



تحلیل دینامیکی مدل المان محدود غیر خطی رشته حفاری

مازیار محمدزاده¹، محمدرضا قضاوی^{2*}، اکبر علی بیگللو³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-111، ghazavim@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 آذر 1392

پذیرش: 07 دی 1392

ارائه در سایت: 16 مهر 1393

کلید واژگان:

تحلیل رفتار دینامیکی

رشته حفاری

مدل المان محدود غیر خطی

چکیده

در این تحقیق رفتار دینامیکی و ارتعاشات مدل المان محدود غیرخطی رشته حفاری مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن تمام طول رشته حفاری و با استفاده از مدل تیر تیموشنکو سه بعدی، سختی هندسی شامل ترم‌های غیرخطی، جرم افزوده شده ناشی از سیال حفاری و تماس رشته حفاری با دیواره چاه در معادلات منظور و با ارائه مدلی کامل تر نسبت به تحقیقات گذشته، تأثیر حضور عوامل یادشده مورد تحلیل‌های اختصاصی قرار گرفته است. معادلات حرکت رشته حفاری با استفاده از روش انرژی و معادلات لاگرانژ به دست آورده شده و برای استخراج نتایج از معادلات مرتبه کامل استفاده شده است. برای نخستین بار محدوده‌ای از نقاط رشته حفاری که احتمال رخ دادن تماس در آن‌ها بیشتر از سایر نقاط شناسایی شده است. فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری محاسبه شده و با نتایج نرم‌افزارهای تجاری و مقادیر ثبت شده سر چاهی برای یک مدل واقعی یکسان مقایسه شده است. کوپل بودن ارتعاشات مدل، آزموده شده و تأثیر استفاده از مدل خطی و غیرخطی در تحلیل رفتار دینامیکی و ارتعاشات رشته حفاری به خصوص در تماس با دیواره چاه و تأثیر تغییر وزن روی مته بر وقوع تماس در پایدارکننده‌ها، تحلیل شده و زمان وقوع تماس در هر یک از پایدارکننده‌ها برای نخستین بار استخراج شده است.

Dynamic analysis of non-linear FE model of drillstring

Maziar Mohammadzadeh¹, Mohammad reza Ghazavi^{2*}, Akbar Alibeiglloo³

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, ghazavim@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 25 December 2013

Accepted 06 February 2014

Available Online 08 October 2014

Keywords:

Drillstring

Dynamic analysis

Non-linear FE model

ABSTRACT

In this research, dynamic behavior of non-linear finite element model of a drillstring is investigated. By considering total length of drillstring, a three-dimensional timoshenko beam element is employed. In addition the geometric stiffening effect, the added fluid mass and the contact between different parts of the drillstring and the borehole wall has been considered, with a more complete model than previous studies, the effects of these factors have been analyzed separately. The equations of motion are obtained and full order equations are used to drive the results. For the first time, a domain of drillstring points that the possibility of contact occurrence in them is more than other points, have been identified. The natural frequencies of the drillstring are evaluated and compared with the available commercial software results and recorded results for the actual drillstring. Coupling of vibrations of model is tested and the effect of linear and non-linear model in analysis of dynamic behavior and vibration of drillstring, especially in contact with the borehole wall and the effect of weight on bit change on the contact at stabilizers are analyzed and for the first time, the contact time in each of stabilizers have been evaluated.

1- مقدمه

کولار حفاری، مته و پایدارکننده‌هاست (BHA¹) نام دارد. با توجه به این‌که کولار حفاری تحت بار فشاری قرار دارد برای جلوگیری از کمانش آن‌ها را ضخیم‌تر از لوله‌های حفاری می‌سازند و برای کاهش ارتعاشات جانبی ناشی از مته روی آن‌ها تعدادی پایدارکننده که اندازه قطر آن‌ها تقریباً با قطر مته برابر است، قرار می‌دهند. سیستم محرکه در سطح عمدتاً شامل موتور الکتریکی، گیربکس و میز دوار است. گشتاور خروجی از موتور توسط کیلی از میز دوار به رشته حفاری منتقل می‌شود. کیلی، فوقانی‌ترین مفصل لوله

رشته حفاری جزء اصلی عملیات حفاری در صنعت نفت و گاز است که نقش انتقال گشتاور تولیدشده در سیستم محرکه را به مته حفاری دارد. هدف اصلی عملیات حفاری، حفر چاه توسط مته برای دسترسی به منابع نفت و گاز است. رشته حفاری به‌طور کلی از دو قسمت لوله‌های حفاری و کولار حفاری تشکیل شده است. لوله‌های حفاری لوله‌های باریکی هستند که قسمت فوقانی رشته حفاری را تشکیل می‌دهند. قسمت انتهایی رشته حفاری که شامل

1- Bottom hole assembly

Please cite this article using:

M. Mohammadzadeh, M. R. Ghazavi, A. Alibeiglloo, Dynamic analysis of non-linear FE model of drillstring, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 119-130, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Mohammadzadeh, M. R. Ghazavi, A. Alibeiglloo, Dynamic analysis of non-linear FE model of drillstring, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 119-130, 2015 (In Persian)

شیو [6] ارتعاشات جانبی رشته حفاری و حرکت لنگ زدن را در رشته‌های حفاری تحلیل کرده است. او کوپل بین ارتعاشات محوری و جانبی را مورد مطالعه قرار داده و با حل معادله کوپل از روش اختلاف محدود و با در نظر گرفتن اثر وزن اضافه و میرایی ناشی از سیال، تأثیر وزن و گشتاور وارد بر مته را بر فرکانس‌های طبیعی جانبی اول و دوم بررسی کرده است.

پاسلای و همکاران [7] فرکانس‌های تشدید ارتعاشات جانبی BHA را در حال حفاری با سنسورهای محوری و پیچشی در سطح ردیابی کرده، آن‌ها رفتار BHA را در یک حالت تشدید جانبی در حین لنگ‌زدن رو به جلو، توسط یک مدل تحلیلی، پیش‌بینی کرده‌اند.

جوگی و همکاران [8] ارتعاشات رشته حفاری را با نصب ابزار اندازه‌گیری ارتعاشات در نقاط مختلف رشته بررسی کرده و نتایج خود را با پاسخ‌هایی که توسط نرم‌افزارهای ندرید³، ویرل⁴، نت فرک⁵ و بیاسیس⁶ به‌دست آورده‌اند مقایسه و مورد بررسی قرار داده‌اند.

اسپانوس و همکاران [9] علاوه بر معرفی دلایل بروز ارتعاشات محوری، پیچشی و خمشی و اثر آن‌ها بر یکدیگر، به معرفی قسمت‌های مختلف رشته حفاری نیز پرداخته‌اند. همچنین به انواع تحلیل‌های موجود اشاره کرده و در هر قسمت افرادی را که در آن زمینه کار کرده‌اند، معرفی کرده‌اند.

اینگکان [10] یک مدل المان محدود برای تحلیل رفتار BHA چاه افقی ارائه کرده و در تحلیل خود از المان 12 درجه آزادی استفاده کرده است. جنس المان ارتوتروپیک در نظر گرفته شده و در هر جهت یک مدول الاستیسیته و مدول برشی تعریف کرده است، ایشان با حل استاتیکی، محل نقطه تماس رشته حفاری با دیواره را تعیین و سپس با حل دینامیکی فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها را برای وزن‌های متفاوت روی مته به‌دست آورده است.

خولیف و الناصر [11] تحلیل رفتار دینامیکی رشته‌های حفاری را به روش المان محدود انجام داده‌اند. آن‌ها با استفاده از روش انرژی و معادلات لاگرانژ، معادلات حرکت را برای رشته حفاری به‌دست آورده‌اند، بدین منظور با استفاده از المان تیر سه‌بعدی اوپلر- برنولی با 12 درجه آزادی و استخراج ماتریس‌های سختی و جرم المان از روابط انرژی پتانسیل و جنبشی معادلات حرکت را محاسبه کرده و در معادلات خود اثر اینرسی دورانی، کوپل پیچشی- جانبی، اثر ژيروسکوپ و اثر وزن رشته حفاری برای دو قسمت تحت کشش و فشار را لحاظ کرده‌اند. ایشان از اثر سیال حفاری و تماس رشته حفاری و سازند صرف‌نظر نکردند.

خولیف و همکاران [12] با افزودن اثرات پدیده چسبش- لغزش و لحاظ کردن جابه‌جایی‌های خمشی بزرگ در ارتعاشات محوری به مقاله [11] به تحلیل پدیده چسبش- لغزش پرداخته‌اند. آن‌ها مانند مقاله [11]، پس از محاسبه معادلات حاکم بر رشته حفاری، معادلات کاهش مرتبه یافته را محاسبه و به مقایسه بخشی از نتایج حاصل از آن با نتایج معادلات با مرتبه کامل پرداخته‌اند.

در تحقیق حاضر رفتار دینامیکی رشته حفاری توسط روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است، هدف اصلی این تحقیق ارائه مدلی جامع‌تر برای تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری است، بدین‌منظور برای مدل‌سازی المان‌های رشته حفاری از المان تیر تیموشنکو سه‌بعدی با 12 درجه آزادی استفاده شده و اثر کوپل پیچش- خمش، ژيروسکوپ، وزن رشته حفاری برای

حفاری، امکان چرخیدن و حرکت در راستای عمودی را برای رشته حفاری فراهم می‌کند. حرکت در راستای عمودی به‌وسیله یک سیستم طناب و قرقره که با یک جرثقیل کابلی و یک ترمز کار می‌کند، کنترل می‌شود. این سیستم از دکل آویزان و توسط قلاب به کیلی متصل است. نیروی محوری در بالای رشته حفاری را بار قلاب می‌نامند که معمولاً برابر وزن روی مته¹ است، وزن روی مته همان نیروی فشاری مورد نیاز برای عملیات حفاری است. سیال حفاری (گل حفاری) که معمولاً شامل آب و موادی با ویسکوزیته غیرنیوتنی است، از درون رشته حفاری به پایین پمپ می‌شود و براده‌های حفاری را از فضای بین رشته حفاری و چاه به بالا خارج می‌کند، سیال حفاری علاوه بر خارج کردن براده‌های حفاری، وظیفه سرد و روانکاری کردن مته حفاری را نیز برعهده دارد. شکل 1 نمای کلی سیستم حفاری را نشان می‌دهد.

