

مروری بر سازوکارهای حاکم بر ازکارافتادگی آستر لاستیکی مورد استفاده در استاتور موتورهای درون چاهی

Review on the Failure Mechanisms of Rubber Liner used in Stator of Downhole Motors

چکیده

بخش تولید توان موتورهای درون چاهی شامل یک روتور فلزی و یک استاتور با آستر لاستیکی است که با جریان یابی سیال حفاری در بین حفاراتی که از اختلاف هندسه روتور و استاتور ایجاد شده اند، تبدیل انرژی هیدرولیکی سیال حفاری به انرژی چرخشی روتور و نهایتاً چرخش سرمته‌ی حفاری صورت می‌پذیرد. از نقطه نظر طراحی، ضروری است آستر لاستیکی در حین تنش‌های عملیاتی، بتواند با حداقل میزان تغییر شکل مکانیکی، آببندی مناسبی بین حفارات مجاور ایجاد کرده تا امکان پیشروی سیال حفاری در راستای روتور بدون گرماندوزی زیاد در لاستیک ایجاد شود. برای این منظور لزوم استفاده از الاستومری با سفتی بالا برای اجتناب از اعوجاج و تغییر شکل دینامیکی بالا و جهنگی کافی برای ایجاد قابلیت آببندی مناسب وجود دارد. وجود خواص استحکامی بالا و مقاومت در برابر ایجاد و رشد ترک از دیگر ویژگی‌های الاستومر مورد استفاده در این کاربرد است. این نوع موتورها عمدتاً از بخش تولید توان و بیش‌تر از ناحیه آستر لاستیکی استاتور دچار ازکارافتادگی می‌شوند. به دلیل فشار و دمای بالای درون چاه، تاثیر شیمی سیال حفاری و قرارگیری تحت بارهای مکانیکی متناوب، این آسترها متحمل انواعی از تخریب حرارتی، تخریب شیمیایی، خستگی حرارتی و خستگی مکانیکی می‌شوند که برطرف کردن ازکارافتادگی آن‌ها بسیار پرهزینه است. مقاله حاضر آخرین دستاوردها در ارزیابی ازکارافتادگی الاستومر آستر لاستیکی را مورد تحلیل و بررسی قرار می‌دهد. در آسترهای لاستیکی با ضخامت کم و یکنواخت نسبت به انواع معمولی آن‌ها، میزان تخریب حرارتی برخلاف ازکارافتادگی ناشی از تغییر شکل و بارهای تناوبی مکانیکی تا حد قابل قبولی کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: موتورهای درون چاهی، ازکارافتادگی، آستر لاستیکی

نوع مقاله: مروری

سحر طاوسی^۱، محمد علیمردانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندس پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، شماره تماس: ۰۹۱۹۸۱۸۳۴۴۲

۲- دکترای تخصصی، استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، شماره تماس: ۰۹۱۲۶۲۱۷۲۹۵

* عهده دار مکاتبات:

1- tavosisahar@gmail.com

2- *m.alimardani@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸

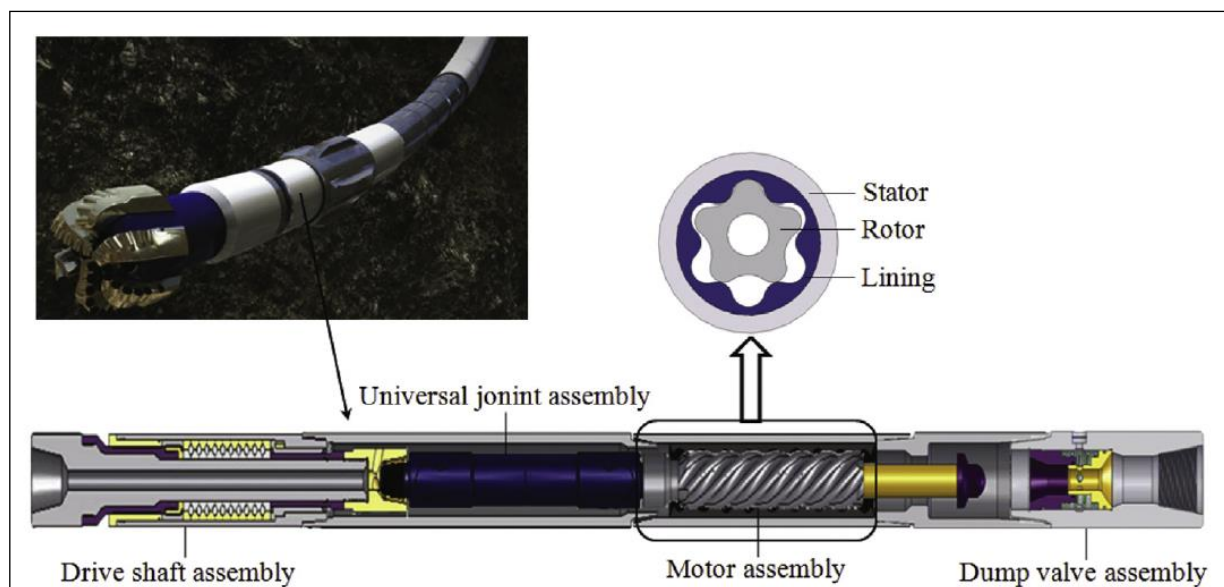
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴

مقدمه

مطابق شکل ۱ موتورهای درون چاهی از بخش‌های اصلی شامل شیر تخلیه^(۶)، موتور، مفصل همه‌گیر^(۷) و شفت محرک^(۸) تشکیل شده‌اند. حیاتی‌ترین عضو این مجموعه بخش تولید توان آن است که شامل دو بخش روتور و استاتور می‌باشد [۴].

استاتور شامل یک آستر لاستیکی است که با ساختاری مارپیچ‌گونه، دارای برآمدگی‌ها (گوشه‌ها^(۹)) و فرورفتگی‌هایی است که به یک بدنه‌ی فلزی اتصال دارد و در حال حاضر شامل نوع با ضخامت کم و یکنواخت و نوع با آستر لاستیکی معمولی است [۵]. از طرف دیگر روتور نیز با ساختاری مارپیچی مشابه، دربرگیرنده آستر لاستیکی استاتور است. شمار گوشه‌های روتور یکی کم‌تر از گوشه‌های استاتور است و بنابراین از اختلاف هندسه به وجود آمده حفراتی حاصل می‌شود که با جریان‌یابی سیال حفاری از این حفرات چرخش روتور ممکن می‌گردد. الزام دیگر وجود تنوعی از حفرات باز و بسته در هر مقطع برای ایجاد اختلاف فشار بین حفرات همسایه است که حرکت خارج از مرکزی^(۱۰) روتور درون استاتور درکنار فشار سیال ورودی این خواسته را مرتفع می‌کند

حفاری عمودی^(۱) و جهت‌دار^(۲) فناوری‌های کلیدی در استخراج نفت و گاز از منابع عمیق هستند. متداول‌ترین نوع حفاری‌های سنتی عمودی، حفاری چرخشی است که در آن دکل حفاری مسئول چرخش کل رشته حفاری است که خود با اعمال فشار و چرخش موجب پیشروی سرمته حفاری می‌شود. عبور سیال از درون رشته حفاری موجب خروج تراشه‌های حفاری از فضای آنالوس بین رشته حفاری و چاه می‌شود. چنانچه زاویه انحراف زیاد باشد استفاده از روش حفاری چرخشی سنتی به دلیل عدم انعطاف رشته حفاری ممکن نیست. در این موارد از موتورهای درون‌چاهی^(۳) استفاده می‌شود که در آن سرمته حفاری^(۴) می‌تواند مستقل از کل رشته حفاری چرخش داشته باشد [۱]. موتورهای درون‌چاهی با عملکردی عکس آنچه در پمپ موئو^(۵) رخ می‌دهد، وظیفه تبدیل انرژی هیدرولیکی سیال حفاری را به انرژی مکانیکی و چرخش سرمته حفاری را دارند [۲]. طبق گزارش‌ها، بیش از ۶۰ درصد حفاری‌های جهت‌دار با این نوع موتورها انجام می‌شود [۳].



شکل ۱ ساختار کلی موتورهای درون‌چاهی [۴]

1. Vertical Drilling 2. Directional Drilling 3. Downhole motor 4. Drilling Bit 5. Moineau 6. Dump valve 7. Universal joint
8. Drive shaft 9. Lobe 10. Eccentric

اول باعث تخریب و شکننده شدن لاستیک و در نهایت باعث ایجاد ترک‌ها، حفرات و انواع دیگر از کارافتادگی در گوشه‌های استاتور آن می‌شود. این گونه از تخریب، موجب کاهش عمر عملیاتی استاتور گشته و در نهایت تعویض و جایگزینی زودرس این لایه را به دنبال دارد. تغییر سفتی لاستیک و ماهیت تغییرشکلی آن که به واسطه تخریب و پیرشدگی می‌تواند صورت پذیرد باعث تضعیف تداخل روتور و استاتور، افزایش نشت سیال از هر حفره و در نهایت منجر به از بین رفتن گشتاور و از کار افتادگی موتور می‌شود [۱۰]. همچنین تکرار این چینی تغییرشکل لاستیک‌ها مسئول رشد ترک خستگی^(۵) و تولید گرمای ناشی از پسماند انرژی^(۶) است که با از کارافتادگی به شکل کندی ظاهر می‌شود [۳]. علاوه به مقاومت مکانیکی و دوام، ضروری است آستر لاستیکی الزامات طراحی آببندهای دینامیکی را داشته باشد تا بتواند به صورت توانمند حفرات باز و بسته در هر مقطع را با آببندی^(۷) کامل هر حفره، به طور مستقل از حفره همسایه خود داشته باشد. شاید تصور شود که با تداخل بالای روتور در استاتور و اصطکاک بالای آن‌ها بتوان از نشتی کامل سیال به حفرات همسایه جلوگیری کرد، اما بایستی توجه داشت که اصطکاک زیاد بین این دو، موجب سائیدگی بیشتر و آسیب‌های مکانیکی زودرس خواهد شد. به منظور کاهش اصطکاک میان روتور و استاتور، وجود نشتی اندک از سیال حفاری از خطوط آببندی قابل تحمل است [۳].

