



تحلیل رفتار دینامیکی مدل المان محدود تماس رشته حفاری - دیواره چاه با استفاده از مدل ارتقاء یافته تماس

مازیار محمدزاده¹، محمدرضا قضاوی^{2*}

1- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

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

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 اسفند 1392

پذیرش: 31 خرداد 1393

ارائه در سایت: 08 مهر 1393

کلید واژگان:

تحلیل رفتار دینامیکی

رشته حفاری

مدل غیر خطی المان محدود

ارتعاشات رشته حفاری مهمترین عامل تخریب رشته حفاری و کاهش بازده عملیات حفاری می باشد، یکی از عمده ترین علل ارتعاشات بیش از حد رشته حفاری، تماس رشته حفاری با دیواره چاه است، لذا تماس رشته حفاری در پژوهش های متعددی مطالعه شده است. در واقع تماس رشته حفاری و دیواره چاه یکی از مهم ترین دغدغه های صنایع مرتبط با استخراج منابع نفت و گاز می باشد. در این تحقیق رفتار دینامیکی و ارتعاشات مدل المان محدود غیر خطی رشته حفاری در تماس با دیواره چاه 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 ترم های غیر خطی و جرم افزوده شده ناشی از سیال حفاری در معادلات منظور و با در نظر گرفتن تماس رشته حفاری - دیواره چاه با استفاده از مدل ارتقاء یافته تماس که در آن سختی تماس از روابط تعادلی انرژی استخراج شده، مدلی کامل تر نسبت به تحقیقات گذشته ارائه شده است. معادلات حرکت رشته حفاری با استفاده از روش انرژی و معادلات لاگرانژ بدست آورده شده و برای استخراج نتایج از معادلات مرتبه کامل استفاده شده و تاثیر استفاده از مدل اخیر در تحلیل رفتار دینامیکی و ارتعاشات رشته حفاری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

Analysis of dynamic behavior of FE model of drillstring – wellbore contact with improved contact model

Maziar Mohammadzadeh¹, Mohammadreza Ghazavi^{2*}

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

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 March 2014
Accepted 21 June 2014
Available Online 30 September 2014

Keywords:
Analysis of dynamic behavior
Drillstring
Non-linear FE model

ABSTRACT

Vibration of drillstring is the most important factor of its destruction and reduction in drilling operations efficiency. One of the main causes of excessive vibration of drillstring is drillstring-wellbore contact, therefore drillstring-wellbore contact has been studied in several researches. Indeed the contact behavior of drillstring and wellbore is of great concern to drilling companies in the oil and gas exploration industries. In this research, dynamic behavior and vibration of non-linear finite element model of a drillstring in contact with wellbore, has been investigated. By considering total length of drillstring, a three-dimensional timoshenko beam element is employed. In addition the geometric stiffening effect including nonlinear terms, the added fluid mass and the contact between drillstring and borehole wall has been considered using improved contact model with a more complete model than previous studies, that the stiffness of contact determined from energy balance relations. The equation of motion of drillstring obtained using energy approach and lagrange's equations and full order equations are used to drive the results. Coupling between various vibrations has been tested and the effect of recent model in analysis of dynamic behavior and vibration of drillstring have been evaluated.

1- مقدمه

حفاری را تشکیل می دهند. قسمت تحتانی رشته حفاری که شامل کولار حفاری، مته و پایدارکننده ها می باشد (BHA¹) نام دارد. با توجه به اینکه کولار حفاری تحت بار فشاری قرار دارد برای جلوگیری از کماتش آنها را ضخیم تر از لوله های حفاری می سازند و برای کاهش ارتعاشات جانبی ناشی از مته بر روی آنها تعدادی پایدارکننده که اندازه قطر آنها تقریباً به قطر مته برابر است قرار

رشته حفاری جزء اصلی عملیات حفاری در صنعت نفت و گاز می باشد که وظیفه انتقال گشتاور به مته حفاری را بر عهده دارد. هدف اصلی عملیات حفاری، حفر چاه توسط مته بمنظور دسترسی به منابع نفت و گاز می باشد. رشته حفاری بطور کلی از دو قسمت لوله های حفاری و کولار حفاری تشکیل شده است. لوله های حفاری لوله های باریکی هستند که قسمت فوقانی رشته

1- Bottom Hole Assembly

سایش سطحی بواسطه چرخش همزمان رو به جلو⁴ هنگامی که یکطرف یکسان از کولار حفاری با دیواره چاه تماس پیوسته دارد بوجود می آید، از طرف دیگر چرخش رو به عقب⁵ در محدوده ای که چرخش کولار حفاری از حالت لغزش روی دیواره چاه خارج می شود منجر به شکستهای خستگی در رشته حفاری می گردد.

چن و همکاران [4] در تحقیقات آزمایشگاهی و عملی خود دریافتند که در طی چرخش مته، وزن روی مته و گشتاور روی مته⁶ اندازه گیری شده از بالای مته به مقدار قابل ملاحظه ای کمتر از مقدار اندازه گیری شده در سطح می باشند. آنها علت این مساله را تماس پیوسته یکطرفه بخشهای BHA با دیوار چاه در طی چرخش دانسته اند، که این تماس پیوسته نیروهای سایشی، محوری و پیچشی را در راستای BHA بوجود می آورد، در نتیجه نیروهای موثر بکار رفته برای چرخش مته به مقدار چشمگیری کاهش می یابند که این مساله منجر به کاهش نرخ نفوذ مته می گردد.

برای دستیابی به بینشی عمیق تر نسبت به رفتار دینامیکی رشته حفاری در طی تماس با دیواره چاه بسیاری از محققان بر اهمیت مدلسازی دینامیک تماس - ضربه تاکید نمودند.

میچل و آلن [5] به ضرورت داشتن یک مدل دینامیکی سه بعدی از BHA که پدیده پیچیده تماس متناوب رشته حفاری با دیواره چاه را شامل شود تاکید نمودند. همچنین نتیجه گرفتند که تحلیل هارمونیک المان محدود راهی موثر و عملی برای تحلیل BHA ساده سازی شده است، که نتایج آن با نتایج ثبت شده تجربی تطابق قابل قبولی دارد.

توکر و وانگ [6] در تحقیق خود به بررسی چرخش سریع رشته حفاری در اثر متوقف شدن ناگهانی مته حفاری در حال چرخش به سبب حرکت انتقالی آن در سطح صخره ها پرداختند و برای بررسی این پدیده مدلی با در نظر گرفتن درجات آزادی محوری، جانبی و پیچشی ابداع نمودند. آنها مدل نسبتاً جامعی را برای مطالعه دینامیک رشته حفاری با در نظر گرفتن تماس بین رشته حفاری - دیواره چاه ارائه دادند. مدل توسط 6 درجه آزادی مستقل پیوسته ارائه می شد، سه درجه آزادی بر مرکز ثقل رشته حفاری در فضا و سه درجه آزادی دیگر امکان بیان وضعیت دینامیکی رشته حفاری بصورت ترمهای خمشی، پیچشی و کرنش برشی را فراهم می نمود.

اگرچه بسیاری از محققان به تاثیر قابل ملاحظه تماس رشته حفاری با دیوار چاه بر کارکرد عملیات حفاری پرداخته اند، تنها عده معدودی این مساله را بصورت فرمولبندی دینامیکی ارائه داده اند.

