



شبیه سازی یک بعدی و آزمون پمپ روغن حجم جابجایی متغیر

علی رحمانی مقدم^{۱*}، رضا سلطانی^۲، محمدصدرا علی خانی^۳، رحمان وحدتی^۴

a_rahmani@ip-co.com

r_soltani@ip-co.com

mo_alikhani@mecheng.iust.ac.ir

rn.vahdati@gmail.com

^۱ کارشناس اداره روانکاری و اصطکاک شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو (ایپکو)

^۲ رئیس اداره روانکاری و اصطکاک شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو (ایپکو)

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت

^۴ معاونت مهندسی شرکت سهند گلشن شرق

چکیده

کاهش مصرف سوخت و آلایندگی یکی از مهمترین دغدغه‌های صنایع امروزی می‌باشد. در صنعت خودرو نیز با اندازه سازی درست^۱ قطعات و بهینه سازی آنها سعی می‌شود تا از توان مصرفی مجموعه کاسته شود. یکی از این راهکارها، استفاده از پمپ‌های روغن حجم جابجایی متغیر^۲ است. در طراحی پمپ‌های روغن حجم جابجایی متغیر بر خلاف پمپ‌های روغن حجم جابجایی ثابت^۳ سعی می‌شود تا دبی روغن متناسب با نیاز قطعات مدار روانکاری موتور تأمین و ارسال گردد. همین موضوع باعث کم شدن اتلاف هیدرولیکی پمپ روغن و کاهش مصرف سوخت و آلایندگی موتور می‌شود. پمپ‌های روغن مکانیکی بر اساس فشار روغن ایجاد شده در مدار روانکاری، دبی ورودی به موتور را اصلاح می‌کنند. بدین ترتیب بر اساس مطالعات و کارهای انجام گرفته استفاده از پمپ‌های روغن حجم جابجایی متغیر باعث کاهش ۱.۵ تا ۳ درصدی مصرف سوخت موتور در چرخه رانندگی اروپا^۴ می‌شود. در این تحقیق یک پمپ روغن حجم جابجایی متغیر تیغه‌ای در نرم افزار GT-SUITE® v2020 شبیه‌سازی شده و رفتار آن در شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از صحت‌گذاری مدل توسعه داده شده بر اساس نتایج آزمون تجربی، اثر تغییر برخی از پارامترهای مهم بر روی عملکرد پمپ مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پمپ حجم جابجایی متغیر نسبت به پمپ حجم جابجایی ثابت با حجم جابجایی یکسان و شرایط کاری برابر، می‌تواند تا ۶۲.۵ درصد توان کمتری مصرف کند.

کلیدواژه‌ها: پمپ روغن حجم جابجایی متغیر، کاهش مصرف سوخت، سیستم روانکاری موتور خودرو، شبیه سازی یک بعدی

¹ Right Sizing

² Variable Displacement Oil Pump

³ Conventional Oil Pumps

⁴ New European Driving Cycle (NEDC)



Experimental Investigation and 1D Simulation of a Variable Displacement Oil Pump

Ali Rahmani Moghadam^{1*}, Reza Soltani², Mohammad Sadra Alikhani³, Rahman Vahdati⁴

¹ Expert of Tribology Department, Irankhodro Powertrain Company (IPCO)

² Head of Tribology Department, Irankhodro Powertrain Company (IPCO)

³ MSc Student, Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology

⁴ Deputy of Engineering Department, Sahand Golshan Shargh Company

a_rahmani@ip-co.com

r_soltani@ip-co.com

mo_alikhani@mecheng.iust.ac.ir

rn.vahdati@gmail.com

Abstract

Reducing fuel consumption and emissions is one of the most important concerns in today's industry. In the automotive industry, efforts are also made to reduce the power consumption of the system by right sizing and optimizing components. Variable displacement oil pumps are used to reduce the dissipative power of the lubrication circuit. Unlike fixed displacement oil pumps, variable displacement oil pumps are designed to provide and deliver oil flow rate in accordance with the needs of the engine lubrication circuit components. This reduces hydraulic losses in the oil pump, leading to deration of fuel consumption and engine pollution.