پایه الاستومرهای مورد استفاده در آستر لاستیکی استاتور

آستر لاستیکی موجود در استاتور موتورهای درون چاهی به عنوان ضعیف‌ترین عضو این موتورها، در برابر شرایط موجود در درون چاه و ویژگی‌های سیال حفاری دچار از کارافتادگی^(۸) های فیزیکی و شیمیایی می‌گردند. عملکرد این لایه الاستومری وابسته به خواص مکانیکی و شیمیایی آن از جمله سختی^(۹)، استحکام پارگی^(۱۰)، استحکام کششی، مقاومت سایشی و جهندگی^(۱۱) و از طرف دیگر وابسته به خواصی همچون مقاومت در برابر سیالات، تورم در برابر

[۶]. موتورهای حفاری به رغم شباهتی که با پمپ‌های مؤنث دارند، برهمکنش‌های روتور-استاتور در آن‌ها شدیدتر و تعداد گوشه‌های مورد استفاده در آن‌ها نیز بیشتر است [۳] و ارزیابی عملکرد و عمر کاربری آن‌ها از اهمیت بالاتری برخوردار است. عموماً ضعف موتورهای درون چاهی در بخش استاتور بخش تولید توان آن‌ها است. برای نمونه تنها در کشور چین سالیانه آسیب استاتور لاستیکی موجب از کارافتادگی بیش از ۵۰۰ مورد از کارافتادگی موتور می‌شود [۷]. استاتور لاستیکی موتورهای درون چاهی به دلیل تماس با سیال حفاری با ماهیت شیمیایی و دمایی خاص و همچنین قرارگیری در شرایط بارگذاری دینامیکی، از نقطه نظر دوام و کارایی درازمدت دچار چالش عملکردی بوده و تحقیقات زیادی در جلوگیری از از کارافتادگی زودرس آن‌ها در جریان است [۸]. از طرفی در برخی از چاه‌های فراساحلی، چالش‌های دیگری مانند دمای بالای چاه، زمان طولانی بهره‌برداری، نرخ پایین نفوذ سرمه^(۱)، و وجود ترکیبات متنوع در گل حفاری، موجب آسیب دیدن جدی آستر لاستیکی و کندی^(۲) و جدایش^(۳) آن از محفظه فلزی استاتور می‌شود [۹]. این موضوع از کارافتادگی موتور و توقف عملیات حفاری را به دنبال دارد. طبق آمارهای صنعتی، از کارافتادگی از نوع سایش لاستیک شامل ۴۴/۸۶ درصد کل از کارافتادگی‌های موتورهای پیش‌رونده و جدایش آستر از استاتور شامل ۳۰/۶۷ درصد کل از کارافتادگی‌هاست [۵]. چنین از کارافتادگی‌هایی غالباً بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند و به تبع تاثیر قابل توجهی بر کارایی حفاری و هزینه حفاری دارند [۸]. در حین انجام عملیات حفاری، بخش‌هایی از گوشه‌های الاستومر در معرض تغییرشکل مکانیکی تناوبی قرار می‌گیرند که دلیل اصلی آن تداخل^(۴) استاتور و روتور و گشتاور ایجاد شده از گردش روتور در استاتور است. این تغییرشکل‌های تناوبی، مخصوصاً در آسترهای لاستیکی ساخته شده از یک تک لایه الاستومر، باعث افزایش دما در لاستیک می‌شود که بیش‌ترین افزایش دما در مرکز یا نزدیکی مرکز گوشه‌های آستر لاستیکی رخ می‌دهد. افزایش دما در وهله

1. Rate of penetration (ROP) 2. Chunking 3. Debonding 4. Interferences 5. Fatigue Crack Growth 6. Hysteresis Heating 7. Sealing
8. Failure 9. Hardness 10. Tear Strength 11. Resilience

متوسط^(۵) (با نام تجاری بونا^(۶)) و نیتریل بالا^(۷) تقسیم می‌شود. میزان درصد هیدروژن‌دارشدگی در لاستیک نیتریل هیدروژن‌دار معمولاً بین ۸۰ تا ۹۹ درصد است. از لاستیک نیتریل هیدروژنه شده با ۹۰ درصد هیدروژن معروف به لاستیک نیتریل فوق اشباع^(۸) یا اچ‌اس‌ان^(۸) معمولاً در دماهای بسیار بالا و از لاستیک نیتریل با درصد اکریلونیتریل بالا در کاربردهایی که پایه سیال حفاری روغن‌های آروماتیک^(۹) هستند بهره می‌برند [۱۲]. در جدول ۱ به ویژگی‌های عمومی انواع الاستومرهای مورد استفاده اشاره شده است.

ایزدی^(۱۱) و همکارانش برای بررسی اثر ذرات نانو رس^(۱۲) بر روی خواص مکانیکی الاستومر موتورهای درون چاهی از دستور ساختی مطابق با جدول ۲ استفاده کرده‌اند [۱۳].

جدول ۱ راهنمای انتخاب الاستومر عمومی [۱۱]

Characteristics	Elastomer Type			
	Buna	High Nitrile	Hydrogenated	Viton
Mechanical Properties	Excellent	Good	Good	Poor
Abrasive Resistance	Very Good	Good	Good	Poor
Aromatic Resistance	Good	Very Good	Good	Excellent
H ₂ S Resistance	Good	Good	Excellent	Excellent
Water Resistance	Very Good	Good	Excellent	Excellent
Temperature Limit**	95C (203°F)	95C (203°F)	135°C (275°F)	150°C (302°F)

**The internal operating temperature of the pump due to the friction heat generated by the rotor/stator interference fit can be significantly higher than the reservoir fluid temperature.

جدول ۲ دستور ساخت نانوکامپوزیت با زمینه الاستومری [۱۳]

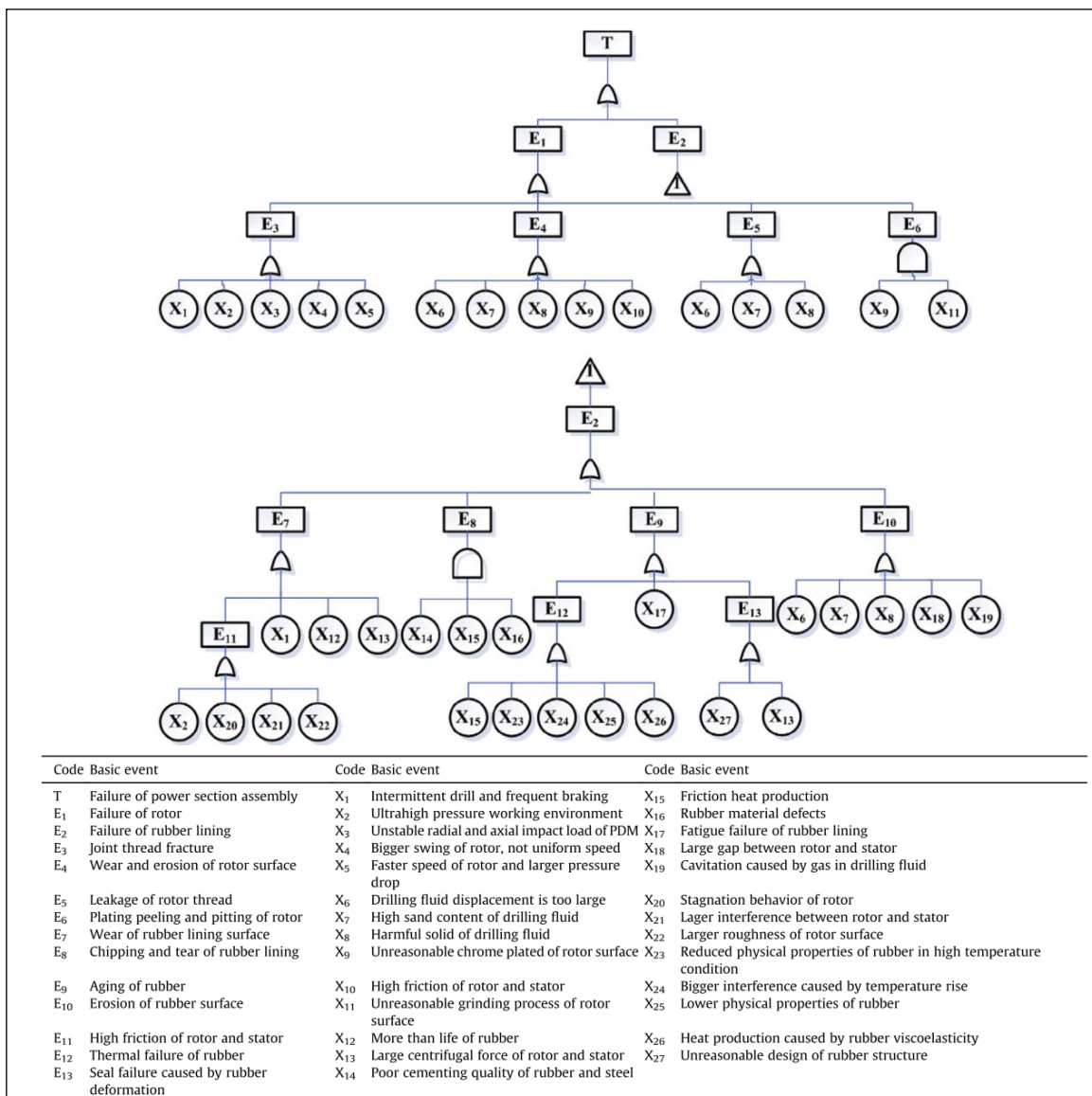
Component	Role	PHR
NBR	Elastomer	100
CB600	Filler	60
DOP	Plasticizers	5
Zn O	Activator	5
Stearic Acid	Activator	2
IPPD 4010	Anti-Oxidant	1
Sulfur	Cure Agent	2
OBTS	Accelerators	1
TMTD	Accelerators	1
Nanoclay	Nano Reinforcement	0,2,5,5,7,5,10