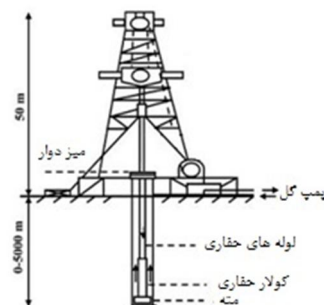
بایلی و فینی [1] ارتعاشات محوری و پیچشی رشته حفاری را به روش تحلیلی ساده بررسی نکرده‌اند. آن‌ها فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری ساده‌شده را در حالت محوری و پیچشی با یک روش حل آزمون و خطا به- دست آوردند.

زمیرالدین خان [2] ارتعاشات محوری و پیچشی محوری رشته حفاری را به روش اختلاف محدود برای شرایط مرزی متفاوت بررسی کرده و فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای مربوطه را برای هر کدام از شرایط مرزی به‌دست آورده است.

بیاسیس و پاین [3] اثر تحریک‌های مختلف بر رشته حفاری را توسط برنامه‌ای ساده به روش المان محدود محاسبه و نتایج خود را با نتایج سایر روش‌ها مقایسه کرده، آن‌ها در برنامه خود تحلیل پاسخ فرکانسی (آنالیز هارمونیک) را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند.

هو [4] تحلیل BHA را با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ انجام داده و با در نظر گرفتن BHA به‌صورت سه‌بعدی یک برنامه رایانه‌ای به نام دیدرل² را به روش اختلاف محدود تهیه کرده، اثر وزن رشته حفاری، گشتاور و انحنای چاه را روی مته در نظر گرفته و اثرات غیرخطی روی نیروی وارده به مته را که به دلیل تغییرهای بزرگ افزایش می‌یابد لحاظ کرده است.

برگس و همکاران [5] مهم‌ترین دلیل شکست در رشته حفاری را ارتعاشات جانبی معرفی کرده و عوامل مؤثر بر این نوع ارتعاشات را سرعت دورانی رشته حفاری، تماس رشته حفاری- دیواره چاه و مته- سازند حفاری و ارتعاشات وارده به سیستم از طریق پمپ گل حفاری را عنوان کرده‌اند. آن‌ها با آنالیز مودال و هارمونیک، فرکانس‌های بحرانی و شکل مودها را به‌دست آورده‌اند، حل را برای چند مدل رشته حفاری انجام داده و نتایج خود را با نتایج سر چاهی به‌دست آمده از چاه‌های مختلف مقایسه کرده‌اند.



شکل 1 نمای کلی سیستم حفاری

3- NADRID
4- WHIRL
5- NATFREQ
6- BHASYS

1- WOB
2- DIDRIL

- دو قسمت تحت کشش و فشار در معادلات لحاظ شده است.
- علاوه بر ترم های خطی، سختی هندسی شامل ترم های غیرخطی، در معادلات منظور شده و تأثیر حضور آن در بخش های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. معادلات حرکت رشته حفاری با استفاده از روش انرژی و معادلات لاگرانژ به دست آورده شده و برای نخستین بار، جهت استخراج تمام نتایج از معادلات مرتبه کامل استفاده شده است.
- در این مقاله اثر جرم افزوده شده ناشی از سیال حفاری که در بیشتر تحقیقات گذشته که به روش المان محدود انجام گرفته، لحاظ نشده، به صورت فرموله به معادلات افزوده شده و تأثیر حضور آن در بخش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.
- با انجام آنالیز استاتیکی، طول مؤثر رشته حفاری محاسبه شده و رابطه آن با مکان قرارگیری نقطه خنثی بررسی شده است. تأثیر قرارگیری نقطه خنثی در نقاط مختلف رشته حفاری، به عنوان یکی از پارامترهای مهم کنترل رفتار دینامیکی رشته حفاری، جرم افزوده شده ناشی از سیال حفاری بر فرکانس های طبیعی و رفتار دینامیکی آن مورد تحلیل قرار گرفته است. فرکانس های طبیعی رشته حفاری توسط روش المان محدود محاسبه شده و نتایج با نرم افزارهای تجاری موجود و نتایج ثبت شده سر چاهی برای یک مدل واقعی یکسان مقایسه شده است.
- صحت مدل ارائه شده برای در نظر گرفتن کوپل انواع ارتعاشات آزموده شده و تأثیر استفاده از مدل خطی و غیرخطی در تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری به ویژه در تماس با دیواره چاه مورد تحلیل قرار گرفته است.
- تماس رشته حفاری با دیواره چاه یکی از پیچیده ترین پدیده های حاکم بر رفتار دینامیکی رشته حفاری است که در تحقیقات پیشین که به روش المان محدود انجام شده، به طور اختصاصی مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق، تماس رشته حفاری با دیواره چاه مورد تحلیل قرار گرفته و الگوی وقوع تماس در نقاط مهم و وضعیت های مختلف قرارگیری نقطه خنثی بررسی شده است. در تحقیقات پیشین در زمینه تحلیل رفتار دینامیکی و ارتعاشات رشته حفاری، بیان شده است که مکان نقاط تماس رشته حفاری با دیواره چاه قابل پیش بینی نیست، اما تحقیق حاضر نشان می دهد که کمترین محدوده ای از نقاط رشته حفاری که با دیواره چاه تماس پیدا می کنند قابل پیش بینی است. برای بررسی تأثیر وزن روی مته به عنوان یکی از پارامترهای مهم کنترل رفتار دینامیکی رشته حفاری، تأثیر تغییر وزن روی مته بر وقوع تماس در پایدارکننده ها، تحلیل شده و زمان وقوع تماس در هریک از پایدارکننده ها برای نخستین بار استخراج شده است.

2-2- المان های رشته حفاری

عملیات گسسته سازی، رشته حفاری به المان هایی تقسیم می شود. برای مدل سازی المان های رشته حفاری از المان تیر تیموشنکو سه بعدی به طول L ، با دو گره در ابتدا و انتهای المان و 6 درجه آزادی در هر گره استفاده می شود، یعنی در مجموع هر المان 12 درجه آزادی دارد، دو عدد جابه جایی گره ای محوری، دو عدد جابه جایی گره ای پیچشی، چهار عدد جابه جایی جانبی - خمشی و چهار عدد جابه جایی دورانی - خمشی است. بنابراین جابه جایی های گره ای را می توان به صورت رابطه (1) نوشت:

$$\begin{aligned} u_e(x,t) &= N_u(x)e(t) & \theta_{xe}(x,t) &= N_{\theta x}(x)e(t) \\ v_e(x,t) &= N_v(x)e(t) & \theta_{ye}(y,t) &= N_{\theta y}(y)e(t) \\ w_e(x,t) &= N_w(x)e(t) & \theta_{ze}(z,t) &= N_{\theta z}(z)e(t) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن t زمان و N ها توابع شکل مربوط به هر یک از جابه جایی ها هستند، u_e ، v_e ، w_e به ترتیب جابه جایی ها در راستای محورهای x ، y و z هستند و θ_{xe} ، θ_{ye} ، θ_{ze} به ترتیب دوران حول محورهای x ، y و z هستند، شایان یاد است که محور x در راستای محور المان قرار دارد.

$e(t)$ بردار جابه جایی های گره ای است که نسبت به محورهای المان به صورت رابطه (2) تعریف می شود:

$$e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ \theta_{x1} \ \theta_{y1} \ \theta_{z1} \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ \theta_{x2} \ \theta_{y2} \ \theta_{z2}]^T \quad (2)$$

که (u_1, u_2) جابه جایی های گره ای محوری در راستای محور x ، (v_1, v_2) و (w_1, w_2) به ترتیب جابه جایی های گره ای جانبی در راستای محورهای y و z است و $(\theta_{x1}, \theta_{x2})$ جابه جایی های پیچشی حول محور x و $(\theta_{y1}, \theta_{y2})$ و $(\theta_{z1}, \theta_{z2})$ به ترتیب جابه جایی های دورانی در صفحات (xy) و (xz) و علامت $(\dots)^T$ بیانگر ترانپوز است. (شکل 2)

2- مدل ریاضی

برای دستیابی به معادلات حاکم بر رشته حفاری، بایستی با محاسبه روابط انرژی جنبشی و پتانسیل المان و نیروهای وارد بر المان، معادلات حاکم بر المان را با استفاده از معادلات لاگرانژ¹ تعیین نمود، سپس با هم گذاری این معادلات برای کل طول رشته و اعمال شرایط مرزی معادلات حاکم بر رشته حفاری را استخراج کرد.

