیگر، نیروی حاصل از افت فشار گل است که در اثر عبور جریان گل از داخل و همچنین خارج رشته حفاری به وجود می‌آید و توسط پمپی که عمل تزریق گل حفاری را انجام می‌دهد به رشته وارد می‌گردد.

۴- استخراج معادلات حاکم بر ارتعاشات

در مقاله قبل اینجانب، در مورد معادلات کلی حرکت که مبتنی بر روش انرژی و لاگرانژ بود مورد بررسی قرار گرفت که به دلیل عدم وجود گل حفاری در مورد محاسبه کار نیروی خارجی گل بحث نشد. در کار حاضر با توجه به وجود گل حفاری در دبی‌های مختلف این نیروها اهمیت فوق العاده‌ای دارند، لذا لازم است این نیروها مورد بررسی قرار گیرند که در ذیل به تفصیل به آن پرداخته می‌شود.

۴-۱- کار نیروی جریان داخلی گل حفاری

محاسبه کار توسط نیروی عرضی وارده از طرف جریان گل داخل رشته حفاری به صورت زیر است [۱۱-۱۳]:

(۱۷)

$$\delta W_{F_{inY}} = \int_{x_1}^{x_2+L_2} F_{inY} (\delta v) dx$$

(۱۸)

$$\delta W_{F_{inZ}} = \int_{x_1}^{x_2+L_2} F_{inZ} (\delta w) dx$$

که با تبدیل سرعت سیال در داخل رشته حفاری به دبی عبوری داریم:

$$W_{F_{inY}} = \delta \{v\}_e^T \left([M^{vvin}]_e \{\dot{v}\}_e + Q[C^{vvin}]_e \{v\}_e + Q^2[K^{vvin}]_e \{v\}_e \right) \quad (۱۹)$$

(۲۰)

$$\delta W_{F_{inZ}} = \delta \{w\}_e^T \left([M^{wvin}]_e \{\dot{w}\}_e + Q[C^{wvin}]_e \{w\}_e + Q^2[K^{wvin}]_e \{w\}_e \right)$$

۴-۲- کار نیروی بازگرداننده خارجی گل حفاری

به صورت مشابه برای نیروی عرضی بازگرداننده عرضی جریان گل خارجی رشته حفاری داریم [۱۱-۱۳]:

$$\delta W_{F_{outY}} = \int_{x_1}^{x_2+L_2} F_{outY} (\delta v) dx \quad (۲۱)$$

(۲۲)

$$\delta W_{F_{outZ}} = \int_{x_1}^{x_2+L_2} F_{outZ} (\delta w) dx$$

و با تبدیل سرعت سیال در خارج رشته حفاری به دبی عبوری داریم:

$$\delta W_{F_{outY}} = \delta \{v\}_e^T \left([M^{vvin}]_e \{\dot{v}\}_e + Q[C^{vvin}]_e \{v\}_e + Q^2[K^{vvin}]_e \{v\}_e \right) \quad (۲۳)$$

$$\delta W_{F_{outZ}} = \delta \{w\}_e^T \left([M^{wvin}]_e \{\dot{w}\}_e + Q[C^{wvin}]_e \{w\}_e + Q^2[K^{wvin}]_e \{w\}_e \right) \quad (۲۴)$$

۴-۳- کار نیروی های طولی

کار انجام شده توسط نیروی های وارده در راستای طولی F_L و F_P به کمک جا به جایی طولی نقاط مختلف رشته حفاری، (δu) به صورت زیر بدست می آید [۱۱-۱۳]:

$$\delta W_{F_x} = \int_{x_1}^{x_2+L_2} F_x (\delta u) dx = \delta \{u\}_e^T (Q^2[K^{uFL}]_e + Q^2[K^{uFP}]_e) \quad (۲۵)$$

۴-۴- کار نیروی پسای خارجی جریان گل

نیروی F_N حاصل از پسای وارده ناشی از لزجت گل می باشد و در راستای عرضی بر رشته حفاری وارد می گردد که به صورت زیر است:

$$\delta W_{F_{N_F}} = \int_{x_1}^{x_1+l_e} F_{N_F} (\delta v) dx \quad (26)$$

$$\delta W_{F_{N_Z}} = \int_{x_1}^{x_1+l_e} F_{N_Z} (\delta w) dx \quad (27)$$

که این روابط با توجه به رابطه ۹ به صورت زیر بدست می آید:

$$\delta W_{F_{N_F}} = \delta \{v\}_e^T \left([M^{vuv}]_e \{\ddot{v}\}_e + Q[C^{vuv}]_e \{\dot{v}\}_e + Q^2[K^{vuv}]_e \{v\}_e \right) \quad (28)$$

$$\delta W_{F_{N_Z}} = \delta \{w\}_e^T \left([M^{wvw}]_e \{\ddot{w}\}_e + Q[C^{wvw}]_e \{\dot{w}\}_e + Q^2[K^{wvw}]_e \{w\}_e \right) \quad (29)$$