1. Hydrogenated nitriles (HNBR) 2. Fluroelastomers (FKM) 3. VITON 4. Formulations 5. Medium Nitrile 6. Buna 7. High Nitrile 8. Highly saturated nitriles or HSN 9. HSN 10. Aromatic 11. Izadi 12. Nanoclay

ازکارافتادگی

است که در شکل ۲ با X_1 تا X_{27} نشان داده شده است. طبق شکل ۲ ازکارافتادن سطح روتور و آستر لاستیکی از دلایل اصلی ازکارافتادن بخش تولید توان هستند و هر نوع فعالیتی در جهت افزایش عمر موتور، باید معطوف به در نظر داشتن این دو نوع علت اصلی باشد. [۱۴]. به طور کلی می‌توان از تخریب حرارتی^(۳)، خستگی حرارتی^(۴)، تخریب شیمیایی^(۵) و رشد ترک خستگی به عنوان مهم‌ترین انواع ازکارافتادگی این موتورها اشاره کرد.

ژانگ^(۱) و همکارانش در سال ۲۰۱۶ با استفاده از مدل درخت خطا^(۲) به بررسی عوامل ازکارافتادگی موتورهای درون‌چاهی پرداختند. آن‌ها با تجزیه و تحلیل منابع اطلاعاتی موجود در خصوص علل ازکارافتادگی موتور، و همچنین انجام پژوهش عملی، ازکارافتادگی بخش تولید توان را اصلی‌ترین رویداد برای رخداد این موضوع عنوان کردند. شمار علل اصلی در این بررسی ۲۷ مورد



شکل ۲ نتایج حاصل از بررسی‌های ژانگ و همکارانش با استفاده از درخت خطا پیرامون ازکارافتادگی بخش تولید توان [۱۴]

1. Zhang 2. Fault tree model 3. Thermal degradation 4. Thermal fatigue 5. Chemical degradation

گرمای تولیدی ناشی از پسماند انرژی را تخمین زد [۱۲].

$$H = 2100 * G' * \tan\delta * \epsilon^2 * F \quad (1)$$

در رابطه بالا H بیانگر گرمای پسماند انرژی برحسب G' ، نشان دهنده مدول الاستیک برحسب $\frac{BTU}{h \cdot ft^3}$ ، $\tan\delta$ ، برابر با نسبت بخش ویسکوز بر مدول الاستیک، ϵ میزان کرنش و F بیانگر فرکانس اعمالی بر نمونه است [۱۲]. از آن جایی که آسیب حرارتی ناشی از پسماند انرژی لاستیک، بر خواص و ویژگی‌های الاستومر و همچنین عمر کاربری آن تأثیر بسزایی دارد، پژوهشگران بسیاری به بررسی این امر پرداخته اند. ژانگ^(۳) و همکارانش با استفاده از روش المان محدود^(۴) به مدل سازی دو بعدی^(۵) انتقال حرارت در آسترلاستیکی استاتور موتور پیش‌رونده نوع ۶/۵ (۶ تعداد گوشه‌های استاتور و ۵ تعداد گوشه‌های روتور) برای انواع آسترلاستیکی معمولی^(۶) و با ضخامت دیواره‌ی یکنواخت^(۷) پرداختند. طبق گزارش آن‌ها، بیش‌ترین تمرکز دما در آسترهای لاستیکی معمولی در قسمت مرکزی ضخیم‌ترین بخش آن‌هاست. برخلاف این که گرمای تولید شده در سایر بخش‌ها از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی تلف می‌شود، این گرما در مرکز نه تنها تلف نمی‌شود بلکه به شکل پسماند انرژی تجمع می‌یابد و باعث آسیب و تخریب حرارتی لاستیک از همان ناحیه می‌شود. در هر دو نوع آستر لاستیکی، مطابق شکل ۳ به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین توزیع تنش حرارتی در انتها و بالای هر قوس مشاهده می‌شود. از طرف دیگر توزیع دما و گرادیان دما در آسترهای لاستیکی نسل جدید با ضخامت کم و یکنواخت، همگن‌تر از آسترهای معمولی است که همین امر نشان می‌دهد در این نوع آسترها میزان از کارافتادگی حرارتی ناشی از پسماند انرژی بسیار کمتر صورت می‌گیرد [۷].

با توجه به وابستگی تخریب حرارتی ناشی از پسماند انرژی به کرنش مکانیکی، هان^(۸) و همکارانش با استفاده از مدل‌سازی دو

از کارافتادگی حرارتی^(۱) و پسماند انرژی ناشی از آن

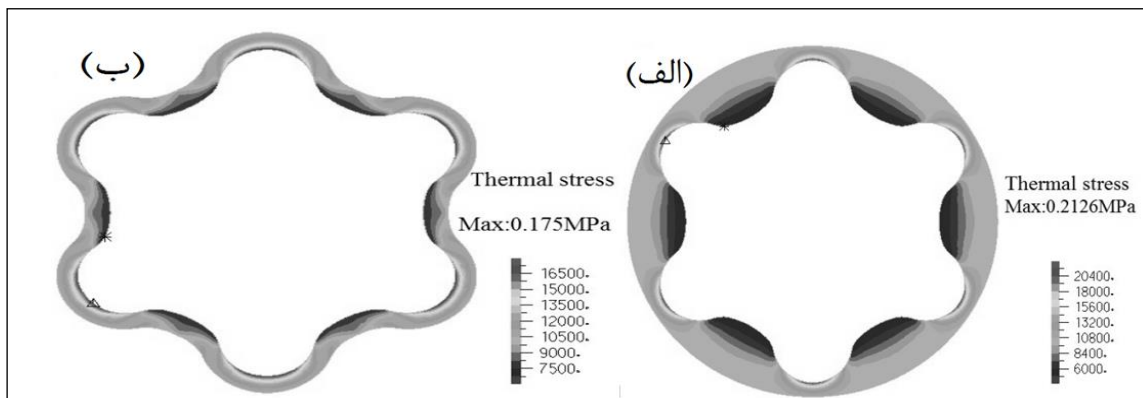
از کارافتادگی حرارتی زمانی رخ می‌دهد که دمای الاستومر استاتور برای مدت زمان طولانی از حد مجاز خود تجاوز کند که این امر باعث افت خواص فیزیکی الاستومر و در نهایت سبب کاهش عمر آستر لاستیکی استاتور می‌شود [۱۲]. افزایش دمای محیط منجر به کاهش عملکرد لاستیک می‌شود. از منشاءهای معمول افزایش دمای محیط می‌توان به دمای چینه^(۲)، دمای گل حفاری، گرمای حاصل از اصطکاک و گرمای پسماند انرژی ناشی از رفتار ویسکوالاستیک آستر لاستیکی اشاره کرد [۱۴]. از عوامل موثر بر دمای آسترلاستیکی می‌توان به عمق چاه، میزان تداخل روتور و استاتور و حرکت خارج از مرکز روتور در استاتور اشاره کرد [۱۵]. به ازای هر ۱۰۰ متر حفاری مستقیم ۳ درجه افزایش دمای طبیعی در درون چاه اتفاق می‌افتد. از آن جایی که لاستیک‌ها بر خلاف فلزات ضریب انبساط حجمی بالاتری دارند، با قرارگیری لاستیک در دمای چاه، لاستیک منبسط شده و در نهایت باعث بیشتر شدن تداخل روتور و استاتور می‌شود [۱۲]. از طرف دیگر به دلیل پایین بودن رسانایی گرمایی مواد لاستیکی، با تجمع گرمای ناشی از پسماند انرژی، از کارافتادگی حرارتی در آسترهای لاستیکی معمولی ممکن می‌گردد و از آن جایی که آسترهای لاستیکی با ضخامت کم و یکنواخت اتلاف حرارتی بهتری دارند بهبود بازه خروجی و عمر سرویس آن‌ها به نسبت آسترهای لاستیکی معمولی قابل مشاهده است [۵].