تحقیقات اولیه در زمینه تماس متناوب رشته حفاری با دیواره چاه با استفاده از مدلی ساده که از قانون تماس هرتز بهره می جست توسط هسو و ویلهویت [7] انجام شد.

جانسن [8] برای مطالعه چرخش رشته حفاری شامل اثر ضربه از مدل متمرکز شده استفاده نمود، بدین منظور از مدل دو درجه آزادی ساده شده با در نظر گرفتن میرایی و سختی دیواره چاه برای توصیف حرکت BHA استفاده نمود.

دونایفسکی و همکاران [9] به بررسی پدیده تماس رشته حفاری و نوسانات WOB و تاثیر آنها بر تحلیل پایداری سیستم پرداخته اند. در تحقیق آنها فرض شده است که رشته حفاری در تماسی ثابت با دیواره چاه باقی می ماند لذا ضرورت در نظر گرفتن تغییر ناگهانی در مومنوم سیستم بواسطه ضربه از بین می رود.

کریستوفر و همکاران [10] مدل اولیه خود را برای در نظر گرفتن

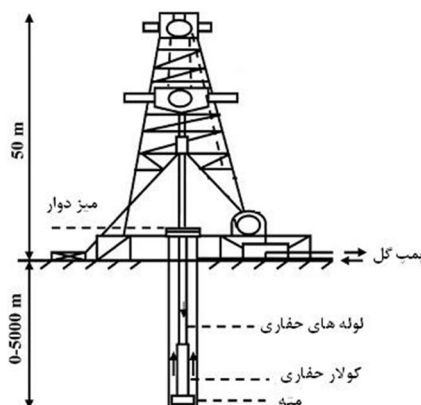
می دهند. سیستم محرکه در سطح عمدتاً شامل موتور الکتریکی، گیربکس و میز دوار می باشد. گشتاور خروجی از موتور توسط کیلی از میز دوار به رشته حفاری منتقل می شود. کیلی فوقانی ترین مفصل لوله حفاری است که امکان چرخیدن و حرکت در راستای عمودی را برای رشته حفاری فراهم می کند. حرکت در راستای عمودی بوسیله یک سیستم طناب و قرقره که با یک جرثقیل کابلی و یک ترمز کار می کند کنترل می شود. این سیستم از دکل آویزان است و توسط قلاب به کیلی متصل است. نیروی محوری در بالای رشته حفاری را بار قلاب می نامند 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 غیر نیوتنی است، از درون رشته حفاری به پایین پمپ می شود و براده های حفاری را از فضای بین رشته حفاری و چاه به بالا خارج می کند. سیال حفاری علاوه بر خارج کردن براده های حفاری، وظیفه سرد و روانکاری کردن مته حفاری را نیز برعهده دارد. شکل 1 نمای کلی سیستم حفاری را نشان می دهد.

مساله تماس رشته حفاری با دیواره چاه در ابتدا توسط بعضی از محققان در طی عملیات حفاری و اندازه گیری ها شناسایی و معرفی شد. در تحقیقات اولیه نشان داده شد که یکی از عواملی که منجر به تماس رشته حفاری با دیواره چاه می گردد تغییر نیروی محوری و وزن روی مته می باشد.

در طول پایش ارتعاشات BHA با استفاده از اندازه گیری در حین حفاری² کلوز و همکاران [1] شتاب زیاد جانبی ثبت شده را به تماس رشته حفاری با دیواره چاه نسبت دادند و اشاره نمودند که BHA می تواند جابجایی های جانبی بیش از حدی بین 2 و 6 اینچ را تجربه کند.

الدرد و شیرد [2] بعضی از نمونه های ثبت شده از شوک های اندازه گیری شده در قسمتهای تحتانی چاه را به همراه نتایج پژوهش های تجربی از مدل ارتعاشات جانبی کولار حفاری دوار یک مدل واقعی را ارائه دادند و نتیجه گرفتند که تماس و ضربات رشته حفاری به دیواره چاه می تواند به افزایش گشتاور مورد نیاز جهت عملیات حفاری و در نتیجه کاهش نامطلوب نرخ نفوذ³ منجر گردد.

مکفرسون و همکاران [3] در تحقیقات خود نشان دادند که در محیط حفاری که جابجایی BHA در اثر خمش بواسطه تماس رشته حفاری با دیواره چاه محدود می گردد، الگوی شکست کولار حفاری الزاماً مشابه سایر تجهیزات دوار رخ نمی دهد، اگرچه سایر نتایج ناخواسته مانند سایش سطحی کولار حفاری و شکست خستگی با الگویی همانند سایر تجهیزات دوار رخ می دهد.



شکل 1 نمای کلی سیستم حفاری

4- Forward Synchronous Whirl
5- Backward Whirl
6- Torque on Bit (TOB)

1- Weight on Bit (WOB)
2- Measurement-While-Drilling (MWD)
3- Rate of Penetration (ROP)

برخورد رشته حفاری - دیواره چاه توسعه دادند [11].

مدل آنها برای حرکت BHA با فرض اینکه حرکت کولار حفاری به دیواره چاه محدود شده و بجای پایدارکننده ها تکیه گاه ساده قرار دارد، ارائه شده است. ضربه توسط تابع دلتای دیراک¹ و با استفاده از قانون نیرو - جابجایی تماس هرتر² مدل شده است. در تحقیق آنها جزییاتی در مورد آنکه چگونه سختی هرتر در نظر گرفته شده در مدلسازی تماس با ویژگیهای الاستیکی ماده تشکیل دهنده رشته حفاری مطابقت دارد ارائه نشده است.

ملاخسو و همکاران [12] پژوهش اولیه برولز و همکارانش [13] را با در نظر گرفتن تماس رشته حفاری با دیواره چاه در محل پایدارکننده ها و مته حفاری توسعه دادند. نیروی تماس با استفاده از قانون کلمب³ بیان شده است، اگرچه جزییات مناسبی برای تعیین انطباق سطح⁴ و رابطه آن با خواص مواد در سطوح تماس، بخوبی انرژی هدر رفته در طی تماس ارائه نشده است.

خولیف و الناصر [14] تحلیل رفتار دینامیکی رشته های حفاری را به روش المان محدود انجام داده اند. آنها با استفاده از روش انرژی و معادلات لاگرانژ، معادلات حرکت را برای رشته حفاری بدست آورده اند، بدین منظور با استفاده از المان تیر 3 بعدی اوپلر - برنولی با 12 درجه آزادی و استخراج ماتریسهای سختی و جرم المان از روابط انرژی پتانسیل و جنبشی معادلات حرکت را محاسبه نموده اند 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 نموده اند. آنها از اثر سیال حفاری و تماس رشته حفاری و سازند صرفنظر نموده اند.

خولیف و همکاران [15] با افزودن اثرات پدیده چسبش - لغزش و لحاظ نمودن جابجایی های خمشی بزرگ در ارتعاشات محوری به مقاله [14] به تحلیل پدیده چسبش - لغزش پرداخته اند. آنها همانند مقاله [14]، 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 پرداخته اند.