2-1- فرضیات

در این تحقیق، المان مورد استفاده در مدل سازی رشته حفاری بر مبنای فرضیات اساسی زیر انتخاب شده است:

1- Lagrange's equations

2- Elastic
3- Homogeneous
4- Isotropic
5- Euler-bernoulli beam
6- Timoshenko beam
7- Conventional cubic hermitian polynomials

که به صورت رابطه (7) است:

$$M = M_t + M_r + M_\phi - 2M_e \quad (7)$$

که در آن M ماتریس جرم کلی المان، M_t ماتریس جرم ناشی از انتقال، M_r ماتریس جرم ناشی از اینرسی دورانی، M_ϕ ماتریس جرم ناشی از پیچش و M_e ماتریس جرم وابسته به زمان ناشی از کوپل پیچشی - خمشی است (دلیل وابسته به زمان بودن M_e ، این است که درایه‌های آن تابعی از مختصات گره‌ای $\{e\}$ است و از سوی دیگر به دلیل این که در ماتریس اینرسی ارائه شده است، کوپل اینرسی پیچشی - خمشی نیز نامیده می‌شود) و ماتریس G ماتریس ژيروسکوپ است، ضرایب و روابط موجود در رابطه (6) توسط روابط (8-13) عنوان می‌شود [11]:

$$M_t = \int_0^L \rho A N_t^T N_t dx \quad (8)$$

$$M_r = \int_0^L I_D N_\theta^T N_\theta dx \quad (9)$$

$$M_\phi = \int_0^L I_p N_\phi^T N_\phi dx \quad (10)$$

$$G = G^* - G^{*T}, G^* = \int_0^L I_p N_{\theta_z}^T N_{\theta_y} dx \quad (11)$$

$$M_e = \int_0^L I_p (N_\phi^T N_{\theta_z} e N_{\theta_y} - N_\phi^T N_{\theta_y} e N_{\theta_z}) dx \quad (12)$$

$$C = \int_0^L I_p dx \quad (13)$$

2-5- انرژی پتانسیل المان

انرژی کرنشی کل المان رشته حفاری مجموع دو انرژی است، یکی U_e انرژی کرنشی الاستیک و دیگری U_s انرژی کرنشی وابسته به سخت شوندگی محوری رشته حفاری در اثر وزن آن، که از رابطه (14) محاسبه می‌شود:

$$U_{tot} = U_e + U_s \quad (14)$$

که در آن U_e انرژی کرنشی الاستیک شامل ترم‌های خطی و ترم‌های غیرخطی به صورت رابطه (15) است:

$$U_e = U_{eL} + U_{eNL} \quad (15)$$

که در آن U_{eL} و U_{eNL} به ترتیب بیانگر روابط خطی و غیرخطی انرژی کرنشی الاستیک هستند.

U_{eL} برابر است با رابطه (16):

$$U_{eL} = U_a + U_t + U_b + U_{sh} \quad (16)$$

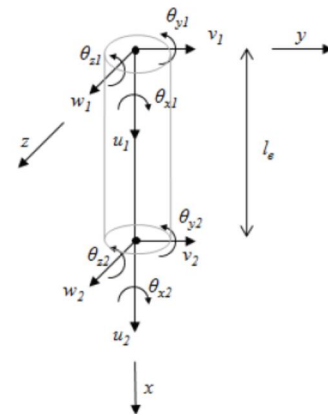
که در آن روابط (17-20) است:

$$U_a = \frac{1}{2} EA \int_0^L u'^2 dx \quad (17)$$

$$U_t = \frac{1}{2} GI_p \int_0^L \phi'^2 dx \quad (18)$$

$$U_b = \frac{1}{2} EI \int_0^L (v''^2 + w''^2) dx \quad (19)$$

$$U_{sh} = \frac{1}{2} k_s GA \int_0^L \{ (v' - \theta_z)^2 + (w' - \theta_y)^2 \} dx \quad (20)$$



شکل 2 المان سه بعدی با 12 درجه آزادی

2-3- وزن رشته حفاری

کار انجام شده توسط وزن رشته حفاری از رابطه (3) محاسبه می‌شود:

$$W = \int_0^L \rho g A u dx \quad (3)$$

که در آن ρ چگالی جرمی، A مساحت سطح مقطع، L طول المان و g شتاب گرانش است.

که با استفاده از روش‌های استخراج در المان محدود، بردار نیروی وزن برابر است با رابطه (4):

$$F_g = \int_0^L N_u^T \rho g A dx \quad (4)$$

2-4- انرژی جنبشی المان

انرژی جنبشی المان با انتگرال گیری از انرژی جنبشی حجم بی نهایت کوچک نقطه p بر حجم المان V به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \int_V \rho \left\{ \frac{dr_p}{dt} \right\}^T \left\{ \frac{dr_p}{dt} \right\} dV \\ &= \frac{1}{2} \int_V \rho (\dot{e}^T N^T N \dot{e} + \dot{e}^T N^T \tilde{\omega} r_p \\ &\quad + r_p^T \tilde{\omega} N \dot{e} + r_p^T \tilde{\omega}^T \tilde{\omega} r_p) dV \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن N ماتریس توابع شکل المان‌های سه بعدی تیر تیموشنکو و e همان بردار جابه‌جایی‌های گره‌ای المان رشته حفاری و ρ چگالی جرمی است، با توجه به این که ممان اینرسی نسبت به مرکز جرم المان محاسبه می‌شود جملات دوم و سوم رابطه (5) برابر صفر می‌شوند. نخستین جمله رابطه (5) انرژی جنبشی المان به دلیل حرکت انتقالی و آخرین جمله، انرژی جنبشی المان به دلیل اثرات دوران، شامل اثر ژيروسکوپ را نتیجه می‌دهد. با گسترش رابطه (5) و استفاده از روش استخراج ماتریس‌ها از روابط انرژی، رابطه (5) به صورت رابطه (6) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \dot{e}^T M_t \dot{e} + \frac{1}{2} \dot{e}^T M_\phi \dot{e} + \frac{1}{2} \dot{e}^T M_r \dot{e} - \\ &\quad 2 \left(\frac{1}{2} \dot{e}^T M_e \dot{e} \right) + \frac{1}{2} C \dot{\Omega}^2 - \dot{\Omega} \dot{e}^T G e \\ &= \frac{1}{2} \dot{e}^T M \dot{e} + \frac{1}{2} C \dot{\Omega}^2 - \dot{\Omega} \dot{e}^T G e \end{aligned} \quad (6)$$

$$k_{gs} = \int_0^L F(x) [N_v'^T N_v' + N_w'^T N_w'] dx \quad (29)$$

که k_{gs} ماتریس سختی محوری ناشی از وزن رشته حفاری است، که برای دو قسمت تحت فشار و کشش در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه اثرات نرم‌شوندگی قسمت تحت فشار و اثرات سخت‌شوندگی قسمت تحت کشش را دربردارد.

بنابراین ماتریس سختی کل المان برابر است با رابطه (30-31):

$$K_{tot} = K + k_g(e) \quad (30)$$

$$K = k_a + k_t + k_b + k_{sh} + k_{gs-Ten} + k_{gs-Com} \quad (31)$$

2-6- سیال حفاری

سیال حفاری که به گل حفاری موسوم است (شامل آب و مواد با ویسکوزیته غیرنیوتنی و در مواقع اضطراری گل رس محلی) از طریق پمپ و شلنگ مخلوط‌کننده که آب را با فشار زیاد انتقال می‌دهد تولید و در یک چاله و یا مخزن فلزی نگهداری می‌شود و M_f جرم افزوده سیال (ماتریس جرم سیال) به‌صورت (32) بیان می‌شود [13].

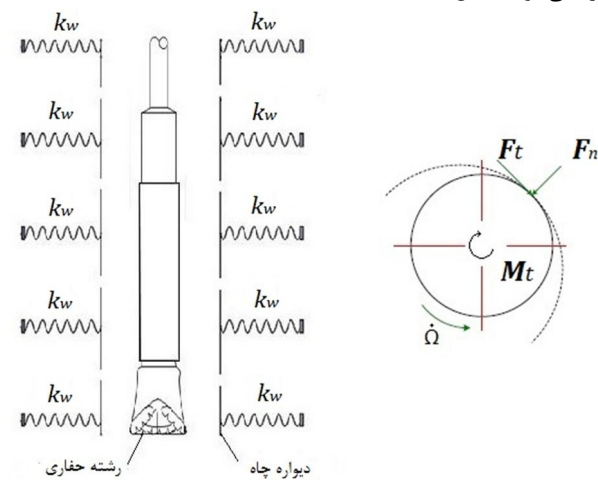
$$M_f = \int_0^L C_M (N_v'^T N_v' + N_w'^T N_w') dx \quad (32)$$

و در آن C_M ضریب جرم افزوده سیال حفاری است، که به مشخصات سیال و چاه بستگی دارد.

2-7- تماس رشته با دیواره چاه

تماس رشته حفاری با دیواره چاه یکی از پدیده‌های مهم و مؤثر در رفتار دینامیکی و ارتعاشات رشته حفاری است، که موجب غیرخطی و پیچیده شدن معادلات حاکم بر رشته حفاری می‌شود.

در این تحقیق تماس بین نقاط مختلف رشته حفاری و دیواره چاه با مجموعه‌ای از فنرها مدل شده است. در اثر تماس بین رشته حفاری و دیواره چاه، در محل تماس، دو نیروی متمرکز عمودی بر صفحات تماس و نیروی متمرکز مماسی بر سطوح تماس و گشتاور اصطکاکی متمرکز به رشته حفاری وارد می‌شود. (شکل‌های 3-4)



شکل 3 تماس بین رشته حفاری و دیواره چاه

شکل 4 مدل سازی تماس با مجموعه فنرها

و U_a, U_b, U_t, U_{sh} به ترتیب انرژی پتانسیل ناشی از تغییر شکل‌های محوری، پیچشی، خمشی و برشی است و مشتق x با علامت پریم ($'$) نشان داده شده است.