لذا تخریب حرارتی ناشی از ماهیت ویسکوالاستیک الاستومر، تابعی از تغییر شکل لاستیک (کرنش اعمالی) و خواص اتلافی آن است. همانطور که اشاره شد آستر لاستیکی استاتور مکرراً به دلیل حرکت خارج از مرکز روتور درون استاتور، متحمل تغییر شکل‌های متناوب در گوشه‌های استاتور، تولید گرمای ناشی از پسماند انرژی و به تبع دچار از کارافتادگی می‌شود [۶]. با توجه به خاصیت ویسکوالاستیک الاستومرها، بخشی از انرژی مکانیکی به انرژی حرارتی تبدیل شده که با استفاده از رابطه (۱) می‌توان میزان

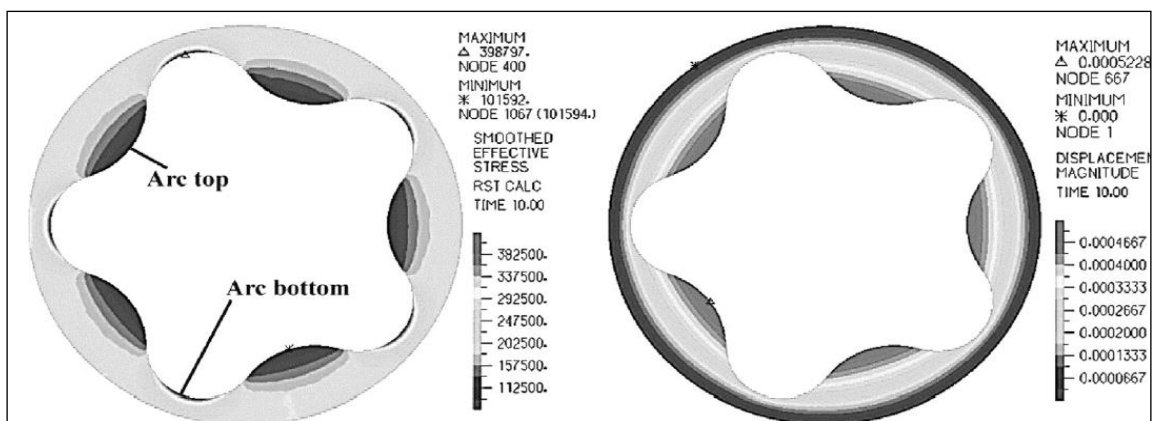
1. Thermal failure 2. Strata 3. Zhang 4. Finite element 5. Two-dimensional 6. General rubber lining 7. Uniform wall thickness
8. Han

با بررسی اثر هم‌زمان گرمای وارده بر اثر پسماند انرژی و تنش مکانیکی، مشاهده کردند که میزان تنش حرارتی و تغییر شکل ناشی از افزایش دمای لاستیک آسترلاستیکی به طور هم‌زمان از مقدار تنش مکانیکی وارده بر آن کم‌تر است و به طور کلی در حین حفاری، دمای بالای آسترلاستیکی موجب افزایش تغییر شکل و تبع باعث تداخل بیش‌تر آسترلاستیکی و روتور می‌گردد که افزایش میزان اصطکاک سطح داخلی آسترلاستیکی را در پی دارد. از طرف دیگر آن‌ها به بررسی پارامترهای موثر بر افزایش دما از جمله فشار سیال، سرعت چرخش روتور و دمای سیال حفاری

بعدی به بررسی اثرات جفت‌شده^(۱) مکانیکی و حرارتی و تاثیر آن بر تخریب حرارتی پرداختند. آن‌ها بررسی‌های خود را در شرایطی که دما و فشار چاه به ترتیب ۶۵ درجه سانتی‌گراد و ۵۰ مگاپاسکال و روتور با سرعت ۲ هرتز در حال چرخش بود انجام دادند. مطابق شکل ۴ حداکثر تنش حرارتی حاصل شده در شرایط فوق برابر با ۴۰۰ kPa در پایین قوس و حداقل آن برابر با ۱۰۲ kPa در بالای آن مشاهده شد. از طرف دیگر بیشینه و کمینه مقدار تغییر شکل به ترتیب در بالا و پایین هر قوس آسترلاستیکی نمایان می‌شود. مطابق شکل ۵



شکل ۳ توزیع تنش حرارتی در (الف) آسترهای لاستیکی معمولی (ب) آسترهای لاستیکی با ضخامت کم و یکنواخت [۷]



شکل ۴ مقادیر تنش (Pa) و جابه‌جایی (m) در آسترلاستیکی معمولی [۱۶]

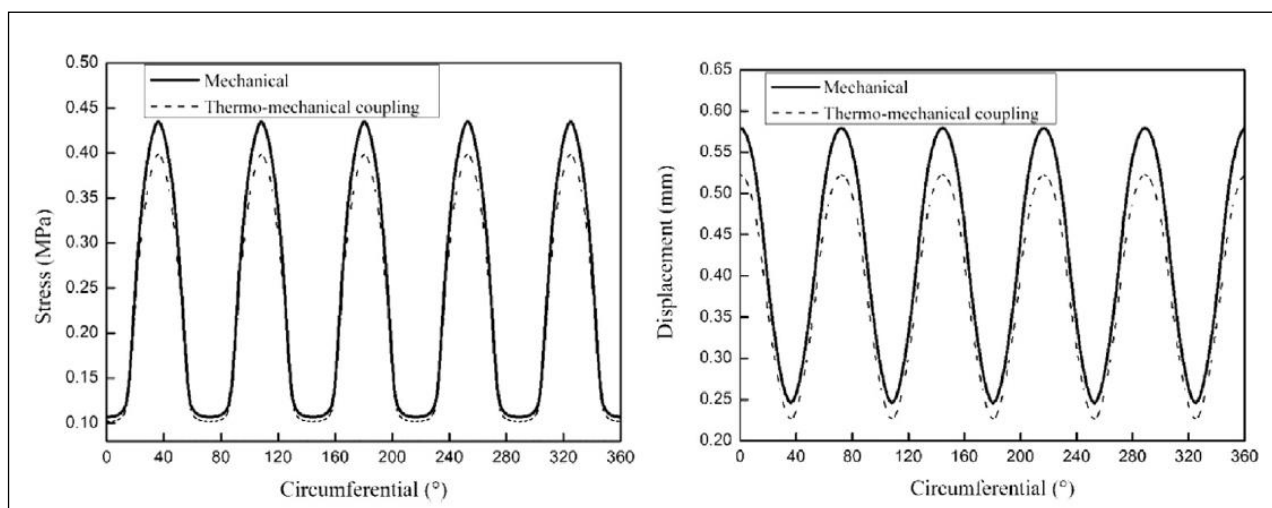
1. Coupling

پمپ‌های پیش رونده ۲/۳ که از آن‌ها به طور گسترده‌ای برای استخراج نفت سنگین استفاده می‌شود بهره برده شد. بررسی‌ها بیانگر آن بود که خطای مدل مونی ریولین در بیش‌تر مواقع از مدل یه‌او کم‌تر بوده و بنابراین این مدل برای مطالعات بیشتر آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت. از آن‌جایی که اندازه‌ی شبکه^(۴) المان محدود مورد استفاده با نتایج حاصل از مدل سازی المان محدود رابطه مستقیمی دارد، آن‌ها مدل‌سازی خود را در ۴ اندازه مختلف از المان انجام داده و در نهایت المان با اندازه‌ی ۱/۵ میلی‌متری را برای مطالعات خود برگزیدند. از طرف دیگر برای انجام دقیق و شبیه‌سازی شده‌ی آزمون پیرشدگی، دقت بالایی در انتخاب دمای آزمون پیرشدگی صورت دادند. با در نظر داشتن دو واقعیت که اولاً در دمای کمتر از ۷۰ درجه سانتی‌گراد تغییر محسوسی در ویژگی الاستومرها اتفاق نمی‌افتد و از سوی دیگر نفت سنگین که معمولاً در عمق کمتر از ۴۰۰۰ متر با دمای سازند کمتر از ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد استخراج می‌شود، آزمون‌های خود را در ۴ دمای ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد که متناظر با چهار عمق ۱۶۶۷، ۲۶۶۷، ۳۶۶۷ و ۴۳۳۳ متری از سطح زمین است انجام دادند. آن‌ها ضمن مقایسه داده‌های حاصل از مدل‌سازی به‌عنوان

پرداختند و اثر هر سه را بر انباشتگی حرارتی و توزیع دما مطالعه کردند [۱۶].

شی^(۱) و همکارانش با هدف مشاهده اثر جفت‌شده بار حرارتی و بار مکانیکی، به مدل‌سازی استاتور بخش تولید توان موتور ۶/۵ به صورت سه بعدی در دو نوع آستر لاستیکی معمولی و آستر لاستیکی با ضخامت کم پرداختند و به نتایجی مشابه نتایج بررسی‌های انجام شده در گذشته رسیدند [۴].