واضح است که اکثر فرمولبندی مدلهای تماس - ضربه⁵ بر اساس قانون تماس هرتر کلاسیک که در آن ضرایب سیستم فرض شده اند بنا نهاده شده است. همچنین در پژوهشهای گذشته مکانیک سطوح تماس در طی ضربه، بخوبی الاستیسیته رشته حفاری در نظر گرفته نشده است.

در تحقیق حاضر رفتار دینامیکی رشته حفاری توسط روش المان محدود به منظور ارائه مدلی جامع تر برای تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری مورد بررسی قرار گرفته است.

برای مدلسازی المانهای رشته حفاری از المان تیر تیموشنکو 3 بعدی با 12 درجه آزادی استفاده شده و اثر کوپل پیچش - خمش، ژيروسکوپ، وزن رشته حفاری برای دو قسمت تحت کشش و فشار و جرم افزوده شده ناشی از سیال حفاری در معادلات لحاظ شده است.

علاوه بر ترمهای خطی، سختی هندسی شامل ترمهای غیر خطی، در معادلات منظور شده است. معادلات حرکت رشته حفاری با استفاده از روش انرژی و معادلات لاگرانژ بدست آورده شده و برای اولین بار، جهت استخراج تمام نتایج از معادلات مرتبه کامل استفاده شده است.

با انجام آنالیز استاتیکی، طول مؤثر رشته حفاری محاسبه شده و صحت مدل ارائه شده برای در نظر گرفتن کوپل انواع ارتعاشات آزموده شده است.

تماس رشته حفاری با دیواره چاه یکی از پیچیده ترین پدیده های حاکم بر رفتار دینامیکی رشته حفاری می باشد. این مقاله مدل دینامیکی تماس رشته حفاری - دیواره چاه را با استفاده از قانون نیرو - جابجایی پیوسته⁶ که نیروی ناگهانی در خلال ضربه ای که در یک بازه زمانی کوتاه رخ می دهد را بیان می کند، ارائه می دهد و ضرایب سختی در ناحیه تماس را از روابط تعادلی انرژی استخراج می کند. با در نظر گرفتن تماس رشته حفاری - دیواره چاه با استفاده از مدل ارتقاء یافته تماس که در آن سختی تماس از روابط تعادلی انرژی استخراج شده، مدلی کاملتر نسبت به تحقیقات گذشته ارائه شده است و تاثیر استفاده از مدل اخیر در تحلیل رفتار دینامیکی و ارتعاشات رشته حفاری بخصوص در تماس با دیواره چاه مورد تحلیل قرار گرفته و الگوی وقوع تماس در نقاط مهم و وضعیت های مختلف قرارگیری نقطه خنثی بررسی شده است.

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 لاگرانژ⁷ تعیین نمود، سپس با رویهم گذاردن این معادلات برای کل طول رشته و اعمال شرایط مرزی معادلات حاکم بر رشته حفاری را استخراج نمود.

2-1- فرضیات

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

- 1- جنس ماده تشکیل دهنده رشته حفاری الاستیک⁸، همگن⁹ و ایزوتروپ¹⁰ می باشد.
- 2- سطح مقطع و خواص ماده تشکیل دهنده رشته حفاری در راستای محوری آن ثابت می باشد.
- 3- برای تحلیل ارتعاشات رشته حفاری از المان تیر اوپلر - برنولی¹¹ سه بعدی با در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل برشی و اینرسی دورانی (تیر تیموشنکو¹² سه بعدی) استفاده شده است.
- 4- کرنش برشی ماده تشکیل دهنده رشته حفاری مستقل از مختصات محوری رشته حفاری می باشد، یعنی در راستای محوری ثابت می باشد.
- 5- جابجایی جانبی رشته حفاری، نسبت به نقاط روی خط مرکزی محور آن سنجیده می شود.

توابع شکل مورد استفاده برای تغییر شکل های محوری و پیچشی، خطی بوده و توابع شکل مورد استفاده برای تغییرشکلهای جانبی - خمشی و دورانی - خمشی، چند جمله ای های مکعبی هرمیت¹³ می باشند.

2-2- المان های رشته حفاری

عملیات گسسته سازی، رشته حفاری به المانهای تقسیم می گردد. 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 نماییم، یعنی در مجموع هر المان 12 درجه آزادی دارد، دو عدد جابجایی گره ای محوری، دو عدد جابجایی گره ای پیچشی، چهار عدد جابجایی

6- Continuous Force - Displacement

7- Lagrange's equations

8- Elastic

9- Homogeneous

10- Isotropic

11- Euler-Bernoulli Beam

12- Timoshenko Beam

13- Conventional cubic Hermitian polynomials

1- Dirac Delta Function

2- Force - Displacement Hertzian Contact Law

3- Coulomb Law's

4- Surface Compliance

5- Contact-Impact Models

که در آن N ماتریس توابع شکل المانهای سه بعدی تیر تیموشنکو و e همان بردار جابجایی های گره ای المان رشته حفاری و ρ چگالی جرمی می باشد، با توجه به اینکه ممان اینرسی نسبت به مرکز جرم المان محاسبه می شود جملات دوم و سوم رابطه 5 برابر صفر می شوند. اولین جمله رابطه 5 انرژی جنبشی المان بخاطر حرکت انتقالی و آخرین جمله، انرژی جنبشی المان بخاطر اثرات دوران، شامل اثر ژيروسکوپی را نتیجه می دهد. با بسط رابطه 5 و استفاده از روش استخراج ماتریسها از روابط انرژی، رابطه (5) بصورت رابطه 6 بیان می گردد:

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

که طبق رابطه (7):

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

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 می باشند (دلیل وابسته به زمان بودن M_e ، این است که درایه های آن تابعی از مختصات گره ای $\{e\}$ می باشند و از طرفی به دلیل اینکه در ماتریس اینرسی ارائه شده است، به آن کوپل اینرسی پیچش - خمشی نیز می گویند) و ماتریس G ماتریس ژيروسکوپی می باشد، ضرایب و روابط موجود در رابطه 6 توسط روابط (8-13) بیان می گردند [11]. طبق روابط (8) تا (13) داریم:

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

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

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

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

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

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

5-2- 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 می گردند:

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

که در آن U_e انرژی کرنشی الاستیک شامل ترمهای خطی و ترمهای غیر خطی می باشد، یعنی طبق رابطه (15) داریم:

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

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

U_{eL} طبق رابطه (16) برابر است با:

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

که در آن طبق روابط (17) تا (20) داریم:

$$U_a = -EA \int_0^L u'^2 dx \quad (17)$$

$$U_t = -GI_p \int_0^L \phi'^2 dx \quad (18)$$

جانبی - خمشی و چهار عدد جابجایی دورانی - خمشی می باشند.