U_{ENL} با لحاظ کردن ترم‌های غیرخطی مرتبه دو و پایین‌تری که از حاصل‌ضرب U' با V' و W' تولید می‌شود و توان‌های U' و با صرف‌نظر کردن از سایر ترم‌های غیرخطی در نظر گرفته شده، که به آن انرژی پتانسیل ناشی از سختی هندسی گویند، با U_g نمایش داده می‌شود و پس از مرتب کردن روابط به‌صورت (21) بیان می‌شود:

$$U_g = \frac{1}{2} \int_0^L \{ EA(u'^3 + u'v'^2 + u'w'^2) + EI(3u'v''^2 + 3u'w''^2) \} dx \quad (21)$$

و انرژی کرنشی وابسته به سخت‌شوندگی محوری رشته حفاری در اثر وزن آن، U_s ، به‌صورت (22) بیان می‌شود [12]:

$$U_s = \frac{1}{2} \int_0^L F(x)(v' + w') dx \quad (22)$$

$F(x)$ بیانگر نیروی وزن رشته حفاری است، همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، رشته حفاری به دو قسمت تحت فشار و تحت کشش تقسیم می‌شود، نقطه جدایی این قسمت‌ها نقطه خنثی نام دارد که به‌عنوان نقطه‌ای که نیروی محوری ناشی از وزن در آن صفر است، در نظر گرفته می‌شود، بنابراین لازم است که نیروی $F(x)$ برای هر دو قسمت فشاری و کششی تعریف شود.

سرانجام با استفاده از روش استخراج ماتریس‌ها از روابط انرژی، ماتریس‌های سختی از روابط انرژی پتانسیل به شرح روابط (23-28) استخراج شده‌اند:

$$k_a = EA \int_0^L N_u'^T N_u' dx \quad (23)$$

$$k_t = G I_p \int_0^L N_\phi'^T N_\phi' dx \quad (24)$$

$$k_b = EI \int_0^L (N_v''^T N_v'' + N_w''^T N_w'') dx \quad (25)$$

$$k_{sh} = k_s GA \int_0^L B_s'^T B_s' dx \quad (26)$$

$$B_s = \begin{bmatrix} N_v' - N_{\theta_z} \\ N_w' + N_{\theta_y} \end{bmatrix}^T \quad (27)$$

$$k_g = \int_0^L \left\{ EA \left[\frac{3}{2} N_u'^T N_u' e N_u' + \left(\frac{1}{2} N_u'^T N_v' e N_v' + N_v'^T N_u' e N_v' \right) + \left(\frac{1}{2} N_u'^T N_w' e N_w' + N_w'^T N_u' e N_w' \right) \right] + 3EI \left[\frac{3}{2} N_u''^T N_v'' e N_v'' + 3N_v''^T N_u'' e N_v'' + \frac{3}{2} N_u''^T N_w'' e N_w'' + 3N_w''^T N_u'' e N_w'' \right] \right\} dx \quad (28)$$

که $k_a, k_b, k_t, k_{sh}, k_g$ به ترتیب ماتریس‌های سختی محوری، پیچشی، خمشی، برشی و سختی هندسی المان می‌باشند، لازم به بیان است به دلیل وجود بردار مختصات گره‌ای e در ماتریس سختی هندسی این ماتریس وابسته به جابه‌جایی‌های گره‌ای است و برابر است با رابطه (29):

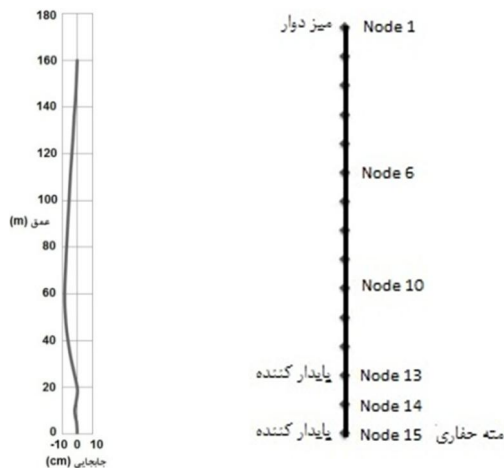
تحلیل‌های دینامیکی اولین پایدارکننده و سر مته حفاری بر گره 15 منطبق شده و شرایط مرزی حاکم بر مته حفاری بر آن‌ها اعمال می‌شود.

3-1- تحلیل استاتیکی رشته حفاری

همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، برای انجام عملیات حفاری، رشته حفاری به آرامی درون چاه گذاشته می‌شود، هنگامی که مته با کف چاه تماس پیدا می‌کند، نیرویی از کف چاه به رشته حفاری وارد می‌شود، که این نیرو و وزن رشته عامل به‌وجود آمدن دو قسمت تحت فشار و تحت کشش در رشته حفاری است، با پایین‌تر آمدن رشته حفاری در چاه و افزایش نیروی وارده از سوی چاه، رشته حفاری خم‌شده و بخش عمده آن به دیواره چاه تکیه می‌زند. اولین نقطه‌ای که رشته حفاری در بالای پایدارکننده دوم به دیواره چاه تکیه می‌زند را نقطه تماس استاتیکی می‌نامند، که این نقطه علی‌رغم این‌که در تحقیقات گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته، از اهمیت ویژه‌ای در آنالیز مودال و حتی پاسخ‌های دینامیکی سیستم و تحلیل دینامیکی تماس رشته حفاری با دیواره چاه برخوردار است، که این موضوع در بخش‌های پسین مقاله به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

فاصله سر مته تا نقطه تماس استاتیکی را طول مؤثر¹ رشته حفاری می‌نامند. برای محاسبه طول مؤثر رشته حفاری از آنالیز استاتیکی رشته حفاری استفاده می‌شود. شکل (5-ب) نمای تغییر شکل استاتیکی رشته حفاری را در حالتی که نقطه خنثی در وسط کولار حفاری قرار دارد را نشان می‌دهد، نکته حایز اهمیت آن است که وجود پایدارکننده‌ها (به‌ویژه پایدارکننده دوم) سبب می‌شود که رشته حفاری در محل تماس استاتیکی به‌صورت مماس بر دیواره چاه قرار گیرد [8].

برای بررسی تأثیر مکان قرارگیری نقطه خنثی بر طول مؤثر رشته حفاری، طول مؤثر رشته حفاری برای مکان‌های مختلف قرارگیری نقطه خنثی محاسبه شده و در جدول 1 ارائه شده است.



شکل 5-الف المان‌بندی رشته حفاری برای تحلیل‌های دینامیکی
شکل 5-ب نمای تغییر شکل استاتیکی رشته حفاری

جدول 1 طول مؤثر رشته حفاری را برای مکان‌های مختلف نقطه خنثی

95/38	30/19	15/095	مکان نقطه خنثی (NP) ² (متر)
51/03	54/89	56/12	طول مؤثر رشته حفاری (متر)

1- Effective length
2- Neutral point

نیروها و گشتاور به‌وجود آمده در اثر اصطکاک عبارتند از روابط (33-35):

$$F_n = \begin{cases} 0 & \gamma \leq g \\ -k_w(\gamma - g) & \gamma > g \end{cases} \quad (33)$$

$$F_t = \mu F_n \text{sign}(\dot{\Omega}) \quad (34)$$

$$M_t = -0.5 F_t D_o \quad (35)$$

که F_n نیروی تماس در راستای عمودی، F_t نیروی تماس در راستای مماسی با استفاده از قانون اصطکاکی کولمب کلاسیک و M_t گشتاور اصطکاکی، $\gamma = \sqrt{v^2 + w^2}$ جابه‌جایی شعاعی رشته حفاری، k_w ضریب سختی تماس رشته حفاری و دیواره چاه، μ ضریب اصطکاکی سطوح تماس $g = 0.5(D_{ch} - D_o)$ فاصله شعاعی خالی نخستین بین مراکز رشته حفاری و چاه است، جابه‌جایی جانبی رشته حفاری تا زمانی که فضای خالی بین رشته حفاری و دیواره چاه وجود دارد نامقید است. برای هر گره‌ای که اندازه جابه‌جایی شعاعی آن بزرگ‌تر از فضای خالی بین رشته حفاری و دیواره چاه باشد، فنر اضافه‌شده به سیستم فعال می‌شود تا تماس بین رشته حفاری و دیواره چاه را مدل کند.

2-8- معادلات حاکم

به‌طور کلی معادلات حرکت سیستم را با استفاده از معادلات لاگرانژ به‌صورت رابطه (36) می‌توان محاسبه کرد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (36)$$

که $L = (T - U)$ تابع لاگرانژ، q بردار مختصات تعمیم‌یافته و Q بردار نیروهای تعمیم یافته است، که با محاسبه L و استفاده از پروسه استاندارد روی هم‌گذاری در روش المان محدود، معادلات حرکت لاگرانژ برای سیستم کامل به‌صورت رابطه (37) خواهد بود:

$$([M] + [M_f])\{\ddot{q}\} + \dot{\Omega}[G]\{\dot{q}\} + ([K] + [K_g(q)])\{q\} = \{Q\} \quad (37)$$

که $[M]$ ماتریس جرم کلی، $[M_f]$ ماتریس جرم افزوده سیال کلی، $[G]$ ماتریس ژبروسکویی کلی، $[K]$ ماتریس سختی کلی و $[K_g(q)]$ ماتریس سختی هندسی کلی است.

3- نتایج

برای استخراج نتایج، معادله (37) براساس ماتریس‌های تشکیل‌دهنده آن، به‌صورت توسعه‌یافته در یک الگوریتم رایانه‌ای در برنامه متلب نوشته شده است.