در ادامه تحقیقات، شی و همکارانش با تمرکز بر پمپ‌های حفره‌دار پیش‌رونده که به لحاظ ساختاری کاملاً مشابه موتورهای حفاری هستند و با اشاره به تأثیری که آسیب آستر لاستیک بر پدیده نشتی به جا می‌گذارد، از روش المان محدود به بررسی تغییر شکل دیواره داخلی آسترلاستیکی استاتور، توزیع دما و ازکارافتادگی ناشی از پیرشدگی حرارتی پرداختند. آن‌ها برای نخستین بار، ثوابت موادی مورد نیاز برای مدل‌سازی مکانیکی را از نمونه‌هایی که فرآیند پیرشدگی حرارتی را تجربه کرده بودند استخراج کردند و با این کار تلاش کردند دقت مدل‌سازی را افزایش داده و شرایط آن را به شرایط واقعی نزدیک‌تر کنند. از مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی بر پایه مدل مونی-ریولین^(۲) و یه‌او^(۳) در

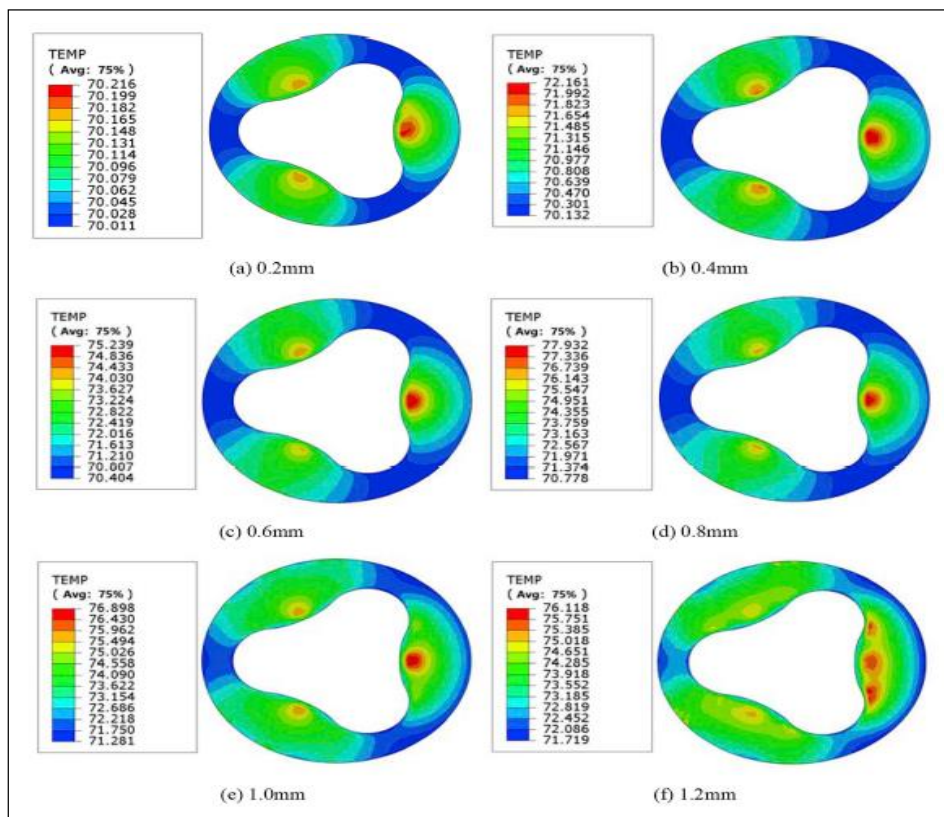


شکل ۵ منحنی تنش و جابه‌جایی در دیواره داخلی آسترلاستیکی [۱۶]

1. Shi 2. Mooney-Rivlin 3. Yeoh 4. Mesh

دمای ایجاد شده در لاستیک با دمای فرضی سازند، مشاهده کردند که دمای لاستیک از دمای چاه تاثیر می‌پذیرد و با افزایش آن، افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با بررسی میزان تداخل‌های متفاوت از ۰/۲ تا ۱/۲ میلی‌متر، آسترلاستیکی و روتور در عمق ۱۶۶۷ و ۲۶۶۷ متر دریافتند که ضمن افزایش تداخل، میزان بیشینه دمای حاصل شده در آستر لاستیکی ابتدا با شیب بالایی افزایش یافته، سپس شیب آن کمتر شده و نهایتاً روند کاهشی به خود می‌گیرد. این در حالی است که طبق شبیه‌سازی آن‌ها، دمای کلی سامانه به‌طور پیوسته در حال افزایش است. مطابق با شکل ۶ مرکز پسماند انرژی در سه ناحیه پخش شده است. با افزایش تداخل آستر لاستیکی و روتور، تغییر شکل آستر لاستیکی افزایش می‌یابد و به تبع منجر به مصرف انرژی بیشتر موتور می‌گردد که در نتیجه میزان گرمای کلی سامانه افزایش می‌یابد. با افزایش دمای محیط، لاستیک نیتریل معمولی دچار پیرشدگی بیش‌تری می‌گردد که

منجر به افزایش سختی، کاهش برگشت‌پذیری الاستیک و افت خصلت آب‌بندی آن می‌شود. در نهایت در دمای بیشینه ناشی از پسماند انرژی، لاستیک دچار ازکارافتادگی ناشی از سوختگی می‌شود. بر طبق مدل‌سازی صورت گرفته در این مقاله، حداکثر افزایش درجه حرارت مربوط به محیط‌هایی با دمای ۱۰۰، ۷۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، از ۱۰ درجه سانتی‌گراد تجاوز نمی‌کند. بنابراین با استفاده از موتورهای پیش‌رونده ۳/۲ در عمق بیش‌تر از ۳۶۶۷ متر با استفاده از میزان تداخل بهینه و به تبع با افزایش فشار پمپ می‌توان ظرفیت کشندگی پمپ را افزایش داد اما تداخل بیش‌تر باعث افزایش فشار تماس و گشتاور و در نتیجه افزایش اصطکاک می‌شود که در نهایت منجر به ازکارافتادگی ناشی از خستگی می‌گردد. به دلیل دمای بالای عمق ۴۳۳۳ متری از سطح زمین، آسترلاستیکی دچار پیرشدگی شدیدی می‌شود و از طرفی همان‌طور که تداخل کم باعث پدیده نشتی می‌گردد، افزایش



شکل ۶ مقطع عرضی آستر لاستیکی در عمق ۱۶۶۷ متری با میزان تداخل‌های مختلف روتور و استاتور [۱۵]

خواص در لاستیک‌های نیتریل هیدروژنه اشاره کرد [۱۲]. ایزدی و همکارانش نیز با تهیه نانوکامپوزیتی از این‌بی‌آر با نانو ذرات رس به بررسی این موضوع پرداختند. با انجام آزمون‌های سختی، مقاومت کششی و پارگی در نمونه نانوکامپوزیتی، افزایش استحکام مکانیکی و از طرف دیگر با انجام آزمون دینامیکی مکانیکی بر روی نمونه نانو کامپوزیتی، کاهش ضریب اتلاف و به تبع به کاهش پسماند انرژی حرارتی را به هنگام استفاده از نانوذرات مشاهده کردند. به طوری کلی می‌توان گفت استفاده از این نانو کامپوزیت در بهبود عملکرد و میزان عمر آسترلاستیک، کاهش زمان و کاهش هزینه حفاری اثر قابل توجهی دارد [۱۸].

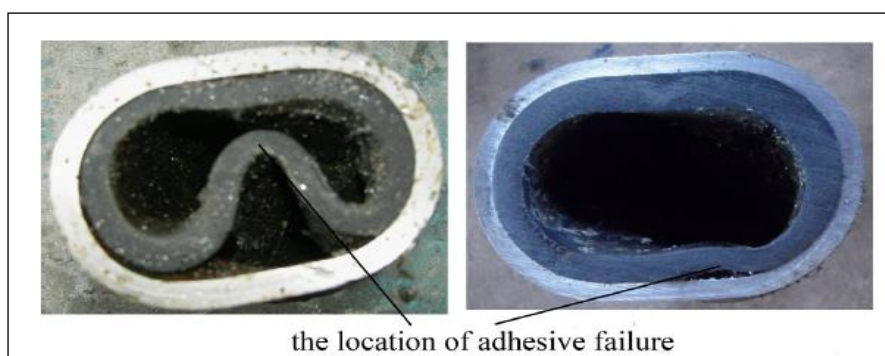
از کارافتادگی مکانیکی

چن^(۸) و همکارانش با استفاده از مدل‌سازی دو بعدی بخش تولید توان به بررسی از کارافتادگی چسبندگی^(۹) بین آسترلاستیک و محفظه فلزی استاتور در دو نوع آسترلاستیک با ضخامت کم و یکنواخت و آستر معمولی پرداختند و مطابق با شکل ۷ به این نتیجه رسیدند که به دلیل بیش‌تر بودن تنش برشی در مرز میان آسترلاستیک و محفظه فلزی در آسترهای با ضخامت کم و یکنواخت به نسبت آسترهای معمولی، این نوع از کارافتادگی در آسترهای های لاستیک با ضخامت کم و یکنواخت بیش‌تر مشاهده می‌شود [۱۹].

تداخل آسترلاستیک و روتور باعث تولید گرمای بسیار زیادی از پسماند انرژی می‌شود. پس به لاستیک با مقاومت حرارتی بسیار بالاتری نیاز است و برای رفع این نیاز می‌بایست به جای لاستیک نیتریل معمولی از لاستیک نیتریل هیدروژنه استفاده گردد [۱۵].