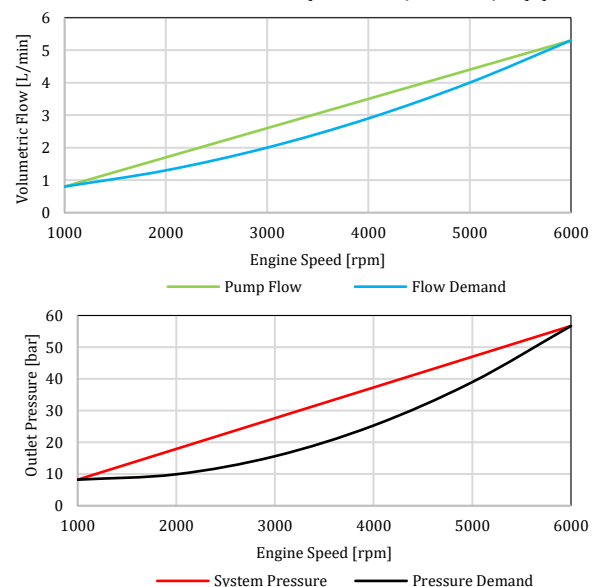
Mechanical oil pumps regulate the lubrication flow rate to the engine by adjusting the displacement in response to oil pressure within the lubrication circuit. Previous studies have demonstrated that the implementation of variable displacement oil pumps can lead to a reduction in engine fuel consumption by approximately 1.5% to 3% during the NEDC cycle. This study presents a comprehensive simulation of a variable displacement vane oil pump using GT-SUITE® v2020 software to investigate its dynamic behavior under various operating conditions. The developed pump model was rigorously validated against experimental test data. Subsequently, a parametric analysis was performed to evaluate the effects of critical design and operational parameters on pump performance. The results indicate that, under identical operating conditions, variable displacement pumps can reduce power consumption by up to 62.5% compared to fixed displacement pumps, demonstrating their significant potential for improving engine efficiency.

Keywords: variable displacement oil pump, fuel consumption reduction, automotive lubrication system, 1D simulation



مقدمه

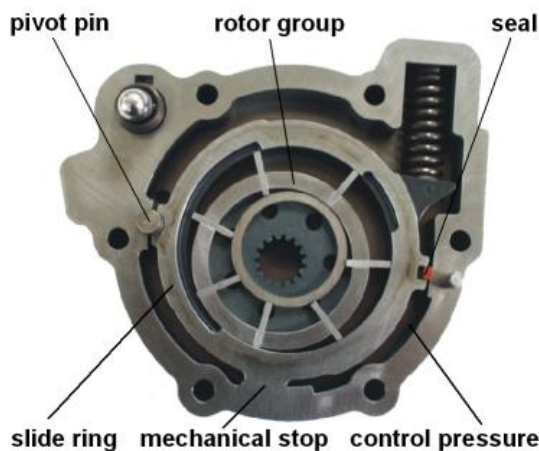
بی شک بحران انرژی و آلودگی محیط زیست از مهمترین بحران‌هایی است که امروزه بشر با آن دست و پنجه نرم می‌کند. موتورهای احتراق داخلی از مهمترین مصرف کننده‌های انرژی و تولید کنندگان آلاینده‌های زیست محیطی هستند. از این رو باید برای بهبود شرایط زندگی بازده موتورهای احتراق داخلی را افزایش داده و مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها را کاهش داد. در جهت توسعه صنعت خودرو و موتورهای احتراق داخلی، علاوه بر توسعه فناوری‌های جدید (به عنوان مثال تزریق مستقیم سوخت^۱ یا پرخورانی هوا^۲)، بهینه‌سازی اجزای موجود اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. یکی از سیستم‌های داخلی موتور که خود بخشی از انرژی تولید شده را مصرف می‌کند، پمپ روغن است که بخشی حیاتی در سیستم روانکاری موتور به حساب می‌آید و تا ۳ درصد از توان اتلافی موتور را به خود اختصاص می‌دهد [1-6]. پمپ روغن دارای سه عملکرد است: ۱- روانکاری: در تمام نقاط مربوط به یاتاقان‌ها باید همواره یک لایه نازک از روغن برقرار باشد تا از برخورد فلز با فلز جلوگیری شود. مخصوصاً در یاتاقان‌های مربوط به میل‌لنگ و میل‌بادامک‌ها. ۲- خنک‌کاری: از عواملی که باعث دفع حرارت موتور و حرارت ناشی از اصطکاک در یاتاقان‌ها می‌شود، گردش روغن است. ۳- کنترل عملکرد: برای کارکرد سیستم‌های هیدرولیکی موجود در موتور مانند زمانبندی متغیر دریچه^۳، از سیال روغن استفاده می‌شود. در مجموع، وظیفه اصلی پمپ روغن تأمین فشار روغن مورد نیاز^۴ موتور برای عملکرد عادی خود است [5].