کار حاضر توسط نرم افزار ANSYSTM انجام شده که به واسطه وجود workbench‌هایی همچون CFX و یا FLUENT نیازی به استفاده از فشار معادل همچون نرم افزار ABAQUSTM نیست. استفاده از فشار معادل به جای دبی در نرم افزار ABAQUSTM به دلیل بحث ALE است چرا که ماهیت جامدات لاگرانژی و سیالات اویلری هستند و هر جا اثر متقابل این دو داشته باشیم مبحث پیشرفته ای به نام Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method یا همان (ALE) پیش می آید.

۵- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت بررسی نتایج حاصل از روابط حاکم بر ارتعاشات رشته حفاری در چند بخش صورت می‌گیرد. در بخش اول در مورد معیارهای پایداری و عوامل مؤثر بر ناپایداری و نقطه خنثی بحث می‌شود. در بخش دوم در مورد شرایط مرزی صحبت می‌گردد که شامل چگونگی به دست آوردن نیروی محوری کششی اعمالی از بالا، نیروی دورانی اعمالی و چگونگی لحاظ کردن پدیده چسبش - لغزش هست و در نهایت در قسمت سوم نمودارهای خیز برای رشته حفاری به دست می‌آید و یک نتیجه کلی استنتاج می‌شود. در جدول (۲) مقادیری که از آن‌ها برای به دست آوردن نتایج استفاده شده، ارائه شده است. این داده‌ها مربوط به مدل ارائه شده توسط خولیف [۲] (به‌غیر از طول لوله وزنی) می‌باشند.

جدول ۲: مشخصات رشته و گل حفاری و ابعاد چاه

مشخصات مواد		مشخصات لوله حفاری	
۷۸۵۰ kg/m	چگالی رشته حفاری	۱۰۰۰ متر	طول
۱۵۰۰ kg/m	چگالی گل حفاری	۰/۰۹۵ متر	قطر داخلی
۲۱۰ GPa	مدول الاستیسیته	۰/۱۲۷ متر	قطر خارجی
مشخصات کلی		مشخصات طوق حفاری	
۰/۳ متر	قطر دیواره چاه	۵۰ متر	طول
۹/۸۱ متر/ثانیه	شتاب جاذبه	۰/۷۶۲۰ متر	قطر داخلی
۰/۰۵۲۴ رادیان	زاویه شیب چاه	۰/۲۲۸۶ متر	قطر خارجی

بخش اول: در زمینه‌ی پایداری کارهای بسیاری صورت گرفته است که مهم‌ترین علت‌های ناپایداری را می‌توان ۳ اصل ذکر کرد:
 - سرعت (و یا به عبارتی دبی) زیاد گل حفاری

- کماتش رشته حفاری تحت اثر نیروی فشاری P

- سرعت دورانی رشته حفاری

برای مورد اول که با توجه به تحقیقات قبل تزریق گل حفاری با سرعت چند صد لیتر بر ثانیه (به عنوان مثال ۲۵۰ لیتر بر ثانیه) باعث ناپایداری می شود اما در تحقیق پیش رو این مقدار کمتر از صد لیتر بر ثانیه است و مقدار بهینه ای دارد و برای مورد دوم کل وزن رشته حفاری با یک نیروی کششی از بالا مهار گردیده است. بر اساس تحقیقات صورت گرفته گذشته سرعت‌های دورانی ۵۰۰ rpm به بالا باعث ناپایداری رشته حفاری می‌شوند و این در حالی است که سرعت دورانی کاری مابین ۱۰۰ تا ۳۰۰ rpm است که در کار حاضر این سرعت دورانی ثابت و برابر با ۱۲۰ rpm لحاظ شده است [۱۴]. همین‌طور با توجه به تعریف نقطه خنثی که در ابتدا گفته شده وزن قسمتی از لوله وزنی است که از بالای چاه کشیده نمی‌شوند و این نقطه نه در کشش و نه در فشار است. در اینجا کل وزن از بالا مهار شده که به دو علت است، اول این که تحقیقات قبل پیرامون رشته حفاری در مورد مکان نقطه خنثی شامل ۱۳ و ۲۶ متر تحقیق شده و دوم این که در واقعیت وجود گل حفاری وزنی را به صورت همیشگی روی تیغه مته دارد [۱۵].