تخریب و از کارافتادگی شیمیایی^(۱)

سیال حفاری از مواد شیمیایی مختلفی تهیه شده تا بتواند الزامات متعددی از جمله بهبود نرخ نفوذ حفاری^(۲)، جلوگیری از صدمه سازند^(۳)، امکان تمیز کردن آسان و... را فراهم سازد [۱۲]. سیال حفاری می‌تواند به گروه‌های مختلفی اعم از پایه آبی، پایه روغنی و پایه پلیمری تعلق داشته باشد. سیال روغنی بیش‌ترین تاثیر را بر تخریب الاستومر دارد و برخی از مواد شیمیایی، روغن‌های سنتزی یا آروماتیک موجود در سیالات حفاری و یا وزن زیاد سیال حفاری در برخی میدان‌های نفتی [۱۷]، زنجیر مولکولی لاستیک را تضعیف می‌کنند که منجر به کاهش خصوصیات فیزیکی لاستیک و جمع‌شدگی^(۴) یا تورم^(۵) و تغییر در میزان تداخل روتور و استاتور می‌گردد که تشدید از کارافتادگی را در پی دارد [۱۲]. از همین رو پژوهشگران به دنبال یافتن بهترین ترکیب‌بندی^(۶) برای الاستومر انتخابی هستند تا بتوان شدت از کارافتادگی شیمیایی را کاهش داد. به طوری که دلپسند^(۷) به مقایسه لاستیک‌های نتریل معمولی و هیدروژنه به هنگام تماس با سیال حفاری پرداخت و به افت کمتر

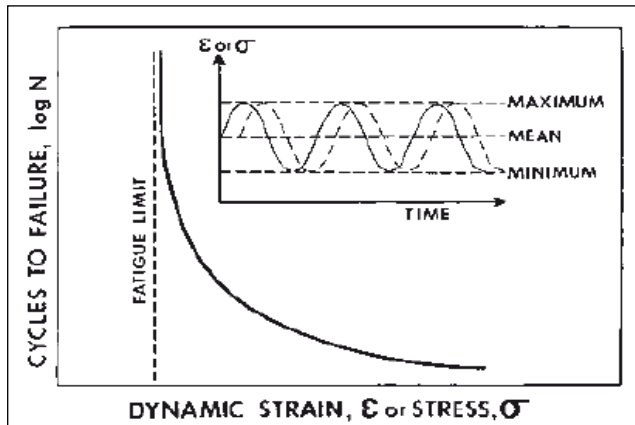


شکل ۷ جدایش آستر از بدنه‌ی فلزی بدلیل از کارافتادگی لایه چسب موجود در فصل مشترک [۱۹]

1. Chemical failure 2. Drilling Penetration Rate 3. Formation Damage 4. Shrinkage 5. Swell 6. Formulation 7. Delpassand
8. Chen 9. Adhesive Failure

از کارافتادگی خستگی

به روش غیر مستقیم انجام می‌گیرد [۲۲].



شکل ۸ منحنی‌های S-N، مورد استفاده در آنالیز خستگی تا از کارافتادگی [۲۱]

در صورتی که آسترلاستیکی تحت تنش و کرنشی بیش‌تر از حد مجاز خود قرار گیرد، دچار از کارافتادگی مکانیکی و خستگی می‌شود. اگر تنش‌های ناشی از گل حفاری تحت فشار، میزان حرکت روتور و میزان تداخل روتور با استاتور از حد مجاز خود عبور کند، آسترلاستیکی همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، دچار پارگی و از هم گسیختگی^(۴) می‌شود [۱۴].

شدت آسیب ایجاد شده در بارگذاری‌های دینامیکی، علاوه بر میزان تغییر شکل (کرنش) به بسامد بارگذاری نیز وابسته است. طبق رابطه ۲، اگر N شمار گوشه‌های استاتور و v بیانگر سرعت چرخش روتور باشد، آسترلاستیکی با بسامد f متحمل بارگذاری دینامیکی خواهد شد. بنابراین، با افزایش شمار گوشه‌های استاتور و همچنین افزایش سرعت روتور، آسترلاستیکی با فرکانس بالاتری دچار تغییر شکل خواهد شد که نهایتاً منجر به ظهور ترک‌های ریزی در سطح آسترلاستیکی در نتیجه‌ی خستگی مکانیکی خواهد شد. واضح است که چنین تغییر شکل تناوبی اعمالی تعیین‌کننده‌ی عمر خستگی ماده خواهد بود و به خودی خود اهمیت بررسی خستگی را خاطر نشان می‌کند [۱۲].

$$f = \frac{v}{60} N \quad (2)$$

پارامترهای زیادی بر رفتار خستگی مکانیکی ترکیبات لاستیکی موثر هستند که از جمله‌ی مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تاریخچه‌ی بارگذاری مکانیکی، اثرات محیطی، نوع ترکیب‌بندی لاستیک، اثرات مربوط به جنبه‌های اتلافی پاسخ لاستیک، ماهیت فاز میانی پلیمرپرکننده، میزان لاستیک پیوندشده^(۱) و به طور جامع‌تر میکرومکانیک کامپوزیت اشاره کرد [۲۰]. روش‌های معمول ارزیابی استحکام لاستیک‌ها، اندازه‌گیری استحکام کششی و یا آزمون‌های پارگی است. در عمل، قطعات لاستیکی به ندرت در اثر رشد ترک ناشی از بارگذاری‌های ایستایی دچار شکست می‌شوند بلکه در عوض، شکست‌ها معمولاً ناشی از بارگذاری‌های متناوب و پشت سرهم است. طبق تعریف، خستگی مکانیکی شامل اثرات هسته‌گذاری ترک و رشد آن در اثر بارهای نوسانی اعمال شده می‌باشد. شکست در بارگذاری‌های دینامیکی در تنش‌هایی بسیار کمتر از شرایط ایستا صورت می‌پذیرد [۲۱]. از دیدگاه‌های بررسی رفتار خستگی می‌توان از دیدگاه سنتی خستگی تا از کارافتادگی و دیدگاه جدید مکانیک شکست یعنی رشد ترک خستگی نام برد. در دیدگاه سنتی خستگی تا از کارافتادگی، برای محاسبه تعداد چرخه‌ها^(۲) (N) تا پارگی نمونه از بارگذاری دینامیکی با دامنه‌ی تنش‌ی یا کرنشی S از یک نمونه فاقد ترک اولیه استفاده می‌شود که نتیجه آن منحنی‌های موسوم به منحنی وُلر^(۳) یا S-N است که روندی مطابق شکل ۸ را دارد. در این نمودارها، N تعداد چرخه‌ها تا از کارافتادگی بوده و شامل چرخه‌های مورد نیاز برای جوانه زنی ترک و رشد متعاقب آن‌ها است. در رویکرد جدید خستگی، از مبانی مکانیک شکست و شاخص نرخ انرژی کرنشی ره‌اشده (G) برای توصیف رفتار خستگی مواد استفاده می‌شود. از آنجایی که این دیدگاه بر پایه وجود ترک‌های ذاتی در نمونه است و برای شروع آزمون از یک پیش ترک کمک گرفته می‌شود، تعداد چرخه‌های حاصل از این بررسی تنها به مرحله رشد ترک اشاره دارد و محاسبه عمر خستگی در این روش بر خلاف دیدگاه سنتی

1. Bound rubber 2. Cycles 3. Wohler 4. Rupture



شکل ۹ نمایی از ازکارافتادگی آسترلاستیکی الاستومر [۱۴]

ناشی از خستگی و کاهش عملکرد موتور شود [۲۳].

$$u(S, P) = P[0.00896 + 0.00281 \sin(0.02967S + 0.5) \pi] \quad (3)$$

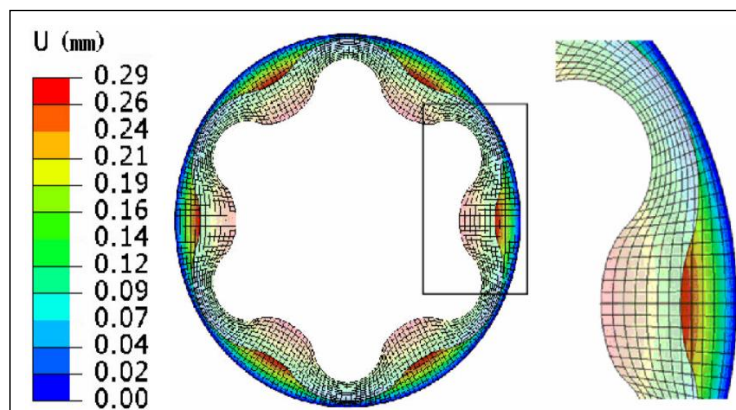
با توجه به ارتباط مستقیم مقدار جابجایی و تنش مکانیکی بر خستگی و ازکارافتادگی مکانیکی، شی و همکارانش به بررسی روند متقابل جابه‌جایی در آسترلاستیکی معمولی و آسترلاستیکی با ضخامت کم و یکنواخت، تحت شرایط یکسان اشاره کرد به طوری که بیشینه و کمینه میزان جابه‌جایی در آسترلاستیکی معمولی به ترتیب در قسمت بالا و پایین هر قوس مشاهده می‌شود که در آسترلاستیکی با ضخامت کم و یکنواخت عکس این اتفاق رخ می‌دهد. از طرف دیگر، آن‌ها شاهد وجود بیشینه و کمینه میزان تنش وارده بر آسترهای لاستیکی معمولی به ترتیب در

شی و همکارانش نیز به علت قرارگیری پیوسته موتورهای درون‌چاهی تحت تغییر شکل‌های متناوب، با استفاده از مدل سازی سه بعدی آسترهای لاستیکی معمولی به بررسی ازکارافتادگی ناشی از خستگی پرداختند. آن‌ها با تمرکز بر این موضوع که می‌توان از میزان آب‌بندی مناسب و تداخل مناسب میان روتور و استاتور به عنوان عوامل موثر در بهبود کارایی موتورهای درون‌چاهی یاد کرد، دریافتند که طبق رابطه ۳ با در نظر گرفتن رابطه مستقیم بین میزان جابه‌جایی آسترلاستیکی (u) و فشار داخلی سامانه (P)، با افزایش فشار داخلی، میزان جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد، که مطابق با شکل ۱۰ بیشینه این جابه‌جایی در بالای هر قوس و مقدار کمینه آن در پایین هر قوس رخ می‌دهد و این تغییرات شکل به صورت سینوسی در دیواره داخلی آسترلاستیکی ظاهر می‌شوند. از طرف دیگر این اتفاق می‌تواند مسبب به هم خوردن تداخل میان روتور و استاتور و در نهایت نشت سیال از حفرات، ازکارافتادگی