بنابراین جابجایی های گره ای را می توان بصورت رابطه 1 نوشت:

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

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

$e(t)$ بردار جابجایی های گره ای می باشد که نسبت به محورهای المان

بصورت رابطه 2 تعریف می گردد:

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

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

2-3- وزن رشته حفاری

کار انجام شده توسط وزن رشته حفاری از رابطه 3 محاسبه می گردد:

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

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

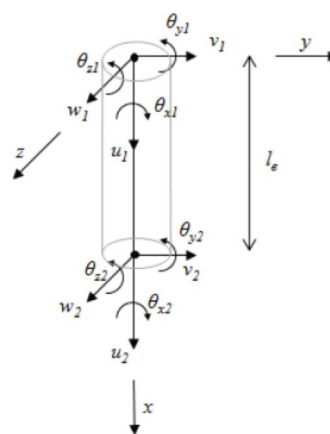
که با استفاده از روش های استخراج در المان محدود، بردار نیروی وزن برابر است با رابطه (4):

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

2-4- انرژی جنبشی المان

انرژی جنبشی المان با انتگرال گیری از انرژی جنبشی حجم بینهایت کوچک نقطه p روی حجم المان V بدست می آید. طبق رابطه (5) داریم:

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



شکل 2 المان سه بعدی با 12 درجه آزادی

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

2-6- سیال حفاری

سیال حفاری که به گل حفاری موسوم است (شامل آب و مواد با ویسکوزیته غیر نیوتنی و در مواقع اضطراری گل رس محلی) از طریق پمپ و شلنگ مخلوط کننده که آب را با فشار زیاد انتقال می دهد تولید و در یک چاله و یا مخزن فلزی نگهداری می شود و M_f جرم افزوده سیال (ماتریس جرم سیال) بصورت 32 بیان می گردد [13]:

$$M_f = \int_0^L C_M N_v^T N_v \quad N_w^T N_w \quad dx \quad (32)$$

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 پدیده های مهم و مؤثر در رفتار دینامیکی و ارتعاشات رشته حفاری می باشد، که موجب غیر خطی و پیچیده شدن معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت رشته حفاری می گردد.

تماس رشته حفاری با دیواره چاه ممکن است به سایش رشته حفاری و در نتیجه بوجود آمدن نیروی ناگهانی ضربه ای منجر شود. اینگونه نیروهای ناگهانی سبب تغییر ناگهانی اندازه حرکت سیستم و در نتیجه تغییرات ناگهانی یا ناپیوستگی در سرعتهای سیستم می گردد.

ضربه در سیستمهای چند جسمی الاستیک توسط محققان زیادی مورد اشاره قرار گرفته است [16]. خولیف وهمکاران [17] روشی را بر اساس معادله تعادل ضربه - مومنتوم ارائه دادند که در آن مدت ضربه ناچیز فرض می شد. روش دیگر که بر اساس نمایش پیوسته نیروی ضربه توسط تابع صاف¹ بنا شده، در [18] و [19] ارائه شده است.

در این پژوهش برخورد رشته حفاری - دیواره چاه توسط روابط نیرو - جابجایی پیوسته که توزیع مجدد مومنتوم در خلال ضربه را بحساب می آورد ارائه شده است.

بعلاوه ماهیت الاستودینامیکی رشته حفاری در محاسبات منظور شده است. روش ارائه شده توسط خولیف و شبانا [19] در این پژوهش پذیرفته شده و برای وفق دادن با مساله تماس رشته حفاری بسط داده شده است. این روش دو مزیت عمده دارد؛ (1) ماهیت پیوسته آن که سبب می شود خودش را معطوف به محاسبات کارآمدی بدون نیاز به حل دستگاه معادلات سخت² کند و (2) تعیین ضریب انطباق سطح (یعنی سختی تماس) در ناحیه تماس از مکانیک سطوح تماس، بنابراین از فرضیات گزارش شده سایر مدلها مبنی بر در نظر گرفتن سختی تماس ثابت بی نیاز می گردد.

بدین منظور تماس بین نقاط مختلف رشته حفاری و دیواره چاه با مجموعه ای از فنر ها 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 می شود. (شکل های 3 و 4)

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

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

$$F_t \quad \mu F_n \quad \Omega \quad (34)$$

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

1- Smooth Function
2- Stiff

$$U_b = -EI \int_0^L v''^2 \quad w''^2 \quad dx \quad (19)$$

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

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

U_{eNL} با لحاظ کردن ترمهای غیر خطی مرتبه دو و پایینتری که از حاصلضرب u' با v' و w' تولید می شود 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 می شود و پس از مرتب نمودن روابط بصورت 21 بیان می گردد:

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

و انرژی کرنشی وابسته به سخت شوندگی محوری رشته حفاری در اثر وزن آن، U_s ، بصورت 22 بیان می گردد [12]:

$$U_s = - \int_0^L F \quad x \quad v' \quad w' \quad dx \quad (22)$$

$F(x)$ بیانگر نیروی وزن رشته حفاری می باشد، همانطور که در بخشهای قبلی اشاره شد، رشته حفاری به دو قسمت تحت فشار و تحت کشش تقسیم می گردد، نقطه جدایی این قسمتها نقطه خنثی نام دارد که بعنوان نقطه ای که نیروی محوری ناشی از وزن در آن صفر است در نظر گرفته می شود، لذا لازم است که نیروی $F(x)$ برای هر دو قسمت فشاری و کششی تعریف گردد. در نهایت با استفاده از روش استخراج ماتریسها از روابط انرژی، ماتریسهای سختی از روابط انرژی پتانسیل به شرح روابط (23-28) استخراج شده اند:

$$k_a = EA \int_0^L N_u^T N_u \quad dx \quad (23)$$

$$k_t = GI_p \int_0^L N_\phi^T N_\phi \quad dx \quad (24)$$

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

$$k_{sh} = k_s GA \int_0^L B_s^T B_s \quad dx \quad (26)$$

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

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

که k_a ، k_t ، k_b ، k_{sh} و k_g به ترتیب ماتریسهای سختی محوری، پیچشی، خمشی، برشی و سختی هندسی المان می باشند، لازم به ذکر است به دلیل وجود بردار مختصات گره ای e در ماتریس سختی هندسی این ماتریس وابسته به جابجایی های گره ای می باشد. طبق رابطه (29) داریم:

$$k_{gs} = \int_0^L F \quad x \quad \begin{bmatrix} N_v^T N_v' & N_w^T N_w' \end{bmatrix} dx \quad (29)$$

که k_{gs} ماتریس سختی محوری ناشی از وزن رشته حفاری می باشد، که برای دو قسمت تحت فشار و کشش در نظر گرفته می شود و در نتیجه k_{gs} اثرات نرم شوندگی قسمت تحت فشار و اثرات سخت شوندگی قسمت تحت کشش را در بر دارد.

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

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

بیشترین انرژی کرنشی ذخیره شده می باشد.

v_{ij} را می توان بصورت های رابطه (38) بیان نمود:

$$\begin{aligned} v_{ij} &= v_i \Delta v_i \\ v_{ij} &= v_j \Delta v_j \end{aligned} \quad (38)$$

با استفاده از معادله ضربه مومنتوم می توان رابطه (39) را نوشت:

$$\begin{aligned} m_i \Delta v_i &= m_j \Delta v_j \\ \Delta v_j &= -\Delta v_i \frac{m_i}{m_j} \end{aligned} \quad (39)$$

در نتیجه با استفاده از روابط (38) و (39) رابطه (40) بدست می آید:

$$v_{ij} \left(\frac{m_i}{m_i} - \frac{m_j}{m_j} \right) \left[v_j \left(\frac{m_i}{m_j} \right) v_i \right] \quad (40)$$

حال با فرض اینکه k_w ثابت است و پس از ساده سازی می توان رابطه (41) را نوشت:

$$\begin{aligned} -k_w \varepsilon_{ij}^2 &= -\left(\frac{m_i^2}{m_i} - \frac{m_j^2}{m_j} \right) v_i^2 \\ &= -\left(\frac{m_j^2}{m_i} - \frac{m_i m_j - m_i^2}{m_j} \right) v_j^2 \\ &= -\left(\frac{m_i m_j}{m_i} - \frac{m_j}{m_j} \right) v_i v_j \\ &= -\left(\frac{m_i m_j}{m_i} - \frac{m_j}{m_j} \right) \varepsilon_{ij} \end{aligned} \quad (41)$$

که ε_{ij} اندازه سرعت نسبی در امتداد خط نزدیک شدن دو گره از دو جسم، دقیقاً در لحظه شروع فاز فشاری ضربه یعنی جایی که ε_{ij} است، می باشد. جابجایی نسبی ε_{ij} نگاهی از جابجایی نسبی دو گره از دو جسم در امتداد خط واصل عمودی در ناحیه تماس است [16].