شکل ۱: مقایسه فشار و دبی یک پمپ روغن حجم جابجایی ثابت با فشار و دبی مورد نیاز موتور برحسب سرعت موتور

با توجه به شکل ۱، این اختلاف در فشار درخواستی موتور و فشار تولیدی پمپ حجم جابجایی ثابت، طراحان را مجبور به استفاده از شیر فشارشکن^۵ می‌کند که در این حالت، بخشی از انرژی موتور تلف می‌شود. با جایگزین کردن این پمپ‌ها با پمپ‌های حجم جابجایی متغیر به میزان دبی مورد نیاز موتور، فشار لازم ایجاد می‌شود. بنابراین میزان اتلاف انرژی کاهش پیدا کرده و در نتیجه مصرف سوخت و آلاینده‌های موتور کاهش می‌یابد [3,4,5]. پمپ‌های روغن حجم جابجایی متغیر به دو شکل طراحی و تولید می‌شوند: ۱- لغزنده‌ای^۶، ۲- لولایی^۷ که پمپ مورد بحث و شبیه‌سازی در این تحقیق، همانند پمپ نشان داده شده در شکل ۲ از نوع تیغه‌ای لولایی است.

در این نوع پمپ‌ها با افزایش سرعت روتور فشار خروجی پمپ افزایش می‌یابد و از طریق مدار بازخوردی که در پمپ تعبیه شده است فشار خروجی به پشت استاتور وارد می‌شود. در صورت غلبه گشتاور حاصل از فشار روغن در محفظه کنترل فشار بر گشتاور حاصل از نیروی فنر حول لولای استاتور، ناهم مرکزی روتور و استاتور کم شده و در نتیجه نرخ افزایش فشار و نیز دبی خروجی پمپ کاهش می‌یابد. این ویژگی در پمپ‌های حجم جابجایی متغیر به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کند و فشار روغن را در شرایط کاری مختلف موتور بهینه نگه می‌دارد.



شکل ۲: پمپ روغن حجم جابجایی متغیر تیغه‌ای لولایی

روش تحقیق

به منظور شبیه‌سازی پمپ حجم جابجایی متغیر مورد نظر از نرم افزار یک بعدی GT-SUITE استفاده شده است. مدل سه بعدی پمپ در مازول GEM3D این نرم افزار که شامل روتور، استاتور، لولای^۸، تیغه‌ها، پورت ورودی، پورت خروجی و فنر پمپ است، بارگذاری شده و پس از آماده سازی مدل سه بعدی (شکل ۳)، خروجی این بخش وارد بخش

⁵ Pressure Relief Valve

⁶ Sliding Type

⁷ Pivoting Type

⁸ Pivot

¹ GDI

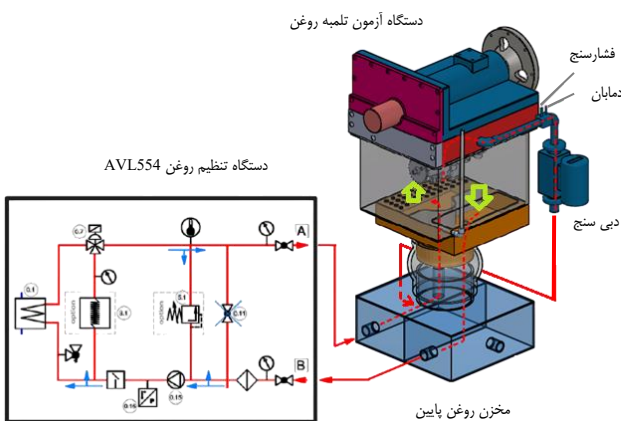
² Air Charging

³ CVVT (Continuous Variable Valve Timing)

