ماهنامه علمى پژوهشى

دانگا، ترمیت مدرس

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
ارتعاشات رشته حفاری مهمترین عامل تخریب رشته حفاری و کاهش بازده عملیات حفاری میباشد، یکی از عمده ترین علل ارتعاشات بیش از حد رشته حفاری، تماس رشته حفاری با دیواره چاه است، لذا تماس رشته حفاری در پژوهشهای 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 میباشد. در این تحقیق رفتار دینامیکی و ارتعاشات	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 22 اسفند 1392 پذیرش: 31 خرداد 1393 ابائه در سایت: 08 مع 1393
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 تیموشنگوی سه بعدی، سختی هندسی شامل ترمهای 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 	کلید واژگان: تحلید فاژگان: رشته حفاری مدل غیر خطی المان محدود
اورده شده و برای استخراج متایج از معادلات مرتبه کامل استفاده شده و تاثیر استفاده از مدل اخیر در تحلیل رفتار دینامیدی و ارتعاسات رسته حفاری مورد تحلیل و بزرسی قرار گرفته است.	

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

MaziarMohammadzadeh1, MohammadrezaGhazavi2*

1- Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran 2- Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran *P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, ghazavim@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 and berehole wall has been considered using improved contact model with a more complete model than previous studies, that the stiffeness of contact determined form 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 vibration of drillstring have been evaluated.

حفاری را تشکیل میدهند. قسمت تحتانی رشته حفاری که شامل کولار حفاری، مته و پایدارکنندهها می باشد (BHA¹) نام دارد. با توجه به اینکه کولار حفاری تحت بار فشاری قرار دارد برای جلوگیری از کمانش 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 با قطر مته برابر است قرار 1- مقدمه

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. لولههای حفاری لولههای باریکی هستند که قسمت فوقانی رشته

Please cite this article using:

M. Mohammadzadeh, M.R. Ghazavi, Analysis of dynamic behavior of FE model of drillstring – wellbore contact with improved contact model, Modares Mechanical Engineering, UV Vol. 14, No. 11, pp. 185-194, 2014 (In Persian)

¹⁻ Bottom Hole Assembly

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

میدهند. 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 میشود. کیلی فوقانی ترین مفصل لوله حفاری است که امکان چرخیدن و حرکت در راستای عمودی را برای رشته حفاری فراهم میکند. 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 مینامند که معمولا برابر وزن روی مته¹است، 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 برادههای حفاری را از فضای بین رشته حفاری و چاه به بالا خارج می کند، 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.

مساله تماس رشته حفاری با دیواره چاه در ابتدا توسط بعضی از محققان در طی عملیات حفاری و اندازه گیریها 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 حفاري با ديواره چاه نسبت دادند و اشاره نمودند كه BHA مي تواند جابجايي های جانبی بیش از حدی بین 2 و 6 اینچ را تجربه کند.

الدرد و شپرد [2] بعضی از نمونههای ثبت شده از شوکهای اندازه گیری شده در قسمتهای تحتانی چاه را به همراه نتایج پژوهشهای 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.

مكفرسون و همكاران [3] در تحقيقات خود نشان دادند كه در محيط حفاری که جابجایی BHA در اثر خمش بواسطه تماس رشته حفاری با دیواره چاہ 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.



سایش سطحی بواسطه چرخش همزمان رو به جلو ⁴ 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 مته ⁶ 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 ازBHA 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 ويلهويت [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 مومنتوم سیستم بواسطه ضربه از بين مي رود.