حد بالایی ضربه فنری که با نادیده گرفتن مقدار ناچیز اتلاف انرژی در خلال ضربه بدست می آید بصورت رابطه (42) بیان می گردد:

$$k_w \left(\frac{m_i m_j}{m_i} - \frac{m_j}{m_j} \right) \left(\frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_{ij}} \right)^2 \quad (42)$$

رابطه 42 بیشترین مقدار ضربه سختی (انطباق سطح) در ناحیه تماس را براساس دینامیک اجسام در حال ضربه می دهد.

7-2- معادلات حاکم

بطور کلی معادلات حرکت سیستم را با استفاده از معادلات لاگرانژ بصورت رابطه 43 می توان محاسبه نمود:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (43)$$

که $T = U$ تابع لاگرانژ، q بردار مختصات تعمیم یافته و Q بردار نیروهای تعمیم یافته می باشد، که با محاسبه L و استفاده از پروسه استاندارد روبههم گذاری در روش المان محدود، معادلات حرکت لاگرانژ برای سیستم کامل بصورت رابطه 44 خواهد بود:

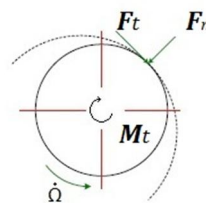
$$\begin{pmatrix} M & [M_f] \end{pmatrix} \ddot{q} + \begin{pmatrix} G & \dot{q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K & [K_g q] \end{pmatrix} q = Q \quad (44)$$

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

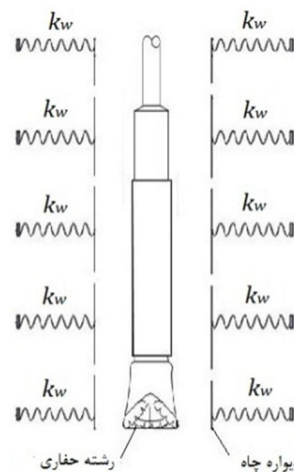
3- نتایج

به منظور استخراج نتایج، معادله 44 بر اساس ماتریسهای تشکیل دهنده آن، بصورت توسعه یافته در یک الگوریتم رایانه ای در برنامه متلب نوشته شده است.

برای تحلیل های 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).



شکل 3 بردار نیروها و گشتاور تماس بین رشته حفاری و دیواره چاه



شکل 4 مدل سازی تماس با مجموعه فنرها

که F_n نیروی تماس در راستای عمودی، F_t نیروی تماس در راستای مماسی با استفاده از قانون اصطکاکی کولمب کلاسیک، M_t گشتاور اصطکاکی، $\sqrt{v + w}$ جابجایی شعاعی رشته حفاری، k_w ضربه سختی تماس رشته حفاری و دیواره چاه، μ ضربه اصطکاکی سطوح تماس و $D_{ch} - D_o$ فاصله شعاعی خالی اولیه بین مراکز رشته حفاری و چاه است، جابجایی جانبی رشته حفاری تا زمانی که فضای خالی بین رشته حفاری و دیواره چاه وجود دارد نامعقد است. برای هر گره ای که اندازه جابجایی شعاعی آن بزرگتر از فضای خالی بین رشته حفاری و دیواره چاه باشد، فنر اضافه شده به سیستم فعال می گردد تا تماس بین رشته حفاری و دیواره چاه را مدل کند.

با مراجعه به رابطه (33)، $\gamma - g$ بعنوان تغییر شکل نسبی شعاعی در امتداد بردار عمود بر سطوح تماس معرفی می گردد، که بطور کلی اندیس های i و j دو گره در حال نزدیک شدن به هم، بر روی دو جسم الاستیک در حال تماس اختصاص دارند.

با توجه به اینکه دو جسم در حال تماس بصورت الاستیک رفتار می کنند لذا جرم گره یا جرم المان بایستی در محاسبات منظور گردد، لذا فرض شده است که m_i جرم جزء کوچکی از رشته حفاری و m_j جرم جزء کوچکی از دیواره چاه در نقطه تماس هستند. v_i و v_j به ترتیب سرعت m_i و m_j در لحظه شروع فاز فشاری ضربه بین دو جسم و v_{ij} سرعت آنی در انتهای فاز فشاری ضربه یعنی جایی که ε_{ij} و تغییر شکل الاستیک در اثر تماس به بیشترین مقدار ممکن می رسد، بگونه ای که دو سطح در حال تماس قبل از بازگشت، بطور لحظه ای با هم حرکت می کنند.

حال با استفاده از اصل بقای انرژی معادله 36 بدست می آید:

$$-m_i v_i^2 - m_j v_j^2 - m_i m_j v_{ij}^2 = E_s \quad (36)$$

که طبق رابطه (37):

$$E_s = \int_0^{\varepsilon_{ij}} k_w \varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (37)$$

حفاری به آرامی درون چاه گذاشته می شود، هنگامی که مته با کف چاه تماس پیدا می کند، نیرویی از کف چاه به رشته حفاری وارد می شود، که این نیرو و وزن رشته عامل بوجود آمدن دو قسمت تحت فشار و تحت کشش در رشته حفاری می باشند، با پایین تر آمدن رشته حفاری در چاه و افزایش نیروی وارده از طرف چاه، رشته حفاری خم شده و بخش عمده آن به دیواره چاه تکیه می زند. اولین نقطه ای که رشته حفاری در بالای پایدارکننده دوم به دیواره چاه تکیه می زند را نقطه تماس استاتیکی¹ می نامند، که این نقطه علیرغم اینکه در تحقیقات گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است، از اهمیت ویژه ای در پاسخ های دینامیکی سیستم و تحلیل دینامیکی تماس رشته حفاری با دیواره چاه برخوردار است. فاصله سر مته تا نقطه تماس استاتیکی را طول مؤثر² رشته حفاری می نامند. برای محاسبه طول مؤثر رشته حفاری از آنالیز استاتیکی رشته حفاری استفاده می شود. شکل (5-ب) نمای تغییر شکل استاتیکی رشته حفاری را در حالتی که نقطه خنثی در وسط کولار حفاری قرار دارد را نشان می دهد، نکته حایز اهمیت آن است که وجود پایدار کننده ها (به خصوص پایدار کننده دوم) باعث می گردد که رشته حفاری در محل تماس استاتیکی بصورت مماس بر دیواره چاه قرار گیرد [8].