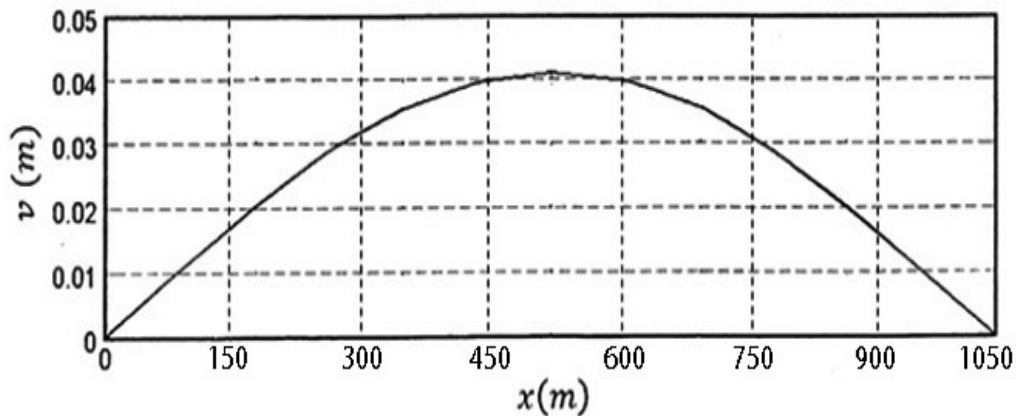
بخش دوم: میزان نیروی دورانی اعمالی به مدل ساخته از یک نیروی هارمونیک پیچشی برابر با $H = 10 + 10 \sin\left(\frac{10\pi t}{3}\right)$ که در کارهای گذشته استفاده شده لحاظ می‌گردد و سرعت زاویه‌ای ثابت و برابر ۱۲۰ rpm هست. برای محاسبه نیروی محوری کششی از بالا به رشته حفاری برابر با وزن کل رشته حفاری که بر اساس جدول (۲) به دست می‌آید و کمی کمتر از ۴۵۰ KN محاسبه می‌گردد؛ و در نهایت برای شرایط مرزی کف چاه از رابطه چسبش - لغزش خولیف که با ماکرو نویسی در Ansys اعمال شده است. صحت مدل ساخته شده و تحلیل آن بر اساس آنالیز مش تأیید می‌گردد و نوع المان‌ها از نوع لوله (Pipe) است. برای مدل سازی پدیده چسبش - لغزش مدل سازی عددی و ریاضی معدودی اتفاق افتاده است و به خاطر عدم قطعیت در اعمال شرایط انتهایی رشته حفاری می‌باشد و مدل سازی پدیده چسبش - لغزش هنوز یک چالش به حساب می‌آید چرا که اثر متقابل اصطکاک استاتیکی و دینامیکی باعث گسستگی معادلات مربوطه می‌شوند. یکی از بهترین روابط به تحقیق خولیف است که به صورت زیر می‌باشد:

$$WOB = W_0 + k_f x_0 (1 - \sin 2\pi f t) \quad (30)$$

که WOB وزن روی تیغه، $W_0 + k_f x_0$ وزن ثابت به اضافه جمله ای که بعد از اولین آشوب ناپدید می‌شود، f فرکانس اغتشاش، x_0 عمق برش، $f = v/x_0$ نرخ نفوذ است.

برای حفاری مورب از ۳ درجه تا ۵ درجه انحراف قائل می‌شوند که کار حاضر تنها دارای ۳ درجه انحراف از خط عمود هست و همچنین پایدارکننده‌ای در لوله وزنی وجود ندارد همچنین لحاظ شده مته در هر دقیقه ۲۰ سانتی‌متر در خاک نفوذ می‌کند.

بخش سوم: نمودار خیز حالت استاتیک رشته حفاری به صورت زیر می‌باشد. این نمودار انحنای رشته حفاری را با اعمال نیروی محوری از بالا و تحت تاثیر پدیده چسبش - لغزش که در حالت بدون حرکت می‌باشد را نشان می‌دهد.



شکل ۵: خیز عرضی سیستم تحت تاثیر نیروی وزن و پدیده چسبش- لغزش از پایین و نیروی مهار از بالا در حالت ایستا پایدار کننده ها پره های شعاعی هستند و اجازه می دهد مایع به راحتی بین آنها،لوله ها و دیواره چاه جریان یابد و برای به حداقل رساندن لرزش جانبی(عرضی) مته در طول کار استفاده می شوند.در زیر شایع ترین انواع پایدار کننده ها معرفی می گردد.