برای آنالیز مودال تعداد 160 المان در نظر گرفته شده و برای تحلیل‌های دینامیکی از تعداد 14 المان استفاده شده است، که این تعداد با بررسی تعداد المان‌های متفاوت که دو شرط کاهش حجم معادلات و دقت لازم در همگرایی نتایج لازم را داشته باشند انتخاب شده است، شکل (5-الف).

برای اعمال شرایط مرزی کلی حاکم بر سیستم، جابه‌جایی‌های جانبی و دورانی در محل قرارگیری میز دوار، جابه‌جایی‌های جانبی در محل قرارگیری پایدارکننده‌ها و جابه‌جایی‌های جانبی و محوری در محل قرارگیری مته صفر در نظر گرفته شده‌اند. اولین گره مدل المان محدود رشته حفاری منطبق بر میز دوار در سطح و آخرین گره به مته حفاری در پایین‌ترین نقطه مدل اختصاص دارد. با توجه به نزدیک بودن اولین پایدارکننده و مته حفاری، در

جدول 4 فرکانس‌های جانبی رشته حفاری

شماره مود	ثبت شده (هرتز)	بیاسیس (هرتز)	نت فرک (هرتز)	ویرل (هرتز)	المان محدود (هرتز)
1	1/30	1/30	1/67	1/21	1/19
2	2/01	2/05	-	2/03	1/83
3	2/57	2/51	2/49	2/54	2/63
4	3/28	3/52	3/10	3/42	3/39
5	4/73	4/76	4/37	4/71	4/82

برای بررسی تأثیر سیال حفاری بر فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری، معادله (38) با نادیده گرفتن M_f حل شده است، جدول 5 مقادیر فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری را در غیاب سیال حفاری و برای 5 مود اول نشان می‌دهد.

مقایسه مقادیر فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری در غیاب سیال حفاری موجود در جدول 5، با فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری با در نظر گرفتن سیال حفاری که در ستون‌های آخر جداول (4-2) ارائه شده، نشان می‌دهد که فرکانس‌های طبیعی محوری و پیچشی رشته حفاری در غیاب سیال حفاری بدون تغییر می‌مانند و فرکانس‌های جانبی رشته حفاری افزایش می‌یابند، در پژوهش‌های عملی دلیل این پدیده حرکت سیال داخل و خارج رشته حفاری به واسطه جابه‌جایی جانبی رشته حفاری یاد شده، حال آن‌که جابه‌جایی محوری و پیچشی رشته حفاری تأثیر محسوسی در حرکت سیال داخل و خارج رشته حفاری ندارند [8].

برای بررسی تأثیر مکان نقطه خنثی بر فرکانس‌های جانبی رشته حفاری، نقطه خنثی در سه نقطه مختلف در نظر گرفته شده و 5 فرکانس اول جانبی مربوط به هر وضعیت محاسبه شده است، همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله نقطه خنثی از سر مته و در نتیجه افزایش وزن روی مته، فرکانس‌های جانبی رشته حفاری کاهش می‌یابند.

نتیجه حائز اهمیت این است که افزایش وزن روی مته از طرفی سبب کاهش طول مؤثر رشته حفاری می‌شود و از این لحاظ اثری افزایش یافته بر فرکانس‌های جانبی رشته حفاری دارد، ولی اثر نرم‌شوندگی ناشی از آن سبب کاهش فرکانس‌های جانبی رشته حفاری می‌گردد، که در نهایت با توجه به این‌که نرم‌شوندگی ناشی از وزن روی مته اثر قابل ملاحظه‌تری داراست،

جدول 5 مقادیر فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری در غیاب سیال حفاری

شماره مود	فرکانس طبیعی محوری (هرتز)	فرکانس طبیعی پیچشی (هرتز)	فرکانس طبیعی جانبی (هرتز)
1	-	4/67	1/44
2	9/23	13/86	2/18
3	-	23/34	3/07
4	26/94	35/01	4/44
5	41/13	43/17	5/63

جدول 6 مقادیر فرکانس‌های طبیعی جانبی رشته حفاری (بر حسب هرتز) برای مکان‌های مختلف قرارگیری نقطه خنثی از سر مته

شماره مود	نقطه خنثی در 15 /095 متری	نقطه خنثی در 30/19 متری	نقطه خنثی در 95/38 متری
1	1/19	1/15	1/03
2	1/83	1/79	1/66
3	2/63	2/6	2/45
4	3/39	3/33	3/2
5	4/82	4/77	4/61

نقطه اول، در فاصله 15/092 متری از سر مته، وسط قسمت کولار حفاری، نقطه دوم، در فاصله 30/19 متری از سر مته در محل جدا شدن بخش کولار حفاری و لوله‌های حفاری، نقطه سوم، در فاصله 95/38 متری از سر مته در وسط بخش لوله‌های حفاری قرار دارد، همان‌طور که در جدول 1 مشاهده می‌شود با بالا رفتن نقطه خنثی و در نتیجه افزایش وزن روی مته طول مؤثر رشته حفاری کاهش می‌یابد.

3-2- تحلیل مودال رشته حفاری

برای بررسی صحت مدل و شرایط حاکم بر آن، فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده توسط روش المان محدود¹ ارائه شده در این مقاله با فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده توسط 4 نرم‌افزار تجاری و مقادیر ثبت شده عملی² برای یک مدل رشته حفاری واقعی و یکسان، با شرایط مرزی مشابه که در منبع [8] موجود است، مقایسه شده و در جداول (4-2) ارائه شده است، برای مکان نقطه خنثی در 15/095 متری از سر مته در نظر گرفته شده‌اند.

نکته حائز اهمیت این است که در این تحقیق، برای محاسبه فرکانس‌های جانبی رشته حفاری از طول مؤثر رشته حفاری استفاده شده، که با توجه به صحت نتایج می‌توان نتیجه گرفت که فقط بخشی از رشته حفاری که زیر نقطه تماس استاتیکی قرار دارد (طول مؤثر رشته حفاری)، بر فرکانس‌های جانبی اثر دارد.

نکته حائز اهمیت در جدول 2 این است که فرکانس‌های اول و سوم محوری توسط نرم‌افزارهای تجاری و مدل المان محدود حاضر گزارش نشده‌اند، علت این مساله را می‌توان در شرایط مرزی اعمال‌شده برای سیستم دانست، اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده سر چاهی و مدل‌های مربوطه را به رفتار غیرخطی سیستم آویزان‌کننده رشته حفاری در سطح فوقانی نسبت می‌دهند، که بر شرایط مرزی سیستم در بالاترین نقطه رشته حفاری و در راستای محوری تأثیر می‌گذارد [8].

مقایسه فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده توسط روش المان محدود ارائه شده در این مقاله با فرکانس‌های طبیعی داده شده توسط 4 نرم‌افزار تجاری و مقادیر اندازه‌گیری شده عملی همان‌طور که در جداول 2 تا 4 ملاحظه می‌شود، بیانگر صحت قابل قبول مدل المان محدود حاضر است.

جدول 2 فرکانس‌های محوری رشته حفاری

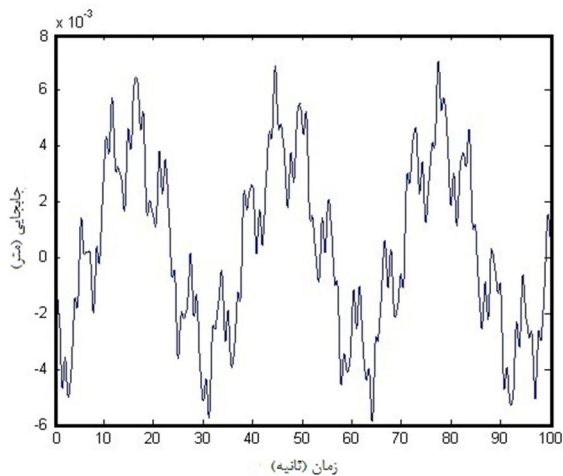
شماره مود	ثبت شده (هرتز)	بیاسیس (هرتز)	نت فرک (هرتز)	ویرل (هرتز)	المان محدود (هرتز)
1	5/54	-	-	-	-
2	9/70	9/06	8/7	8/53	9/23
3	14/54	-	-	-	-
4	26/3	26/01	25/4	24/86	26/94
5	40/25	40/74	40/1	39/43	41/13

جدول 3 فرکانس‌های پیچشی رشته حفاری

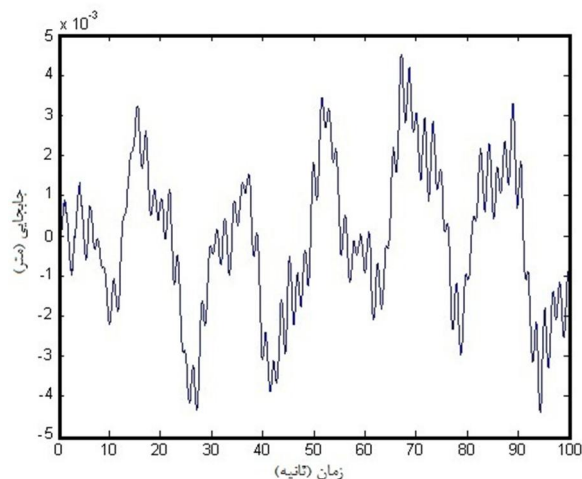
شماره مود	ثبت شده (هرتز)	بیاسیس (هرتز)	نت فرک (هرتز)	ویرل (هرتز)	المان محدود (هرتز)
1	5/00	1/30	3/80	3/83	4/67
2	14/40	9/44	13/46	13/61	13/86
3	23/50	20/71	24/53	24/82	23/34
4	34/30	32/79	35/51	35/95	35/01
5	44/30	44/78	44/94	45/52	43/17

1- FEM
2- Recorded

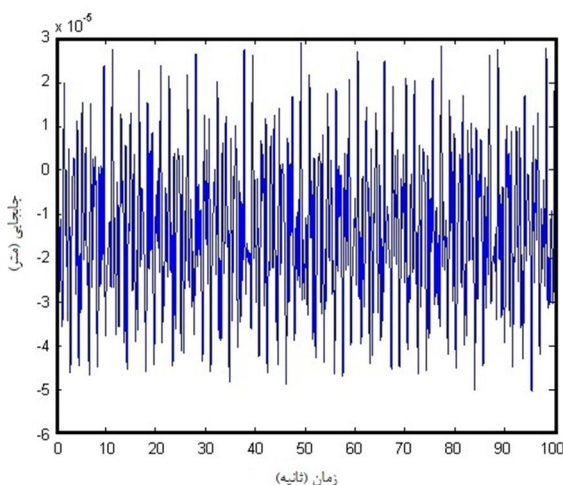
[12]، در این تحقیق با توجه به استفاده از مدل با مرتبه کامل، دقت محاسبات از میزان بالای صحت برخوردار است.