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

¹⁻ Weight on Bit (WOB) 2- Measurement-While-Drilling (MWD)

³⁻ Rate of Penetration (ROP)

⁴⁻ Forward Synchronous Whirl 5- Backward Whirl

⁶⁻ Torque on Bit (TOB)

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 دیراک ¹ و با استفاده از قانون نیرو - جابجایی تماس هرتز ² مدل شده است. در تحقیق آنها جزییاتی در مورد آنکه چگونه سختی هرتز 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 کلمب ³ بیان شده است، اگرچه جزییات مناسبی برای تعیین انطباق سطح ⁴ 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 اویلر - 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 ژیروسکوپی 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 - ضربه ⁵ بر اساس قانون تماس هرتز 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 12درجه آزادی استفاده شده و اثر کوپل پیچش- خمش، ژیروسکوپی، 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.

2- مدل رياضي

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- فرضيات

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 ایزوتروپ¹⁰میباشد.

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 اویلر - 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 المانهایی تقسیم می گردد. برای مدلسازی المانهای 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

¹⁻ Dirac Delta Function

²⁻ Force – Displacement Hertzian Contact Law

³⁻ Coulomb Law's 4- Surface Compliance

⁵⁻ Contact-Impact Models

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 قرار گیری نقطه خنثی بررسی شده است.

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

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

ت:	صورت رابطه ا نوشنا	ای گرہ ای را می توان ب	بنابراین جابجایی ها
$u_e(x,t) = N_u(x)$) <i>e</i> (<i>t</i>)	$\theta_{xe}(x,t) = N_{\theta x}(x) e(t)$	
$V_e(x,t) = N_v(x)$	<i>e</i> (<i>t</i>)	$\theta_{ye}(y,t) = N_{\theta y}(y) e(t)$	
$W_e(x,t) = N_w(x)$	k) e(t)	$\theta_{ze}(z,t)=N_{\theta z}(x)e(t)$	(1)
یی ها هستند،	. به هر یک از جابجا	N ها توابع شکل مربوط	که در آن t زمان و
$ heta_{xe}$ هستند و z	ی محورهای <i>۲، x</i> و ۲	ب جابجایی ها در راستا	We ، Ve ، Ue به ترتيه

θze و θze به ترتیب دوران حول محورهای ۲، ۲ و Ζ هستند، لازم به ذکر است که محور ۲ در راستای محور المان قرار دارد.

(t) بردار جابجایی های گره ای می باشد که نسبت به محورهای المان بصورت رابطه 2 تعریف می گردد:

 $e = [u_1 v_1 w_1 \theta_{x1} \theta_{y1} \theta_{z1} u_2 v_2 w_2 \theta_{x2} \theta_{y2} \theta_{z2}]^T$ (2) که (v_1, v_2)، جابجایی های گره ای محوری در راستای محور (u_1, u_2) و (u_1, u_2) به ترتیب جابجایی های گره ای جانبی در راستای محورهای v و $(\theta_{x1}, \theta_{y2})$ جابجایی های پیچشی حول محور x_0 (v_{x1}, θ_{y2}) و $(\theta_{z1}, \theta_{y2})$ جابجایی های دورانی در صفحات (xz) و (xz) می باشند و علامت T[...] بیانگر ترانهاده بردار می باشد. (شکل **2**)

2-3- وزن رشته حفاری

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

$$W = \int_{0}^{L} \rho g A u dx$$
(3)
که در آن p 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)** :

$$F_g = \int_0^L N_u^T \rho g A dx \tag{4}$$

2-4- انرژی جنبشی المان

انرژی جنبشی المان با انتگرال گیری از انرژی جنبشی حجم بینهایت کوچک نقطه *م*بر روی حجم المان *۷* بدست می آید. طبق رابطه **(5)** داریم:

$$T = \frac{1}{2} \int_{V} \rho \left\{ \frac{dr_p}{dt} \right\}^{\mathrm{T}} \left\{ \frac{dr_p}{dt} \right\} dV$$

$$= \frac{1}{2} \int_{V} \rho (\dot{e}^{\mathrm{T}} N^{\mathrm{T}} N \dot{e} + \dot{e}^{\mathrm{T}} N^{\mathrm{T}} \widetilde{\omega} r_p$$

$$+ r_p^{\mathrm{T}} \widetilde{\omega} N \dot{e} + r_p^{\mathrm{T}} \widetilde{\omega}^{\mathrm{T}} \widetilde{\omega} r_p) dV$$
(5)