شکل ۶: از چپ Welded Blade Stabilizer; Variable Blade Stabilizer; Integral Blade Stabilizer

فاصله بین تثبیت کننده و دیواره چاه در حدود ۵۰ میلی متر است و فاصله بین دو تثبیت کننده های متوالی بر روی طوقه حفاری بین ۵ تا ۵۰ متر است اما این مقدار قابل بهینه سازی است و در کار حاضر با توجه به کمینه کردن میزان جا به جایی عرضی حد فاصل ۲۰ متر از بالای لوله وزنی(طوقه حفاری) تعیین گردیده است. در رشته حفاری به علت طولیل بودن اختلاف طول زیادی بین حالت افقی و عمودی می باشد و اگر این اختلاف طول زیاد با نیروی محوری از بالا مهار نشود موقعیت شکل زیر اجتناب ناپذیر است و باعث صدمه به چاه می شود.

A: Transient Structural
 Directional Deformation 3
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: m
 Global Coordinate System
 Time: 2
 1/24/2014 2:57 PM



شکل ۷: رشته حفاری یا یک پایدار کننده در مکان بهینه نیروی محوری مهار از بالا

۶- نتیجه گیری

به علت ایجاد اصطکاک زیاد در صورت تعداد زیاد وجود پایدار کننده در حفاری یافتن مکان بهینه پایدار کننده ها از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است که در این تحقیق تعیین گردید. همین طور نشان داده شد که پارامترهای زیادی در حفاری نقش کلیدی دارند که تعیین و اعمال صحیح نیروی محوری از بالای چاه برای کنترل شکم دادگی و جلوگیری از ایجاد ارتعاشات عرضی ناخواسته که مهم ترین علت بروز صدمات به چاه و تجهیزات حفاری است یکی از مهم ترین این عوامل است.

مراجع

1. Dykstra M. *Nonlinear drill string dynamics*, 1996, University of Tulsa, The Graduate School.
2. Khulief, Y.A. and H. Al-Naser, *Finite element dynamic analysis of drill string*. Finite Elements in Analysis and Design, 2005. **Volume 41**(13): p. 1270-1288.
3. Jansen, J.D. and L. van den Steen, *Active damping of self-excited torsional vibrations in oil well drill strings*. Journal of Sound and Vibration, 1995. **Volume 179**(4): p. 647-668.
4. Mason, J.S. and M. Sprawls, *Addressing BHA Whirl – The Culprit in Mobile Bay*, in *SPE/IADC Drilling Conference 1996*: New Orleans, Louisiana.
5. Jansen, J.D. *Non-linear rotor dynamics as applied to oilwell drill string vibrations*. Journal of Sound and Vibration, 1991. **Volume 147**(1): p. 115-135.
6. Tucker, W.R. and C. Wang, *An Integrated Model for Drill-string Dynamics*. Journal of Sound and Vibration, 1999. **224**(1): p.123-165.
7. Mitchell, R.F. and M.B. Allen, *Lateral vibration: the key to BHA failure analysis*. Journal Name: World Oil; (United States); Journal Volume: 200:4, 1985: p.Medium: X; Size: Pages: 101-104, 106.
8. Paidoussis, M.P. and N.T. Issid, *Dynamic Stability of pipes conveying fluid*. Journal of sound and Vibration and, 1974. **33**(3): p. 267-249.

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
www.Reservoir.ir

9. Paidoussis, M.P., *Dynamics of flexible slender cylinders in axial flow Part 1. Theory*. Journal of Fluid Mechanics, 1966. **26**(04): p. 717-736.
10. Paidoussis, M.P., *Dynamics of flexible slender cylinders in axial flow Part 2. Experiments*. Journal of Fluid Mechanics, 1966. **26**(04): p. 737-751.
11. Huebner, K.H., et al., *The Finite Element Method for Engineers* 2001: Wiley.
12. Thomson, W., *Theory of Vibration with Applications* 2004: Taylor & Francis.
13. Nayfeh, A. H. and D.T. Mook, *Nonlinear Oscillations* 1995: John Wiley & Sons.
14. Taheran, F. *Coupled vibration analysis of directional drilling string considering effect of drill mud*, 2012, M. Sc. Thesis; Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology.
15. Faraji Mahyari, M. *lateral vibration analysis of drill string, considering drill mud around it*, 2007, M. Sc. Thesis; Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology.
16. Damshenas, M. *Vibration Analysis of Drill String under Inclined Drilling Including Stick-Slip Phenomenon*, 2014, M. Sc. Thesis; Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, International campus.