3-2- تحلیل تماس رشته حفاری - دیواره چاه

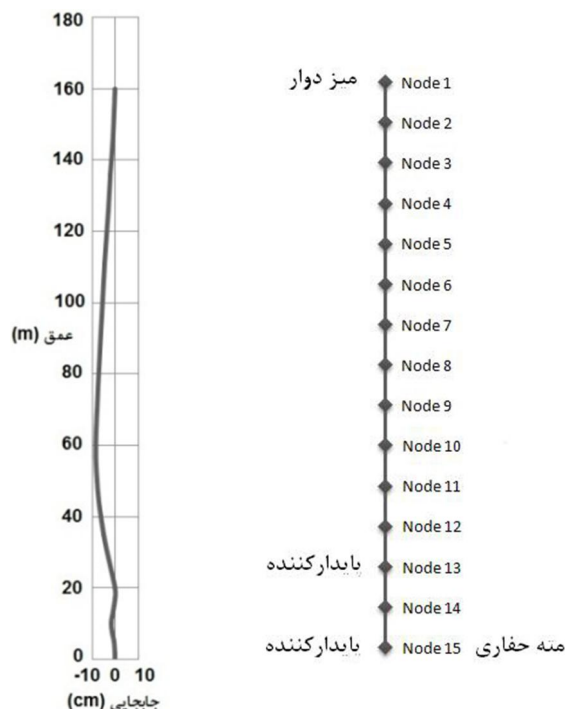
در این بخش، تماس بین رشته حفاری با دیواره چاه مورد بررسی قرار گرفته است، الگوریتم شرطی اعمال نیروی تماس برای تمام گره ها لحاظ شده است، سرعت دورانی رشته حفاری در طی حرکت ثابت می باشد، فرض شده که رشته حفاری قبل از شروع حرکت، درون چاه تا جایی پایین آورده شده است که مکان نقطه خنثی در دو نقطه مختلف، قرار گرفته است. نقطه اول، نقطه ای است که در فاصله 15/092 متری از سر مته، وسط قسمت کولار حفاری قرار دارد، نقطه دوم، نقطه ای است که در فاصله 30/19 متری از سر مته در محل جدا شدن بخش کولار حفاری و لوله های حفاری قرار دارد، لذا نقاط مختلف رشته حفاری حرکت خود را از وضعیت استاتیکی شروع می کنند، سپس پاسخ های دینامیکی نقاط مختلف رشته حفاری در طی حرکت، مورد تحلیل قرار گرفته است و مقایسه ای بین مدل متداول که بر پایه ضریب سختی تماس ثابت می باشد و مدل ارتقاء یافته، انجام گرفته است و شرایط مرزی گره ها کاملاً پابرجا می باشد.

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

شکل 6 نمودار جابجایی شعاعی گره 14 رشته حفاری (گره بین دو پایدارکننده) در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد را برای دو مدل تماس متداول و ارتقاء یافته نشان می دهد.

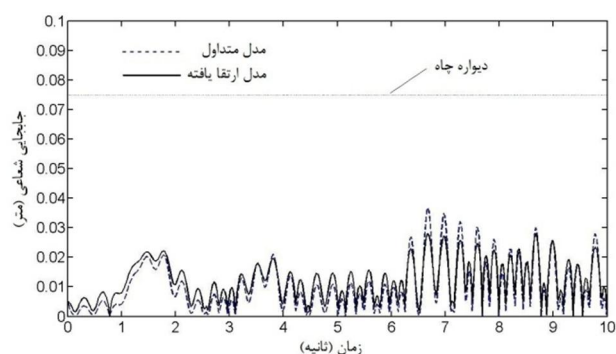
همان طور که در شکل 6 مشاهده می گردد، دامنه ارتعاشات این گره حول وضعیت تعادل تغییر محسوسی نمی کند و دلیل قرارگیری اکثر سنسورهای اندازه گیری اطلاعات در بین پایدارکننده ها را می توان در تحلیل فوق یافت. نتیجه مورد نظر تطابق مدل ارتقاء یافته تماس با مدل متداول را نشان می دهد. بجز چند مورد تفاوت در دامنه ارتعاشات گزارش شده هر دو مدل تقریباً در نقاط یکسانی دارای حداکثر و حداقل ارتعاشات می باشند.

شکل 7 نمودار جابجایی شعاعی گره 10 رشته حفاری (نزدیکترین گره بالای نقطه تماس استاتیکی) در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد را نشان می دهد.



شکل 5-ب نمای تغییر شکل استاتیکی رشته حفاری

شکل 5-الف المان بندی رشته حفاری برای تحلیل های دینامیکی



شکل 6 نمودار جابجایی شعاعی گره 14 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد

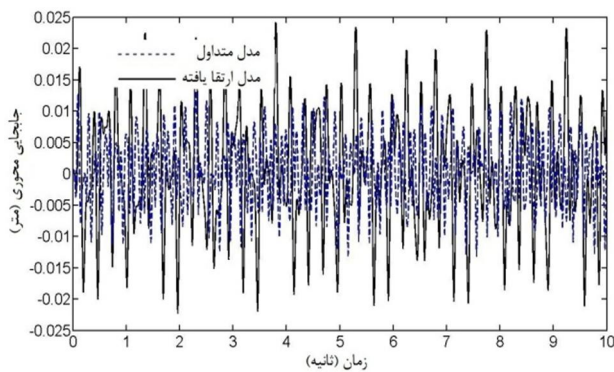
برای اعمال شرایط مرزی کلی حاکم بر سیستم، جابجایی های جانبی و دورانی در محل قرارگیری میز دوار، جابجایی های جانبی در محل قرارگیری پایدار کننده ها و جابجایی های جانبی و محوری در محل قرارگیری مته صفر در نظر گرفته شده اند. اولین گره مدل المان محدود رشته حفاری منطبق بر میز دوار در سطح و آخرین گره به مته حفاری در پایین ترین نقطه مدل اختصاص دارد. با توجه به نزدیک بودن اولین پایدارکننده و مته حفاری، در تحلیل های دینامیکی اولین پایدارکننده و سر مته حفاری بر گره 15 منطبق شده و شرایط مرزی حاکم بر مته حفاری بر آنها اعمال می گردد.

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 بصورت نسبی تعیین می گردد [12]، در این تحقیق با توجه به استفاده از مدل با مرتبه کامل، محاسبات از میزان بالای صحت برخوردار می باشد.