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 ژیروسکوپی 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:

$$T = \frac{1}{2} \dot{e}^{T} M_{t} \dot{e} + \frac{1}{2} \dot{e}^{T} M_{\varphi} \dot{e} + \frac{1}{2} \dot{e}^{T} M_{r} \dot{e}$$

- $2(\frac{1}{2} \dot{e}^{T} M_{e} \dot{e}) + \frac{1}{2} C \dot{\Omega}^{2} - \dot{e} \dot{\Omega}^{T} G e$
= $\frac{1}{2} \dot{e}^{T} M \dot{e} + \frac{1}{2} C \dot{\Omega}^{2} - \dot{\Omega} \dot{e}^{T} G e$ (6)
: (7) edus (1)

$$M = M_t + M_r + M_{\omega} - 2M_e$$

 M_r ماتریس جرم ناشی از انتقال، M_t ماتریس جرم ناشی از انتقال، M_r ماتریس جرم ناشی از انتقال، M_{φ} ماتریس جرم ناشی از پیچش و M_{φ} ماتریس جرم ناشی از پیچش و 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 $\{0\}$ می باشند و از طرفی به دلیل اینکه در ماتریس اینرسی ارائه شده است، به آن کوپل اینرسی پیچش- خمش نیز می گویند) و ماتریس B ماتریس ژیروسکوپی می باشد، ضرایب و روابط موجود در رابطه م توسط روابط $\{0\}$ تا (13) داریم:

$$M_{t} = \int_{0}^{L} \rho A N_{t}^{\mathrm{T}} N_{t} dx$$

$$M_{r} = \int_{0}^{L} I_{D} N_{\theta}^{\mathrm{T}} N_{\theta} dx$$

$$M_{\varphi} = \int_{0}^{L} I_{p} N_{\varphi}^{\mathrm{T}} N_{\varphi} dx$$

$$(10)$$

$$G = G^{*} - G^{*\mathrm{T}}, G^{*} = \int_{0}^{L} I_{p} N_{\theta_{z}}^{\mathrm{T}} N_{\theta_{y}} dx$$

$$(11)$$

$$M_{e} = \int_{0}^{L} I_{p} (N_{\varphi}^{\mathrm{T}} N_{\theta_{z}} e N_{\theta_{y}} - N_{\varphi}^{\mathrm{T}} N_{\theta_{y}} e N_{\theta_{z}}) dx$$

$$(12)$$

$$C = \int_{0}^{L} I_{p} dx$$

$$(13)$$

2-5- انرژی پتانسیل المان

(7)

انرژی کرنشی کل المان رشته حفاری مجموع دو انرژی است، یکی *U*e انرژی کرنشی الاستیک و دیگری*:U* انرژی کرنشی وابسته به سخت شوندگی محوری رشته حفاری در اثر وزن آن، که از رابطه 14 محاسبه می گردند: $U_{tot} = U_{e} + U_{s}$ (14)که در آن *U*e انرژی کرنشی الاستیک شامل ترمهای خطی و ترمهای غیر خطی می باشد، یعنی طبق رابطه (15) داریم : $U_e = U_{eL} + U_{eNL}$ (15) که در آن UeL و UeL به ترتیب بیانگر روابط خطی و غیر خطی انرژی کرنشی الاستيك هستند. *UeL* طبق رابطه (16) برابر است با: (16) $U_{eL} = U_a + U_t + U_b + U_{sh}$ که در آن طبق روابط (17) تا (20) داریم: $U_a = \frac{1}{2} EA \int_0^L u'^2 dx$ (17)

$$U_t = \frac{1}{2} G I_p \int_0^\infty \varphi^z dx$$
(18)

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1393، دوره 14، شماره 11

 $K = k_a + k_t + k_b + k_{sh} + k_{gs-Ten} + k_{gs-Com}$

$$U_{b} = \frac{1}{2} E I \int_{0}^{L} (v''^{2} + w''^{2}) dx$$
(19)

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

و *دلا، U_sh ،U_b ،U_b ،U_sh ،U_b بو ترتیب انرژی پتانسیل ناشی از تغییر شکلهای محوری، پیچشی، خمشی و برشی می باشند و مشتق x ،(۵/<i>۵*/۵) با علامت پریم () نشان داده شده است.