⁴ Demand Pressure

در هر مرحله با حفظ دمای روغن توسط دستگاه تنظیم روغن AVL554 در هر سرعت ثابت، دریچه از بازترین حالت، شروع به بسته شدن می‌کند و بدین شکل فشار خروجی افزایش می‌یابد. همزمان پارامترهایی از قبیل فشار و دبی خروجی پمپ و گشتاور مصرفی پمپ اندازه گیری می‌شوند و بر این اساس توان مصرفی، راندمان حجمی، راندمان مکانیکی و راندمان کل محاسبه می‌گردند. تجهیزات مورد استفاده در این آزمون به همراه دقت هر کدام به شرح زیر است:

- ❖ فشارسنج: با بازه اندازه گیری ۰ تا ۱۰ بار و با دقت ۰.۱ بار
- ❖ دبی سنج روغن: با بازه اندازه گیری ۰ تا ۵۰ لیتر بر دقیقه و با دقت ۰.۱ لیتر بر دقیقه
- ❖ دما سنج: با بازه اندازه گیری ۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد و با دقت ۰.۵ درجه سانتی گراد
- ❖ گشتاور سنج: با بازه اندازه گیری ۰ تا ۱۰۰ نیوتن متر و با دقت ۰.۰۵ نیوتن متر
- ❖ سرعت سنج: با بازه اندازه گیری ۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه و با دقت ۱۰ دور بر دقیقه



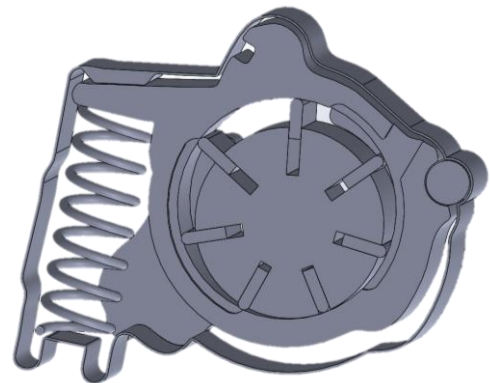
شکل ۵: شکل نمادین اتاق آزمون [9]

در نهایت پس از کالیبره کردن مدل نرم افزاری، نتایج بدست آمده از شبیه سازی و آزمون تجربی با هم مقایسه می‌شوند. این مقایسه با دو متغیر دبی خروجی و توان مصرفی پمپ روغن صورت می‌گیرد.

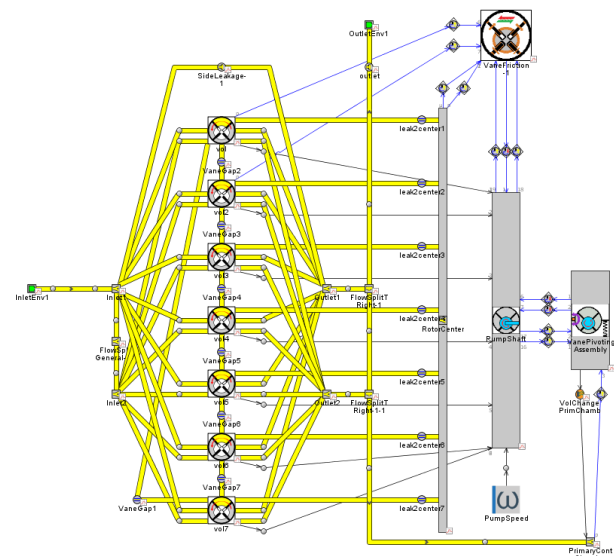
صحه گذاری نتایج شبیه سازی با آزمون

نمودارهای شکل ۶ و ۷ نشان می‌دهند که نتایج بدست آمده از شبیه سازی تا فشار خروجی پمپ ۶ بار مطلق، تطابق خوبی با نتایج آزمون تجربی دارند. در فشارهای بالاتر به دلیل محدودیت‌های شبیه سازی این اختلاف افزایش پیدا می‌کند و بیشینه این اختلاف در سرعت ۶۰۰۰ د.د.د برابر با ۷ لیتر در دقیقه در دبی خروجی و ۱۱۰ وات در توان مصرفی پمپ می‌باشد.