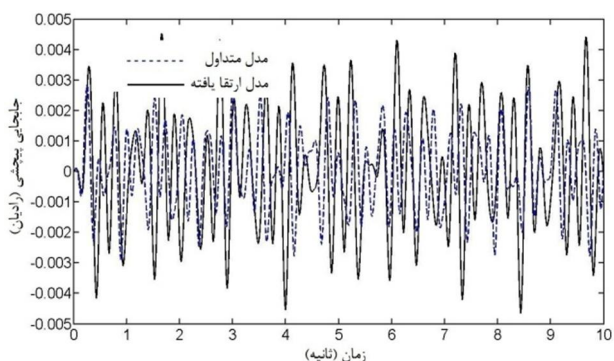
3-1- تحلیل استاتیکی رشته حفاری

همان طور که در بخش های قبلی اشاره شد، برای انجام عملیات حفاری، رشته

1- Touch point, Cut- off point
2- Effective length



شکل 10 نمودار جابجایی محوری گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد



شکل 11 نمودار جابجایی پیچشی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد

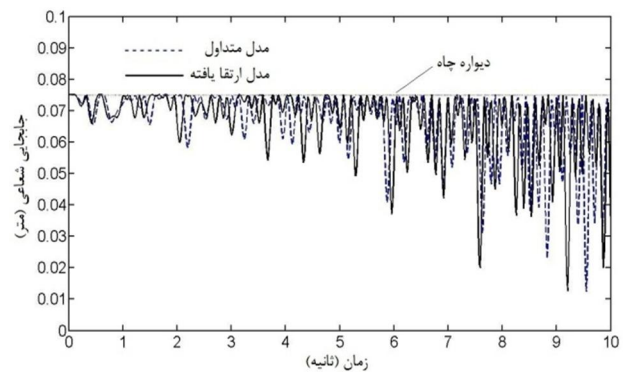
نتیجه حایز اهمیت تطابق مناسب و قابل قبول الگوی ارتعاشی مدل ارتقاء یافته تماس با مدل متداول می باشد. همانگونه که مشاهده می گردد میزان انحراف الگوی ارتعاشی مدل ارتقاء یافته تماس و مدل متداول در گره 10 بیشتر از گره 14 می باشد، که علت این امر را می توان تماس مستقیم گره 10 با دیواره چاه دانست، در حالی که گره 14 تماس مستقیمی با دیواره چاه ندارد و عمده ارتعاشات آن ناشی از تماس سایر نقاط با دیواره چاه است و لذا تماس رشته حفاری با دیواره چاه را بصورت غیر مستقیم گزارش می کند. از طرفی با توجه به اینکه وضعیت استاتیکی نقاط متناظر با گره های 14 و 10 بترتیب شرایط عدم تماس یا تماس دائم را بر وضعیت دینامیکی آنها اعمال می کند، لذا بعنوان یک حالت خاص، استفاده از مدل خطی یا غیر خطی تاثیر محسوسی بر الگوی حرکتی آنها ندارد.

شکل 8 نمودار جابجایی شعاعی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 15/095 متری از سر مته قرار دارد را برای دو مدل تماس متداول و ارتقاء یافته نشان می دهد.

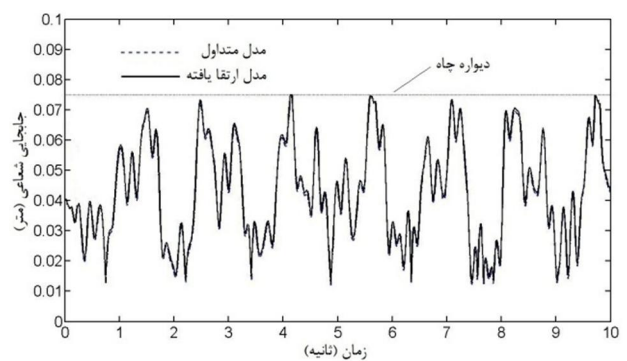
همانطور که در شکل 8 مشاهده می گردد، گره 6 در هر دو مدل پس از مقداری جابجایی، فقط در چند نقطه و بصورت جزئی با دیواره چاه تماس پیدا می کند، لذا الگوی ارتعاشی در هر دو حالت مشابه بوده و نتیجه مورد نظر تطابق مدل ارتقاء یافته تماس با مدل متداول می باشد.

شکل 9 نمودار جابجایی شعاعی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد را برای دو مدل تماس متداول و ارتقاء یافته نشان می دهد.

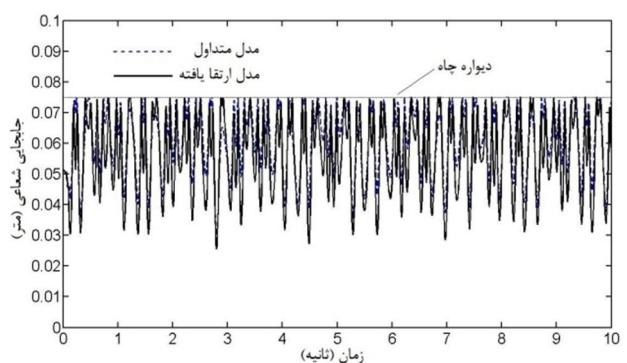
همان طور که در شکل 9 مشاهده می گردد، گره 6 در هر دو مدل پس از چند لحظه، بشدت شروع به تماس با دیواره چاه می کند که پس از اولین تماس، الگوی وقوع تماس سریعتر می گردد، همانطور که انتظار می رفت



شکل 7 نمودار جابجایی شعاعی گره 10 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد



شکل 8 نمودار جابجایی شعاعی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 15/095 متری از سر مته قرار دارد



شکل 9 نمودار جابجایی شعاعی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 30/19 متری از سر مته قرار دارد

بررسی نقطه تماس استاتیکی از این نظر حایز 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 پیش بینی نیست، اما نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد که حداقل تعدادی از نقاطی از رشته حفاری در حال چرخش، که با دیواره چاه تماس پیدا می کنند در محدوده ای قرار دارند که رشته حفاری در حالت استاتیکی و شرایط معین تمایل دارد به دیواره چاه تکیه بزند، بنابراین علت انتخاب نزدیکترین گره بالای نقطه تماس استاتیکی این است که رشته حفاری در حالت استاتیکی، از نقطه تماس استاتیکی تا محدوده ای در بالای این نقطه، به دیواره چاه تکیه می زند، بنابراین نقاطی که درون این محدوده قرار دارند، تقریباً رفتار دینامیکی مشابهی دارند، لذا 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.

با انجام آنالیز استاتیکی، طول مؤثر رشته حفاری محاسبه شد و صحت مدل ارائه شده برای در نظر گرفتن کوپل انواع ارتعاشات آزموده شد. تماس رشته حفاری با دیواره چاه یکی از پیچیده ترین پدیده های حاکم بر رفتار دینامیکی رشته حفاری می باشد. این مقاله مدل دینامیکی تماس رشته حفاری - دیواره چاه را با استفاده از قانون نیرو-جابجایی پیوسته¹ که نیروی ناگهانی در خلال ضربه ای که در یک بازه زمانی کوتاه رخ می دهد را بیان می کند، ارائه داد و انطباق مواد و ضرایب سختی در ناحیه تماس را از روابط تعادلی انرژی استخراج کرد. با در نظر گرفتن تماس رشته حفاری-دیواره چاه با استفاده از مدل ارتقاء یافته تماس که در آن سختی تماس از روابط تعادلی انرژی استخراج شده، مدلی کاملتر نسبت به تحقیقات گذشته ارائه شد و تاثیر استفاده از مدل اخیر در تحلیل رفتار دینامیکی و ارتعاشات رشته حفاری بخصوص در تماس با دیواره چاه مورد تحلیل قرار گرفت و الگوی وقوع تماس در نقاط مهم و وضعیت های مختلف قرارگیری نقطه خنثی بررسی شد.