شکل 6 پاسخ گذرای دینامیکی در راستای محور Y ، به واسطه جابه‌جایی اولیه در راستای محور Y



شکل 7 پاسخ گذرای دینامیکی در راستای محور Z ، به واسطه جابه‌جایی اولیه در راستای محور Y



شکل 8 جابه‌جایی محوری، به واسطه جابه‌جایی اولیه در راستای محور Y

بنابراین برآیند این دو اثر متضاد به سمتی است که با افزایش وزن روی مته، فرکانس‌های جانبی رشته حفاری می‌کاهد.

لازم به اشاره است که همان‌طور که در تحقیقات پیشین نیز بیان شده است اجزاء جزئی و اتصالات رشته حفاری تأثیر بسیار ناچیزی بر مقدار فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری دارند [14]، که نتایج حاصل از تحقیق حاضر مبنی بر استفاده از یک مدل المان محدود پیوسته در محاسبه فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری مؤید این مطلب است.

3-3- پاسخ‌های دینامیکی

در این بخش توانایی مدل محاسباتی المان محدود رشته حفاری برای تحلیل پاسخ‌های دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است، علاوه بر این، صحت مدل توسعه یافته برای در نظر گرفتن کوپلینگ بین انواع ارتعاشات محوری- پیچشی- جانبی آزموده شده و تأثیر استفاده از مدل خطی و غیرخطی مورد تحلیل قرار گرفته است. شکل‌های 6 و 7 به ترتیب پاسخ گذرای دینامیکی گره شماره 6 مدل المان محدود رشته حفاری در راستای محور Y و محور Z را به تحریکی که بصورت جابه‌جایی اولیه در راستای محور Y و در گره شماره 10 اعمال می‌شود نشان می‌دهد، شماره‌گذاری المان‌ها از بالا به پایین انجام شده است (شکل 5-الف).

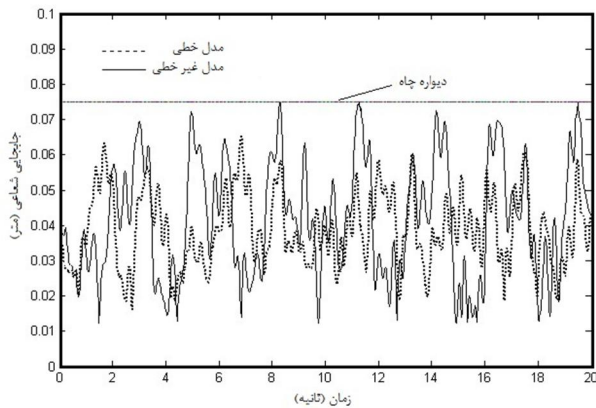
شکل 7 کوپل بودن ارتعاشات جانبی رشته حفاری در راستای محورهای Y و Z را نشان می‌دهد، که در نتیجه کوپل ارتعاشات جانبی، تحریک در راستای محور Y ، پاسخ در راستای محور Z را منجر می‌شود [11].

شکل 8 جابه‌جایی محوری گره شماره 6 مدل المان محدود رشته حفاری، بواسطه تحریکی که به‌صورت جابه‌جایی اولیه در راستای محور Y و در گره شماره 10 اعمال می‌شود را نشان می‌دهد، در واقع شکل 8 بیانگر کوپل بودن ارتعاشات محوری و جانبی رشته حفاری است، این کوپل به واسطه لحاظ کردن ماتریس سختی هندسی در معادلات دینامیکی رشته حفاری اعمال شده است، به این معنا که در صورت لحاظ نکردن ماتریس سختی هندسی در معادلات دینامیکی، در اثر تحریک جانبی، ارتعاشات محوری رخ نمی‌داد.

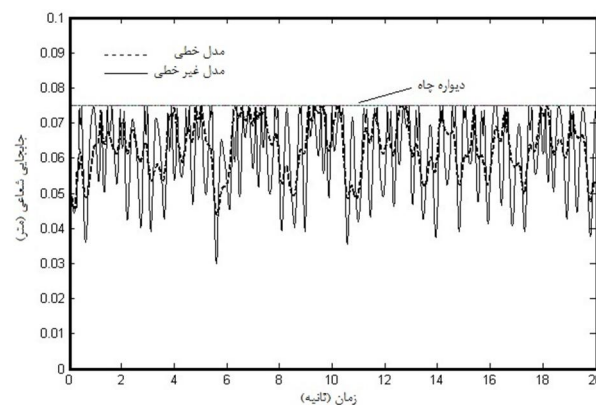
شکل 9 جابه‌جایی پیچشی گره شماره 6 مدل المان محدود رشته حفاری، به‌واسطه تحریکی که به‌صورت جابه‌جایی اولیه در راستای محور Y و در گره شماره 10 اعمال می‌شود را نشان می‌دهد. شکل 9 بیانگر کوپل بودن ارتعاشات پیچشی و جانبی رشته حفاری است، این کوپل بودن به‌واسطه لحاظ کردن M_e ماتریس جرم ناشی از کوپل پیچشی- خمشی در معادلات دینامیکی رشته حفاری به‌وجود آمده است. علی‌رغم این‌که جابه‌جایی‌های ناشی از کوپل بودن ارتعاشات مقادیر کوچکی است و در برخی از تحقیقات از آن صرف‌نظر می‌شود، اما همین مقدار کوپل شدن ارتعاشات در تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری در چاه‌های مایل و یا هنگامی که رشته حفاری دچار کمناش شود و به‌خصوص در تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری در اثر تماس با دیواره چاه، مقدار قابل توجهی خواهد بود.

شکل‌های (7-9) بیانگر کوپل انواع ارتعاشات رشته حفاری است، در واقع با توجه به این‌که تحریک در راستای جانبی اعمال شده است، پاسخ دینامیکی رشته حفاری به این تحریک‌ها در راستاهای دیگر فقط به دلیل در نظر گرفتن ترم‌های کوپل‌کننده (خطی و یا غیرخطی) در معادلات حرکت وجود خواهد داشت [11].

در تحقیقات گذشته، برای حل معادلات از کاهش مرتبه معادلات دینامیکی سیستم استفاده شده است، که حسب تعداد، نوع و نحوه شرکت مودها در کاهش مرتبه سیستم، دقت جواب‌ها به‌صورت نسبی تعیین می‌گردد



شکل 10 جابه‌جایی شعاعی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 15/095 متری از سر مته قرار دارد، برای دو مدل خطی و غیرخطی



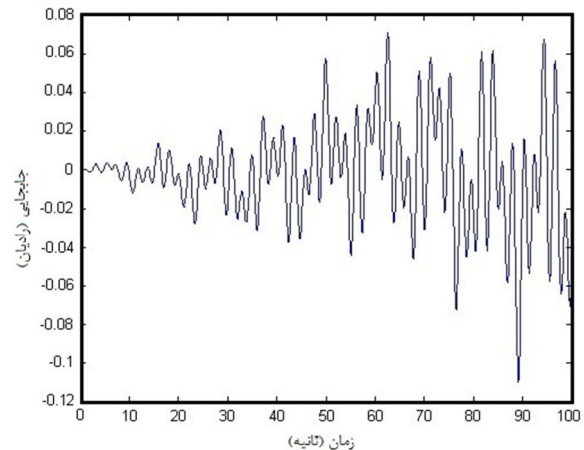
شکل 11 جابه‌جایی شعاعی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد، برای دو مدل خطی و غیرخطی

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن مدل غیرخطی برای تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری، به‌ویژه در تحلیل پدیده تماس رشته حفاری با دیواره چاه، به افزایش معنا دار دقت نتایج منتهی می‌شود، بنابراین برای استخراج شکل‌های 12 تا 15 از مدل غیرخطی استفاده شده است، از سوی دیگر با توجه به این که وضعیت استاتیکی نقاط متناظر با گره‌های 14 و 10 به ترتیب شرایط عدم‌تماس یا تماس دائم را بر وضعیت دینامیکی آن‌ها اعمال می‌کند، بنابراین به‌عنوان یک حالت خاص، استفاده از مدل خطی یا غیرخطی تأثیر محسوسی بر الگوی حرکتی آن‌ها ندارد.