ا با لحاظ کردن ترمهای غیر خطی مرتبه دو و پایینتری که از U_{eNL} 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:

$$U_{g} = \frac{1}{2} \int_{0}^{L} \left\{ EA(u^{3} + u^{'}v^{'2} + u^{'}w^{'2}) + EI(3u^{'}v^{''2} + 3u^{'}w^{''2}) dx \right\}$$
(21)

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

$$U_{s} = \frac{1}{2} \int_{0}^{L} F(x)(v' + w') dx$$
 (22)

F(x) بیانگر نیروی وزن رشته حفاری می باشد، همان طور 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:

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

$$I_t = GI_p \int_0^{-N} N_{\varphi}^{,T} N_{\varphi}' dx$$
(24)

$$k_{b} = EI \int_{0}^{L} (N_{v}^{''T} N_{v}^{''} + N_{w}^{''T} N_{w}^{''}) dx$$
(25)

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

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

$$k_{g} = \int_{0} \left\{ EA \left[\frac{3}{2} N_{u}^{T} N_{u}' e N_{u}' + \left(\frac{1}{2} N_{u}^{T} N_{v}' e N_{v}' + N_{v}^{T} N_{u}' e N_{v}' \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{2} N_{u}^{T} N_{w}' e N_{w}' + N_{w}^{T} N_{u}' e N_{w}' \right) \right] + 3EI \left[\frac{3}{2} N_{u}^{T} N_{v}' e N_{v}'' \right] \\ \left. + 3N_{v}^{'T} N_{u}' e N_{v}'' + \frac{3}{2} N_{u}^{T} N_{w}' e N_{w}'' + 3N_{w}^{'T} N_{u}' e N_{w}'' \right] \right\} dx$$
(28)

که k_1 محوری، پیچشی، k_2 و k_3 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 عدر ماتریس سختی هندسی این ماتریس وابسته به جابجایی های گره ای می باشد. طبق رابطه (29) داریم:

$$k_{gs} = \int_{0}^{L} F(x) \left[N_{v}^{''} N_{v}^{'} + N_{w}^{''} N_{w}^{'} \right] dx$$
⁽²⁹⁾

که kgs 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 kgs اثرات نرم شوندگی قسمت تحت فشار و اثرات سخت شوندگی قسمت تحت کشش را در بر دارد.

2-6- سيال حفاري

(31)

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*rجرم افزوده سیال (ماتریس جرم سیال) بصورت 32 بیان می گردد [13]:

$$M_f = \int_0^L C_M (N_v^{\mathrm{T}} N_v + N_w^{\mathrm{T}} N_w) dx \qquad (32)$$

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 :

 $F_n = \begin{cases} \mathbf{0}, \gamma \le g \\ -k_w (\gamma - g), \gamma > g \end{cases}$ (33)