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

5- مقادیر مورد استفاده در مدل سازی

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: $0/211$

ضریب تصحیح برشی : $0/857$

طول رشته حفاری: $160/57 \text{ m}$

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

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

مکان گره 6 و 10: بترتیب $57/34 \text{ m}$ 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 لوله های حفاری: $161/93 \text{ mm}$

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

قطر چاه : $311/15 \text{ mm}$

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

سرعت دورانی رشته حفاری: 80 RPM

6- منابع

- [1] D.A. Close, S.C. Owens, J.D. Macpherson, Measurement of BHA vibration using MWD. In the IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, SPE 17273, 1988.
- [2] W.D. Aldred, M. Sheppard, Drillstring vibration: a new generation mechanism and control strategies. In the 69th Annual Technical Conference and Exhibition Washington, DC, SPE 24582, 1992.
- [3] J. Macpherson, P. Jogi, B. Hughes, J. E. Kingman, Application and analysis of simultaneous near bit and surface dynamics measurements. SPE Drill Compl. SPE 74718, pp.230-238, 2001.

مدل ارتقاء یافته تماس تطابق قابل قبولی با مدل متداول متداول دارد، نتیجه دیگری که از مقایسه شکل های 8 و 9 بدست می آید این است که با بالا رفتن نقطه خنثی و در نتیجه افزایش وزن روی مته، نقاط بالای محدوده تماس استاتیکی رشته حفاری با دیواره چاه تماس بیشتری خواهند داشت. در این بخش از تحقیق توانایی مدل محاسباتی المان محدود رشته حفاری برای تحلیل پاسخ های 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 تاثیر استفاده از مدل تماس متداول و ارتقاء یافته مورد تحلیل قرار گرفته است.

شکل 10 جابجایی محوری گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در $30/19$ متری از سر مته قرار دارد را برای دو مدل تماس متداول و ارتقاء یافته نشان می دهد. در واقع شکل 10 بیانگر کوپل بودن ارتعاشات محوری و جانبی رشته حفاری می باشد، این کوپل بواسطه 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 تماس جانبی، ارتعاشات محوری رخ نمی داد.

شکل 11 جابجایی پیچشی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در $30/19$ متری از سر مته قرار دارد را برای دو مدل تماس متداول و ارتقاء یافته نشان می دهد.

شکل 11 بیانگر کوپل بودن ارتعاشات پیچشی و جانبی رشته حفاری می باشد، این کوپل بودن بواسطه لحاظ کردن M_e ماتریس جرم ناشی از کوپل پیچشی-خمشی در معادلات دینامیکی رشته حفاری بوجود آمده است. علیرغم اینکه جابجایی های ناشی از کوپل بودن ارتعاشات مقادیر کوچکی می باشند و در برخی از تحقیقات از آن صرف نظر می گردد، اما همین مقدار کوپل شدن ارتعاشات در تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری در چاههای مایل و یا هنگامیکه رشته حفاری دچار کمانش شود و بخصوص در تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری در اثر تماس با دیواره چاه، مقدار قابل توجهی خواهد بود.

شکل های 10 و 11 بیانگر کوپل انواع ارتعاشات رشته حفاری می باشند، در واقع با توجه به اینکه تحریک در راستای جانبی اعمال شده است، پاسخ دینامیکی رشته حفاری به این تحریک ها در راستاهای دیگر فقط به علت در نظر گرفتن ترمهای کوپل کننده (خطی و یا غیر خطی) در معادلات حرکت وجود خواهد داشت [11]. نتیجه حایز اهمیت تطابق مناسب و قابل قبول الگوی ارتعاشی مدل ارتقاء یافته تماس با مدل متداول می باشد.

4- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر رفتار دینامیکی رشته حفاری توسط روش المان محدود به منظور ارائه مدلی جامع تر برای تحلیل رفتار دینامیکی رشته حفاری مورد بررسی قرار گرفت.

برای مدل سازی المانهای رشته حفاری از المان تیر تیموشنکو 3 بعدی با 12 درجه آزادی استفاده شد و اثر کوپل پیچش-خمش، ژبروسکوپی، وزن رشته حفاری برای دو قسمت تحت کشش و فشار و جرم افزوده شده ناشی از سیال حفاری در معادلات لحاظ شد.

علاوه بر ترم های خطی، سختی هندسی شامل ترمهای غیر خطی، در معادلات منظور شد. معادلات حرکت رشته حفاری با استفاده از روش انرژی و معادلات لاگرانژ بدست آورده شد و برای اولین بار، جهت استخراج تمام نتایج از معادلات مرتبه کامل استفاده شد.

- [12] H. Melakhessou, A. Berlioz, G. Ferraris, A nonlinear well-drillstring interaction model. *Journal of Vibration and Acoustic*, Vol.125, No.2, pp.46-52, 2003.
- [13] A. Berlioz, J. Der Hogopian, R. Dufour, E. Draoui, Dynamic behavior of a drillstring: experimental investigation of lateral instabilities. *Journal of Vibration and Acoustic*, Vol.118, pp.292-298, 1996.
- [14] 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.
- [15] Y.A. Khulief, H. Al-Naser, Finite element dynamic analysis of drillstring vibrations. *Journal of Finite Element Analysis*, Vol.41, pp.1270-1288, 2005.
- [16] Y.A. Khulief, Spatial formulation of elastic multibody systems with impulsive constraints. *Journal of Multibody System*, Vol.4, No.4, pp.383-406, 2000.
- [17] Y.A. Khulief, A.A. Shabana, Dynamic analysis of Constrained system of rigid and flexible bodies with intermittent motion. ASME, *Journal of Mechanical Transmitt*, Vol.108, pp.38-45, 1986.
- [18] Y.A. Khulief, A.A. Shabana, A continuous force model for the impact analysis of flexible multibody systems. *Journal of Mechanic Theory*, Vol. 22, No.3, pp. 213-224, 1987.
- [19] H.M. Lankarani, P.E. Nikravesh, A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multi-body systems. ASME, *Journal of Mechanical Design*, Vol.112, pp.369-375, 1990.
- [4] S.L. Chen, K. Blackwood, E. Lamine, Field investigation of the effects of stick-slip, lateral, and whirl vibrations on roller cone bit performance. *SPE Drill Compl*, SPE 76811, 15-20, 2002.
- [5] R.F. Mitchell, M.B. Allen, Case studies of BHA vibration failure. In the *62nd SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, Texas, September, SPE 16675, pp. 27-30, 1987.
- [6] R.W. Tucker, C. Wang, An integrated model for drillstring dynamics. *Journal of Sound and Vibration*, Vol.224, No.1, pp.123-165, 1999.
- [7] F. Hsu, J. Wilhoit, Lateral vibration of drill pipe including wall reaction. In the *Society of Petroleum Engineering of AIME*, Texas, SPE 1046, 1965.
- [8] Jonsen, J. D. Non-linear rotor dynamics as applied to oilwell drillstring vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, Vol.147, No.1, pp.115-135, 1991.
- [9] V.A. Dunayevsky, F. Abbassian, A. Judzis, Dynamic stability of drillstring under fluctuating weight on bit. *SPE Drill. Compl*, SPE 14329, pp.84-92, 1993.
- [10] A.P. Christoforou, A.S. Yigit, Dynamic modeling of rotating drillstrings with borehole interactions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol.206, No.9, pp.243-260, 1997.
- [11] Yigit, A. S. and Christoforou, A. P. Coupled axial and transverse vibrations of oilwell drillstrings. *Journal of Sound and Vibration*, Vol.195, No.4, pp.617-627, 1996.