شکل‌های 12 و 13 به ترتیب نمودارهای جابه‌جایی شعاعی گره 14 رشته حفاری (گره بین دو پایدارکننده) در حالتی که نقطه خنثی در 15/095 متری و 30/19 متری از سر مته قرار دارد را نشان می‌دهند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با بالا رفتن نقطه خنثی و در نتیجه افزایش وزن روی مته، جابه‌جایی‌های شعاعی گره 14، مقدار اندکی زیاد می‌شوند، ولی شکل ارتعاشات این گره تغییر محسوسی نمی‌کند. دلیل قرارگیری اکثر سنسورهای اندازه‌گیری اطلاعات در بین پایدارکننده‌ها را می‌توان در تحلیل بالا یافت.

شکل‌های 14 و 15 به ترتیب نمودارهای جابه‌جایی شعاعی گره 10 رشته حفاری (نزدیک‌ترین گره بالای نقطه تماس استاتیکی) در حالتی که نقطه خنثی در 15/095 متری و 30/19 متری از سر مته قرار دارد را نشان می‌دهند.



شکل 9 جابه‌جایی پیچشی، به‌واسطه جابه‌جایی اولیه در راستای محور Y

3-4- تحلیل تماس رشته حفاری - دیواره چاه

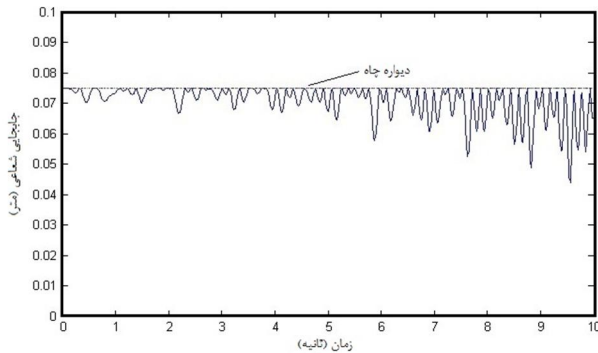
در این بخش، تماس بین رشته حفاری با دیواره چاه مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم شرطی اعمال نیروی تماس برای تمام گره‌ها لحاظ شده است، سرعت دورانی رشته حفاری در طی حرکت ثابت است، فرض شده که رشته حفاری پیش از شروع حرکت، درون چاه تا جایی پایین آورده شده است که مکان نقطه خنثی در دو حالت مختلف، در 15/095 متری و 30/19 متری از سر مته قرار گرفته است، بنابراین نقاط مختلف رشته حفاری حرکت خود را از وضعیت استاتیکی آغاز می‌کنند، سپس پاسخ‌های دینامیکی نقاط مختلف رشته حفاری در طی حرکت، مورد تحلیل قرار گرفته است و مقایسه‌ای بین مدل خطی و مدل غیرخطی انجام گرفته است. شرایط مرزی گره‌ها کماکان پابرجا است.

مشخصات ساختاری رشته حفاری، چاه و مشخصات دینامیکی سیستم حفاری در بخش 5 موجود است.

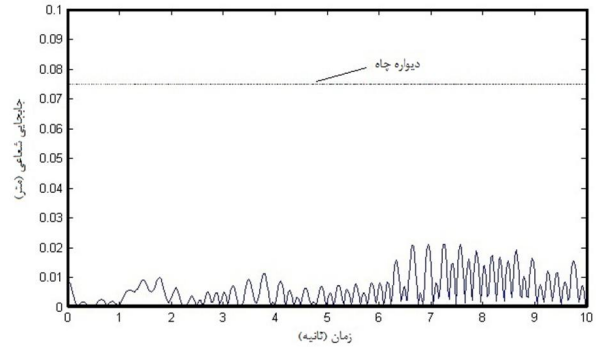
شکل 10 نمودار جابه‌جایی شعاعی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 15/095 متری از سر مته قرار دارد را برای دو مدل خطی و غیرخطی نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، گره 6 در مدل غیرخطی پس از مقداری جابه‌جایی، در چند نقطه و به‌صورت جزئی با دیواره چاه تماس پیدا می‌کند، در حالی که گره یاد شده در مدل خطی با دیواره چاه تماس پیدا نمی‌کند، بنابراین در صورت استفاده از مدل خطی برای تحلیل رفتار دینامیکی گره 6، تماس بین رشته حفاری و دیواره چاه در این گره گزارش نخواهد شد.

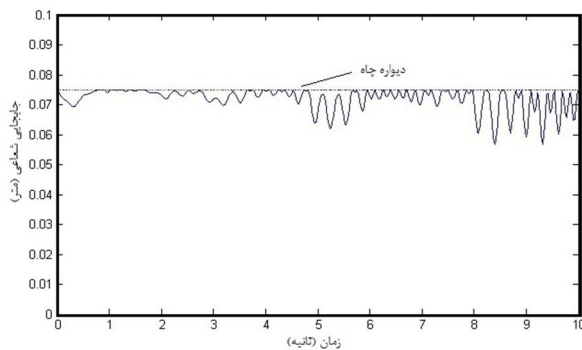
شکل 11 نمودار جابه‌جایی شعاعی گره 6 رشته حفاری، در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد را برای دو مدل خطی و غیرخطی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، گره 6 در مدل غیرخطی پس از چند لحظه، به شدت شروع به تماس با دیواره چاه می‌کند که پس از اولین تماس، الگوی وقوع تماس سریع‌تر می‌شود، در حالی که گره یاد شده در مدل خطی در چند نقطه با دیواره چاه تماس پیدا می‌کند و الگوی وقوع تماس در آن تقریباً مشابه حالتی است که نقطه خنثی در 15/095 متری بالاتر از سر مته در مدل خطی قرار دارد، بنابراین در صورت استفاده از مدل خطی برای تحلیل رفتار دینامیکی گره 6، وقوع تماس بین رشته حفاری و دیواره چاه در این گره در زمانی دیرتر و با جابه‌جایی کمتر نسبت به مدل غیرخطی گزارش خواهد شد.



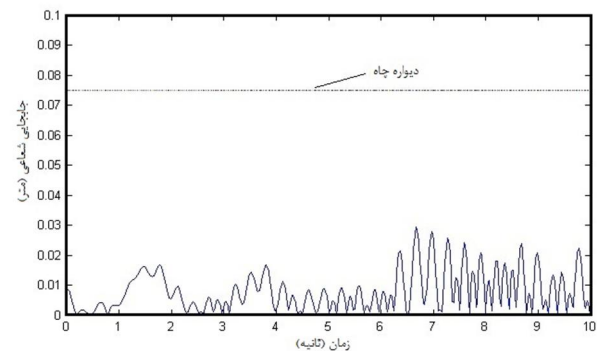
شکل 14 جابه‌جایی شعاعی گره 10 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 15/095 متری از سر مته قرار دارد



شکل 12 جابه‌جایی شعاعی گره 14 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 15/095 متری از سر مته قرار دارد



شکل 15 جابه‌جایی شعاعی گره 10 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد



شکل 13 جابه‌جایی شعاعی گره 14 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد

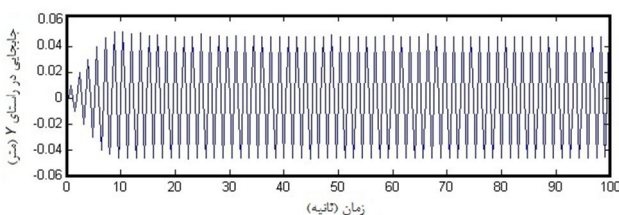
بررسی نقطه تماس استاتیکی از این نظر حائز اهمیت است که در تحقیقات صورت گرفته در زمینه تحلیل دینامیک و ارتعاشات رشته حفاری، بیان شده است که مکان نقاط تماس رشته حفاری با دیواره چاه قابل پیش‌بینی نیست، اما نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که حداقل تعدادی از نقاطی از رشته حفاری در حال چرخش، که با دیواره چاه تماس پیدا می‌کنند در محدوده‌ای قرار دارند که رشته حفاری در حالت استاتیکی و شرایط معین تمایل دارد به دیواره چاه تکیه بزند، بنابراین دلیل انتخاب نزدیک‌ترین گره بالای نقطه تماس استاتیکی این است که رشته حفاری در حالت استاتیکی، از نقطه تماس استاتیکی تا محدوده‌ای در بالای این نقطه، به دیواره چاه تکیه می‌زند، بنابراین نقاطی که درون این محدوده قرار دارند، تقریباً رفتار دینامیکی مشابهی دارند.

همان‌طور که در شکل‌های 14 و 15 ملاحظه می‌شود، با افزایش وزن روی مته، گره 10 رشته حفاری به دیواره چاه نزدیک‌تر می‌شود و به‌طور مکرر با دیواره چاه تماس پیدا می‌کند، بنابراین نقاطی مانند گره 10 رشته حفاری که در محدوده تماس استاتیکی قرار دارند، در حالت دینامیکی و چرخش رشته حفاری نیز تماس مکرر با دیواره چاه خواهند داشت.

نتیجه حائز اهمیت این است که افزایش وزن روی مته، برای نقاطی که در بین پایدارکننده‌ها قرار دارند (مثلاً گره 14) موجب افزایش جابه‌جایی‌ها می‌گردد و برای نقاطی که در محدوده تماس استاتیکی قرار دارند (برای نمونه گره 10) موجب کاهش جابه‌جایی‌ها می‌شود.