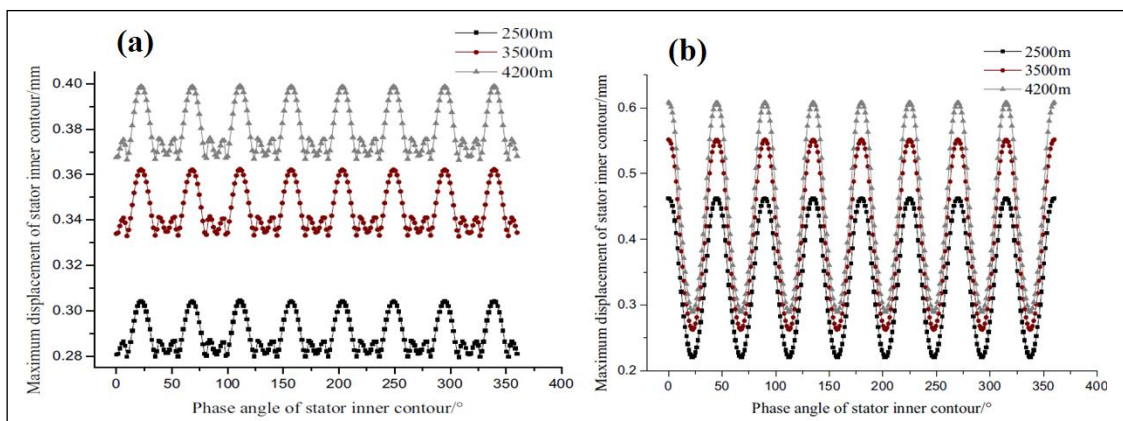
کم و یکنواخت است [۵]. به طور کلی با مقایسه آسترهای لاستیکی سنتی و انواع با ضخامت کم می‌توان به این نتیجه رسید که از کارافتادگی حرارتی و ناشی از پسماند انرژی در آسترهای لاستیکی با ضخامت کم و یکنواخت، عمدتاً منشا مکانیکی دارد تا منشا حرارتی، و بهبود عمر خستگی این آسترها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

ایزدی و همکارانش نیز با استفاده از بهره‌گیری از نانوکامپوزیت حاوی نانو رس و لاستیک NBR به پیش‌بینی عمر موتورهای درون‌چاهی به روش دیدگاه سنتی خستگی تا از کارافتادگی پرداختند و مطابق با شکل ۱۲ دریافتند که استفاده از نانو ذرات رس منجر به افزایش تعداد سیکل طی شده تا شکست می‌گردد [۱۳].

بخش نازک‌ترین و ضخیم‌ترین مکان آن بودند که بیشینه تنش در آسترهای لاستیکی با ضخامت کم و یکنواخت در قسمت انتهایی هر قوس رخ می‌دهد. از طرف دیگر بیشینه میزان جابه‌جایی در آسترهای لاستیکی با ضخامت کم و یکنواخت کمتر از این مقدار در آسترهای لاستیکی معمولی است که به ترتیب برابر ۰/۳۹۹ و ۰/۶۰۸ میلی‌متر است. با بررسی‌های صورت گرفته در میزان جابه‌جایی آستر لاستیکی استاتور ضمن گردش روتور در آن، مشاهده کردند که در آسترهای معمولی بر خلاف آسترهای با ضخامت کم و یکنواخت، مطابق شکل ۱۱، نوسان‌های چشمگیرتری حاصل می‌شود که همین امر بیانگر عملکرد بهتر خطوط آب‌بندی و به تبع آب‌بندی بهتر هر حفره در آسترهای لاستیکی با ضخامت



شکل ۱۰ تغییر شکل آستر لاستیکی تحت فشار داخلی ۲۵ مگاپاسکال [۲۳]



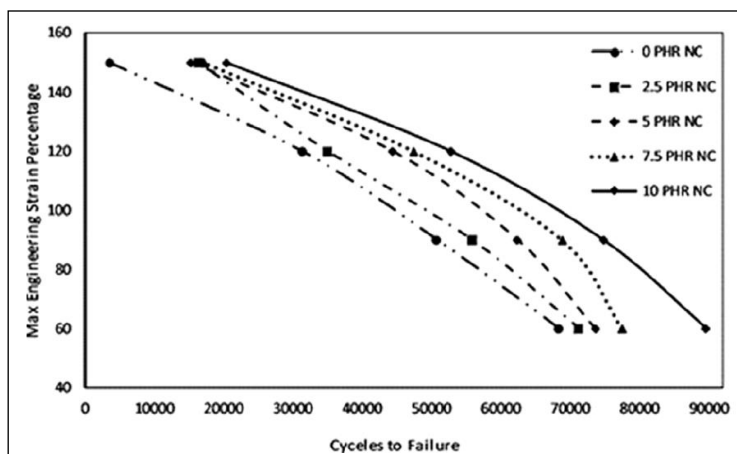
شکل ۱۱ مقایسه میزان جابه‌جایی عمودی آسترهای لاستیکی (a) با ضخامت کم و یکنواخت (b) معمولی در اعماق مختلف از چاه [۵]

اینچی می تواند تاثیر بسیار زیادی بر عمر و دوام آستر لاستیکی داشته باشد [۱۲].

دلپسند و همکاران با بهره مندی از یک مدل تحلیلی پیش‌بینی کننده عمر خستگی تلاش کردند تا با انجام یک شبیه‌سازی المان محدود و استخراج پاسخ تنش- کرنشی حاصل از بارگذاری‌های متناوب مکانیکی و حرارتی، دوام و کارایی آسترهای الاستومری مورد استفاده در دمای و فشارهای داخلی مختلف کمی‌سازی کنند. مطابق جدول ۳، پس از انجام مدل‌سازی به صورت دینامیکی و با استفاده از پارامترهای عملیاتی، بیش‌ترین دمای حاصل شده در آستاتور و همچنین مقدار کرنش ایجاد شده در آن تعیین شد. ضمن مقایسه انرژی کرنشی ماده به عنوان میزان مقاومت ذاتی آن در برابر رشد ترک که به روش تجربی برای آستر لاستیکی تعیین شده بود با مقدار کرنش حاصل شده از مدل‌سازی، تخمین‌هایی از عمر برای آستر لاستیکی آستاتور حاصل شد که بیشترین آن برابر با ۵۰۰ ساعت و کمترین آن برابر با ۸۷ ساعت ارزیابی شد [۱۲].

یکی از شاخص‌های بسیار موثر در عمر خستگی آسترهای لاستیکی آستاتور، میزان تداخل روتور و آستاتور است. تداخل بالا سبب افزایش آب‌بندی حفرات و کاهش نشستی می‌شود اما از سوی دیگر می‌تواند با ایجاد کرنش‌های موضعی بالا سبب تشدید ازکارافتادگی مکانیکی برای آستر لاستیکی آستاتور شود. بسته به شرایط کاربری از حیث دمای محیط و نوع گل حفاری می‌توان اندازه روتور و آستاتور را به گونه‌ای انتخاب کرد که به‌واسطه تغییرات ابعادی ناشی از دما یا تورم، تداخل نامناسبی بین روتور و آستاتور شکل نگیرد. طراحان بخش تولید توان با تنوع بخشی به اندازه‌های روتور و آستاتور، شرایط را برای گزینش نسبت تداخل مناسب فراهم می‌کنند. به عنوان نمونه، برای حفاری در دمای ۱۵۰°F استفاده از یک روتور و آستاتور با اندازه‌ی استاندارد می‌تواند مطلوب باشد، اما برای حفاری در دمای ۲۵۰°F ممکن است به یک روتور با اندازه استاندارد و آستاتور با اندازه بزرگ تر از استاندارد نیاز باشد. تغییر بسیار کمی در نسبت تداخل از ۰/۰۵ تا ۰/۰۱

شکل ۱۲ تعداد سیکل‌های قابل تحمل نمونه قبل از رخداد شکست در کرنش‌های مختلف [۱۳]

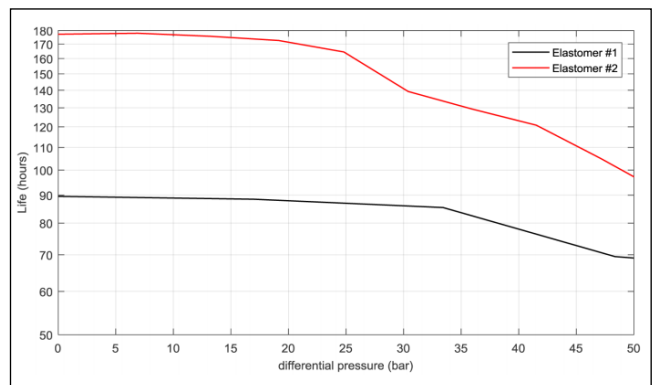


جدول ۳ پیش‌بینی عمر آستاتور با آستر لاستیکی برای موتور با قطر ۶/۷۵ اینچی و تعداد گوشه های ۴:۵ [۱۲]

Circulating Temperature (F)	Pressure per Stage (PSI)	Rotor Speed (RPM)	Maximum Stator Temp (F)	Normalized Rubber Strain	Rubber Strain Energy (KPSI)	Normalized Stator Life	Stator Life Estimates (hours)
150	100	400	238	1	125	1	500
200	200	400	344	2.3	49	0.17	87
200	100	600	332	1.2	52	0.33	167
250	100	400	338	1.3	51	0.31	154

بیه^(۱) و همکاران در سال ۲۰۱۸ با بیان اینکه عمر خستگی الاستومر در بخش تولید توان تعیین کننده بیشترین زمان کارایی موتور است تلاش کردند با مدل سازی بتوانند کارایی دو نوع الاستومر را از حیث دوام و عمر پیش بینی کنند. همانطور که در شکل ۱۳ دیده می شود برای دامنه گسترده ای از اختلاف فشار جزئی در بخش تولید توان، نوع الاستومر شماره یک بسیار بهتر از نوع شماره ۲ برآورد شد و برای اختلاف فشار عملیاتی ۱۵ بار، عمر دو برابر ی نسبت به الاستومر نوع ۲ از خود نشان می دهد. آن ها در ادامه عمر الاستومر را بعد از اعمال پیرشدگی حلالی مورد ارزیابی قرار دادند و بر مبنای آن، نوع الاستومر مناسب برای شرایط عملیاتی خود را تعیین کردند [۹].