 $F_t = \mu F_n \operatorname{sign}(\dot{\Omega}) \tag{34}$

$$M_t = -0.5F_t D_o \tag{35}$$

¹⁻ Smooth Function 2- Stiff



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



که Fn نیروی تماس در راستای عمودی، Fi نیروی تماس در راستای مماسی با استفاده از قانون اصطکاکی کولمب کلاسیک، Mi گشتاور اصطکاکی، $\chi = \sqrt{v^2 + w^2}$ جابجایی شعاعی رشته حفاری، wi ضریب سختی تماس رشته حفاری و دیواره چاه، μ ضریب اصطکاکی سطوح تماس و (شته حفاری و دیواره چاه، تعاعی 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 نامقید 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). $(g - g) = \mathcal{E}_{ij}$ بعنوان تغییرشکل نسبی شعاعی در امتداد بردار عمود بر سطوح تماس معرفی می گردد، که بطور کلی اندیس های *i* و *j* به 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_i جرم جزء کوچکی از دیواره چاه در نقطه تماس هستند.*۱۷ و ز۷ به ترتیب سرعت m_i و m_i در لحظه شروع فاز فشاری ضربه بین دو جسم و <i>ز۷ سرعت* آنی در انتهای فاز فشاری ضربه یعنی جایی که $\mathbf{0} = i^3$ 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:

$$\frac{1}{2}m_iv_i^2 + \frac{1}{2}m_jv_j^2 = \frac{1}{2}(m_i+m_j)v_{ij}^2 + E_s$$
(36)
که طبق رابطه (37):

$$E_s = \int_0^{\varepsilon_{ij}} k_w \, \varepsilon_{ij} d \, \varepsilon_{ij} \tag{37}$$

www.S199.ir

بیشترین انرژی کرنشی ذخیره شده می باشد.
ان// را می توان بصورتهای رابطه (38) بیان نمود:

$$v_{ij} = v_i + \Delta v_i$$
 (38)
 $v_{ij} = v_j + \Delta v_j$ (38)
 $v_{ij} = v_j + \Delta v_j$ (39)
 $v_i + m_j \Delta v_j = 0$
 $\Delta v_j = -\Delta v_i (m_i / m_j)$ (39)
 $v_i = (-\Delta v_i (m_i / m_j))$ (40)
 $v_{ij} = \left(\frac{m_i}{m_i + m_j}\right) \left[v_j + \left(\frac{m_i}{m_j}\right)v_i\right]$ (40)
حال با فرض اینکه *w*³ ثابت است و پس از ساده سازی می توان رابطه (41) را

$$\frac{1}{2}k_{w}\varepsilon_{ij}^{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{m_{i}^{2} + m_{i}m_{j} - m_{j}^{2}}{m_{i} + m_{j}} \right) v_{i}^{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{m_{j}^{2} + m_{i}m_{j} - m_{i}^{2}}{m_{i} + m_{j}} \right) v_{j}^{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{2m_{i}m_{j}}{m_{i} + m_{j}} \right) v_{i}v_{j} = \frac{1}{2} \left(\frac{m_{i}m_{j}}{m_{i} + m_{j}} \right) \dot{\varepsilon}_{ij}$$
(41)

که i_{ij} اندازه سرعت نسبی در امتداد خط نزدیک شدن دو گره از دو جسم، دقیقاً در لحظه شروع فاز فشاری ضربه یعنی جایی که $\mathbf{0} = i_{ij}$ است، می باشد. جابجایی نسبی i_{ij} نگاشتی از جابجایی نسبی دو گره از دو جسم در امتداد خط واصل عمودی در ناحیه تماس است[16].

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

$$k_w = \left(\frac{m_i m_j}{m_i + m_j}\right) \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{ij}}{\varepsilon_{ij}}\right)^2$$
(42)
رابطه 42 بیشترین مقدار ضریب سختی (انطباق سطح) در ناحیه تماس را
براساس دینامیک اجسام در حال ضربه می دهد.

2-7- معادلات حاكم

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

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

$$\sum L = (T - U)$$

$$\sum L = (T - U)$$

$$\sum L = (T - U)$$

تعمیم یافته می باشد،که با محاسبه L و استفاده از پروسه استاندارد رویهم گذاری در روش المان محدود، معادلات حرکت لاگرانژ برای سیستم کامل بصورت رابطه 44 خواهد بود:

 $([M] + [M_f])(\ddot{q}) + \dot{\Omega}[G](\dot{q}) + ([K] + [K_g(q)])(q) = (Q)$ (44) که [M] ماتریس جرم افزوده سیال کلی، [G] ماتریس جرم افزوده سیال کلی، [M] ماتریس ژیروسکوپی کلی، [K_g(q)] ماتریس سختی کلی و $[K_g(q)]$ ماتریس سختی هندسی کلی است.