3-5- تماس پایدارکننده‌ها با دیواره چاه

در طی عملیات حفاری، تماس بین رشته حفاری در قسمت پایدارکننده‌ها با دیواره چاه امری اجتناب‌ناپذیر است، بنابراین در این بخش، تماس بین



شکل 16 نمودار پاسخ- زمان پایدارکننده اول

علی‌رغم این که جابه‌جایی‌های ناشی از کوپل بودن ارتعاشات مقادیر کوچکی است و در برخی از تحقیقات از آن صرف‌نظر می‌شود، اما همین مقدار کوپل شدن ارتعاشات به‌خصوص در تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری در اثر تماس با دیواره چاه، مقدار قابل توجهی خواهد بود، بنابراین استفاده از مدل غیرخطی به‌خصوص در تحلیل تماس رشته حفاری با دیواره چاه موجب ارتقای قابل ملاحظه دقت الگوی وقوع تماس و جابه‌جایی‌های رشته حفاری می‌شود.

برای اولین بار نتایج مقاله حاضر نشان داد که حداقل تعدادی از نقاطی از رشته حفاری در حال چرخش، که با دیواره چاه تماس پیدا می‌کند در محدوده‌ای قرار دارند که رشته حفاری در حالت استاتیکی و شرایط مشخص تمایل دارد به دیواره چاه تکیه بزند.

در این مقاله نشان داده شد که افزایش وزن روی مته، برای نقاطی که در بین پایدارکننده‌ها قرار دارند موجب افزایش جابه‌جایی‌ها می‌شود و برای نقاطی که در محدوده تماس استاتیکی قرار دارد موجب کاهش جابه‌جایی‌ها می‌شود.

برای بررسی تأثیر وزن روی مته به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم کنترل رفتار دینامیکی رشته حفاری، تأثیر تغییر وزن روی مته بر وقوع تماس در پایدارکننده‌ها تحلیل شد و زمان وقوع تماس در هریک از پایدارکننده‌ها برای اولین بار استخراج شد.

علی‌رغم استفاده از روش المان محدود، در این پژوهش سعی شد که به جنبه‌های کیفی نتایج عددی پرداخته شود و مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج سایر پژوهش‌های تحلیلی، عددی و عملی ارائه شده، بیانگر صحت و دقت مدل حاضر بود.

5- مقادیر مورد استفاده در مدل‌سازی

مدول الاستیسیته رشته حفاری: 21400000 N/cm^2

مدول برشی رشته حفاری: 8200000 N/cm^2

دانسیته رشته حفاری: 7850 kg/m^3

ضریب پواسون رشته حفاری: $0/29$

سختی سازه، برای اعمال تماس: 100000000 N/m

ضریب اصطکاک بین رشته حفاری و دیواره چاه: $0/0005$

ضریب پواسون رشته حفاری: $2/11$

ضریب تصحیح برشی: $0/857$

طول رشته حفاری: $160/57 \text{ m}$

طول قسمت لوله‌های حفاری: $130/38 \text{ m}$

طول قسمت کولار حفاری: $30/19 \text{ m}$

مکان گره 6 و 10: به ترتیب $57/34 \text{ m}$ و $103/22 \text{ m}$ پایین‌تر از سطح

قطر خارجی کولار حفاری: $203/2 \text{ mm}$

قطر داخلی کولار حفاری: $71/44 \text{ mm}$

قطر خارجی لوله‌های حفاری: $161/93 \text{ mm}$

قطر داخلی لوله‌های حفاری: $15/57 \text{ mm}$

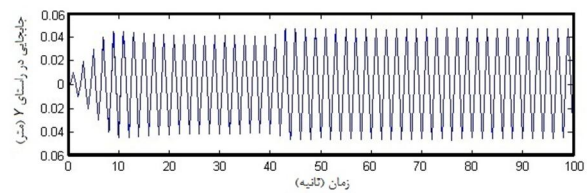
قطر چاه: $311/15 \text{ mm}$

قطر خارجی پایدارکننده‌ها: $205/55 \text{ mm}$

سرعت دورانی رشته حفاری: 80 RPM

6- منابع

- [1]. I. Finnie, J. Bailey, An Experimental Study of Drill-String Vibration, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, Vol. 82,



شکل 17 نمودار پاسخ - زمان پایدارکننده دوم

9 ثانیه پس از شروع حرکت، پایدارکننده اول با دیواره چاه تماس پیدا می‌کند، 34 ثانیه پس از اولین تماس پایدارکننده اول با دیواره چاه، پایدارکننده دوم نیز با دیواره چاه تماس پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل‌های 16 و 17 مشاهده می‌شود، تأثیر تماس هریک از پایدارکننده‌ها بر جابه‌جایی‌های پایدارکننده دیگر به‌وضوح قابل مشاهده است، شایان یاد است با توجه به این که وزن روی مته به‌طور خطی در حال افزایش است، هر یک از پایدارکننده‌ها که با دیواره چاه تماس پیدا کند، به‌طور پیوسته در تماس با دیواره چاه خواهد بود.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر رفتار دینامیکی و ارتعاشات مدل المان محدود غیرخطی رشته حفاری مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن تمام طول رشته حفاری و با استفاده از مدل تیر تیموشنکو سه‌بعدی، سختی هندسی شامل ترم‌های غیرخطی، جرم‌افزوده‌شده ناشی از سیال حفاری و تماس رشته حفاری با دیواره چاه در معادلات منظور و تأثیر حضور آن‌ها در بخش‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. معادلات حرکت رشته حفاری با استفاده از روش انرژی و معادلات لاگرانژ به‌دست آورده شد و برای استخراج نتایج از معادلات مرتبه کامل استفاده شد.

با انجام آنالیز استاتیکی، طول مؤثر رشته حفاری محاسبه و رابطه آن با مکان قرارگیری نقطه خنثی بررسی شد، که نتایج بیانگر این بود که با بالا رفتن نقطه خنثی و در نتیجه افزایش وزن روی مته طول مؤثر رشته حفاری کاهش می‌یابد.

فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری محاسبه شده و نتایج با نرم‌افزارهای تجاری موجود و نتایج اندازه‌گیری شده سر چاهی یک مدل واقعی یکسان مقایسه شد، که نتیجه مقایسه حاکی از دقت مدل پیوسته ارائه شده و عدم تأثیر محسوس اجزاء جزئی رشته حفاری بر مقدار فرکانس‌های طبیعی رشته حفاری بود.

تأثیر قرارگیری نقطه خنثی در نقاط مختلف رشته حفاری و جرم‌افزوده شده ناشی از سیال حفاری بر فرکانس‌های طبیعی آن مورد تحلیل قرار گرفت. در این پژوهش نشان داده شد که فرکانس‌های طبیعی محوری و پیچشی رشته حفاری در غیاب سیال حفاری بدون تغییر می‌مانند و فرکانس‌های جانبی رشته حفاری افزایش می‌یابند و با افزایش فاصله نقطه خنثی از سر مته و در نتیجه افزایش وزن روی مته، فرکانس‌های جانبی رشته حفاری کاهش می‌یابند. نتیجه حائز اهمیت ویژه آنالیز مودال این بود که برای محاسبه فرکانس‌های جانبی رشته حفاری، طول مؤثر رشته حفاری بایستی استفاده شود.

با وارد کردن تحریک در یک راستای مشخص و مشاهده پاسخ در سایر راستاها، صحت کوپل بودن ارتعاشات مدل ارائه شده تأیید شد و تأثیر استفاده از مدل خطی و غیرخطی در تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری به‌خصوص در تماس با دیواره چاه مورد بررسی قرار گرفت، نتایج حاکی از آن بود که

- [9]. P.D. Spanos, A.M. Chevallier, N.P. Politis, Oil Well Drilling: A Vibrations Perspective, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, No.2, pp.81-99, 2003.
- [10]. F. Akgun, A finite element model for analyzing horizontal well BHA behavior, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol.42, No.1, pp. 121-132, 2004.
- [11]. Y.A. Khulief, H. Al-Naser, Finite element dynamic analysis of drillstring. *Journal of Finite Element Analysis*. Vol.41, pp.1270-1288, Des, 2005.
- [12]. Y.A. Khulief, F.A. Al-Sulaiman, S. Bashmal, Vibration analysis of drillstrings with self-excited stick-slip oscillations, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 299, pp. 540-558, 2007.
- [13]. M.P. Paidoussis, T.P. Luu, S. Prabhakar, Dynamics of a long tubular cantilever conveying fluid downwards, which then flows upwards around the cantilever as a confined annular flow, *Journal of Fluids and Structures* Vol.24, No.11, pp.111-128, 2007.
- [14]. H. Hakimi, S. Moradi, Drillstring vibration analysis using differential quadrature method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol.70, pp.235-24, 2010.
- No. 2, pp. 129-135, 1960.
- [2]. K. Zameeruddin Khan, Longitudinal and Torsional Vibration of Drillstring, *Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA*, 1986.
- [3]. M. Payne, F. Abbassian, C. Eng, A. Hatch, Drilling Dynamic Problems and Solutions for Extended-Reach Operations, *Drilling Technology*, Vol. 65, No.4 pp. 191-203, 1995.
- [4]. H.S. Ho, General Formulation of Drillstring under large deformation and its use in BHA analysis, *SPE 15562*, New Orleans, 1986.
- [5]. T.M. Burgess, I.G.L. McDaniel, P.K. Das, Improving BHA tool reliability with drillstring vibration models: field experience and limitations, *Journal of Engineering for Industry*, Paper SPE No. 16109, 1987.
- [6]. R.J. Shyu, Bending Vibration of Rotating Drill Strings, *PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering Cambridge, Mass*, 1989.
- [7]. P.R. Paslay, Y.M. Jan, J.E.E. Kingman, J.D. Macpherson, Detection of BHA Lateral, *67th Annual Technical Conference SPE, USA*, 1992.
- [8]. P.N. Jogi, J.D. Macpherson, M. Neubert, Field verification of model-derived natural frequencies of a drill string. *Journal of Energy Resources and Technology*. Vol. 124, No.2, pp.154-162, 2002.