متحمل آسیب های زیادی می گردند که بیشترین آسیب از ناحیه استاتور رخ می دهد. از کارافتادگی این ناحیه معمولاً به دلیل اعمال بار مکانیکی زیاد، خستگی، ناسازگاری با سیال حفاری و دمای بالای چاه رخ می دهد. از انواع از کارافتادگی این بخش می توان از تخریب حرارتی، خستگی حرارتی، تخریب شیمیایی و رشد ترک خستگی نام برد. بررسی ها حاکی از آن است که تخریب حرارتی ایجاد شده به علت دما و فشار بالای سیال حفاری و محیط چاه به وقوع می پیوندد. گاهی این تخریب به دلیل تغییر خواص فیزیکی الاستومر به علت وجود ذرات جامد و مایع خورنده موجود در سیال حفاری اتفاق می افتد که به آن تخریب شیمیایی گفته می شود. از کارافتادگی مکانیکی زمانی رخ می دهد که آسترلاستیکی تحت بارهای دینامیکی قرار می گیرد که در نتیجه آن موجب ایجاد فشار بیش از حد و تداخل بیش از حد روتور و استاتور و به تبع موجب از کارافتادن مکرر موتور می گردد. هنگامی که آستر لاستیکی تحت کرنشی بیش تر از حد نرمال قرار گیرد دچار از کار افتادگی ناشی از خستگی می شود. با توجه به کاربرد بالای این موتورها در صنعت حفاری، از گذشته تاکنون پژوهشگران بسیاری به بررسی سازوکارهای از کارافتادگی آن ها پرداخته اند. نتایج نشان می دهد برخلاف کمتر شدن میزان تخریب حرارتی در آسترهای لاستیکی با ضخامت کم و یکنواخت به نسبت آسترهای معمولی، از کارافتادگی مکانیکی ناشی از تغییر شکل و در نهایت از کارافتادگی ناشی از خستگی در آسترهای با ضخامت کم و یکنواخت بیش تر دیده شده است. پیش بینی عمر خستگی می تواند شاخص کلیدی در ارزیابی کارایی بخش تولید توان این موتورها باشد



شکل ۱۳ مقایسه عمر کارایی دو نوع الاستومر مورد استفاده در موتور درون چاهی بر حسب اختلاف فشار بخش تولید توان [۹]

جمع بندی

با توجه به این موضوع که برای حفاری چاه های جهت دار نمی توان از روش های قدیمی و روش های مورد استفاده برای حفاری چاه های عمودی استفاده کرد، از نوعی از موتورهای پیش رونده به نام موتورهای درون چاهی برای این امر بهره گرفته می شود. قلب هر موتور درون چاهی، بخش تولید توان آن است که خود شامل دو بخش روتور و استاتور است. بخش تولید توان این موتورها

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت های دانشگاه تربیت مدرس صمیمانه تشکر می کنند *IRM*

مراجع

1. Ma, T., P. Chen, and J. Zhao, Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2016. 2(4): p. 365-395.
2. Perez, B.L., Downhole motor stator and method of manufacture. 2018, Google Patents.
3. BA, S., et al. Positive Displacement Motor Modeling: Skyrocketing the Way We Design, Select, and Operate Mud Motors. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. 2016. Society of Petroleum Engineers.
4. Shi, C., et al., Failure analysis of general stator and uniform wall thickness stator. *Engineering Failure Analysis*, 2018. 94: p. 239-248.
5. Changshuai, S., C. Yike, and Z. Xiaohua, Applicability evaluation and hysteresis heat effect of rubber constitutive model of PDM stator bushing at high temperature in deep well. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019. 44(6): p. 6057-6066.
6. Eppink, J.M., Coupling for a downhole tandem drilling motor. 1997, Google Patents.
7. Zhang, J., Z. Liang, and C. Han, Failure analysis and finite element simulation of key components of PDM. *Engineering Failure Analysis*, 2014. 45: p. 15-25.
8. BA, S., et al. Combined Data Analytics and Physics-Based Simulation for Optimum Bit, Motor, BHA Combination. in *Offshore Technology Conference Brasil*. 2019. Offshore Technology Conference.
9. Beeh, H.A., et al. Drilling a Challenging Kvitbjørn Field 5³/₄-in. Section in a Single Run Using a New Mud Motor Modeling Engineering Workflow and New Long-Life Elastomer. in *SPE Norway One Day Seminar*. 2018. Society of Petroleum Engineers.
10. Delpassand, M.S., Multiple elastomer layer progressing cavity stators. 2009, Google Patents.
11. Lyons, W.C. and G.J. Plisga, *Standard handbook of petroleum and natural gas engineering*. 2011: Elsevier.
12. Delpassand, M.S., Stator life of a positive displacement downhole drilling motor. 1999.
13. Izadi, M., M. Tabatabaee Ghomi, and G. Pircheraghi, Mechanical Strength Improvement of Mud Motor's Elastomer by Nano Clay and Prediction the Working Life via Strain Energy. *International Journal of Engineering*, 2019. 32(2): p. 338-345.
14. Zhang, J., C. Han, and Z. Liang, Physics of failure analysis of power section assembly for positive displacement motor. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016. 44: p. 414-423.
15. Shi, C., et al., Thermal failure of 2/3 PCP in high temperature environment and optimization analysis of stator and rotor meshing parameters. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019. 61: p. 174-182.

16. Han, C., J. Zhang, and Z. Liang, Thermal failure of rubber bushing of a positive displacement motor: a study based on thermo-mechanical coupling. *Applied thermal engineering*, 2014. 67(1-2): p. 489-493.
17. Izadi, M., M.T. Ghomi, and G. Pircheraghi, Increasing the Working Life and Performance Improvements of Down Whole Mud Motors Using Nanocomposite Elastomer. 2019.
18. Izadi, M., M.T. Ghomi, and G. Pircheraghi, Increasing the Working Life and Performance Improvements of Down Whole Mud Motors Using Nanocomposite Elastomer (in persian). 1398.
19. Chen, J., et al., Finite element analysis for adhesive failure of progressive cavity pump with stator of even thickness. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015. 125: p. 146-153.
20. Mars, W. and A. Fatemi, Factors that affect the fatigue life of rubber: a literature survey. *Rubber Chemistry and Technology*, 2004. 77(3): p. 391-412.
21. Gent, A.N., *Engineering With Rubber: How to Design Rubber Components*. 2001: Hanser.
22. Alimardani, M., Investigating the Effect of Reinforcing Filler-Polymer Interaction on Viscoelastic and Fatigue Crack Growth of Rubber-Nanosilica Composites. 2017.
23. Shi, C., et al., Analysis of mechanical behavior and hysteresis heat generating mechanism of PDM motor. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017. 31(3): p. 1143-1149.



Review on the Failure Mechanisms of Rubber Liner used in Stator of Downhole Motors

S. Tavousi¹, M. Alimardani^{2,*}

1. Master student, Polymer Engineer, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Contact Number:09198183442
2. PhD, Assistant Professor, Faculty Member, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Contact Number:09126217295

*Corresponding author Email: 1-tavosisahar@gmail.com. 2- * m.alimardani@modares.ac.ir

Abstract: The power section of downhole motors consists of a helical steel rotor and a rubber-covered stator which together converts the hydraulic energy of a drilling fluid to the mechanical energy of rotor rotation. Flowing of drilling fluid through the cavities formed by the geometrical difference between the rotor and the stator can finally rotate the drilling bit. From a design point of view, it is essential that the rubber lining is able to provide proper sealing for the cavities at minimal mechanical deformation so as to allow advancement of drilling fluid without excessive heat generation. For this purpose, on the one hand, the elastomer used needs to have high modulus to avoid distortion and high dynamic deformation, and on the other hand, it must have sufficient resilience for adequate sealing capabilities. Sufficient strength and resistance to crack formation and growth are among the other important criteria for this application. Failure of downhole motors is mainly due to the poor performance of the power section and in particular it results from the failure of the stator rubber lining. The high pressure and temperature existing inside the well, the chemistry of drilling fluid and also the intensified mechanical stresses due to the rotor rotation, can all contribute to various mechanisms of rubber failure including thermal degradation, chemical degradation, thermal fatigue and mechanical fatigue. To repair any damage to the rubber lining makes the failure of downhole motors very costly. This paper works on the latest achievements in the analysis of elastomer failure in downhole motors. It was realized that the thermal degradation mechanism is more prominent for the lining known as “uniform wall thickness” than the “conventional” type. However, failure resulting from the mechanical periodic loading is greater in the uniform wall thickness lining than the conventional types.

Keywords: Downhole motors- Failure- Rubber lining