3- نتايج

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).



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- تحليل استاتيكي رشته حفاري

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

حفاری به آرامی درون چاه گذاشته می شود، هنگامی که مته با کف چاه تماس پيدا مي كند، نيرويي از كف چاه به رشته حفاري وارد مي شود، كه اين نيرو 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 عليرغم اينكه در تحقيقات گذشته كمتر 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 مؤثر ² 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 كولار حفارى قرار دارد را نشان مى دهد، نكته حايز اهميت آن است كه وجود پایدار کننده ها (بخصوص 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 20/19 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 کماکان 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.

¹⁻ Touch point ,Cut- off point

²⁻ Effective length



شکل 11 نمودار جابجایی پیچشی گره 6 رشته حفاری در حالتی که نقطه خنثی در 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 جزیی 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



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 این است که رشته حفاری در حالت استاتیکی، از نقطه ماس استاتیکی تا محدوده ای در بالای این نقطه، به دیواره چاه تکیه میزند، بنایراین 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.

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 ار تعاشات 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* 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 صرفنظر 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.

شکلهای 10 و11 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 درنظر 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 مدلسازی المانهای رشته حفاری از المان تیر تیموشنکو 3 بعدی با 12درجه آزادی استفاده شد و اثر کوپل پیچش- خمش، ژیروسکوپی، وزن رشته حفاری برای دو قسمت تحت کشش و فشار و جرم افزوده شده ناشی از سیال حفاری در معادلات لحاظ شد.

علاوه بر ترمهای 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.

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 روابط تعادلی انرژی استخراج شده، مدلی کاملتر نسبت به تحقیقات گذشته روابط تعادلی انرژی استخراج شده، مدلی کاملتر نسبت به تحقیقات گذشته روابط تعادلی انرژی استخراج شده، مدلی کاملتر نسبت به تحقیقات گذشته روابط تعادلی انرژی استخراج شده، مدلی کاملتر نسبت به تحقیقات گذشته روابط تعادلی برژی استفاده از مدل اخیر در تحلیل رفتار دینامیکی و ارتعاشات رفته 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 پژوهشهای ارائه شده، بیانگر صحت و دقت مدل حاضر بود.

5- مقادیر مورد استفاده در مدلسازی

مدول الاستيسيته رشته حفارى: 21400000 N/cm² مدول برشی رشته حفاری: 8200000N/cm² دانسیته رشته حفاری:7850 kg/m³ ضريب پواسون رشته حفاري:0/29 سختی سازه ، برای اعمال تماس: N/m 10000000 ضريب اصطكاك بين رشته حفاري و ديواره چاه : 0/0005 ضريب پواسون رشته حفاري: 0/211 ضريب تصحيح برشي : 0/857 طول رشته حفاری: 160/57 m طول قسمت لوله های حفاری:m 130/38 طول قسمت كولار حفاري:m 30/19 مكان گره 6 و10: بترتيب m 57/34 و 103/22 m يايينتر از سطح قطر خارجی کولار حفاری:203/2 mm قطر داخلی کولار حفاری:**71/44** mm قطر خارجی لوله های حفاری: mm 161/93 قطر داخلی لوله های حفاری: **15/57** mm قطر چاہ : 311/15 mm قطر خارجي پايداركننده ها: 205/55mm سرعت دورانی رشته حفاری: 80RPM

6- منابع

- 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.

¹⁻ Continuous Force - Displacement

- [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. Jornal 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, *Jornal of Mechanical Transmit*, 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.