GT-ISE نرم افزار می‌شود (شکل ۴). در این بخش مدل یک بعدی پمپ اصلاح و تکمیل شده و حالت‌های مورد نظر جهت بررسی آماده تحلیل می‌شوند. این تحلیل‌ها برای روغن با ترکیبی از سیال مایع و گاز صورت گرفته است. نوع روغن 10W40 با دمای کاری ۹۰ درجه سانتیگراد و سیال گازی نیز هوا در نظر گرفته شده است. سپس با تعیین پارامتر ضریب بونزن^۱ برابر با ۰.۰۸، تنها ۸ درصد از گاز با مایع ترکیب می‌شود. بدین ترتیب پدیده هوازدگی روغن نیز در پمپ روغن درون نرم‌افزار مدل می‌شود. عملکرد هوای مخلوط در روغن، مانند یک دمپر است که نوسانات ناگهانی را کاهش می‌دهد.



شکل ۳: مدل سه بعدی پمپ روغن حجم جابجایی متغیر



شکل ۴: مدل پمپ روغن حجم جابجایی متغیر در محیط GT-ISE

پس از تکمیل مدل، اصلاحات نهایی روی آن بر اساس نتایج بدست آمده از آزمون تجربی انجام می‌گیرد. آزمون تجربی بر روی پمپ مذکور، در ۴ مرحله در سرعت‌های ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ د.د.د انجام شده است. بر اساس شکل نمادینی که از اتاق آزمون در شکل ۵ مشاهده می‌شود در این آزمون، یک دریچه در خروجی پمپ قرار گرفته و درصد باز و بسته بودن آن، میزان فشار مقاوم را نشان می‌دهد.

¹ Bunsen Coefficient



جدول ۲: مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی دبی خروجی پمپ در

سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه، دمای ۹۰°C و روغن 10W40

درصد خطا	دبی خروجی در شبیه سازی [لیتر بر دقیقه]	دبی خروجی در آزمون تجربی [لیتر بر دقیقه]	فشار مطلق خروجی پمپ [بار]
-0.9	19.83	20	1.19
-1.7	18.87	19.2	2.54
1	17.86	17.7	5.25
0.4	17.06	17.0	6.03
-3.8	15.49	16.1	6.18
-3.4	10.72	11.1	6.56
-6	6.79	7.22	6.82

جدول ۳: مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی دبی خروجی پمپ در

سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه، دمای ۹۰°C و روغن 10W40

درصد خطا	دبی خروجی در شبیه سازی [لیتر بر دقیقه]	دبی خروجی در آزمون تجربی [لیتر بر دقیقه]	فشار مطلق خروجی پمپ [بار]
0.1	39.73	39.7	1.66
0.8	38.30	38.0	4.70
-1.1	37.30	37.7	5.18
-0.6	37.08	37.3	5.52
-4.4	32.41	33.9	5.88
-6.5	29.67	31.7	6.04
-25.3	15.17	20.3	6.79
-29.6	6.84	9.7	7.27
-6.6	2.31	2.5	7.58
-5.9	1.30	1.4	7.65

جدول ۴: مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی دبی خروجی پمپ در

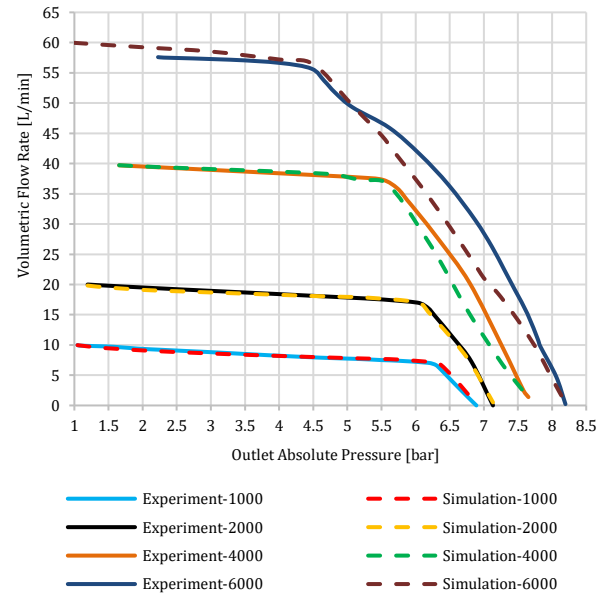
سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه، دمای ۹۰°C و روغن 10W40

درصد خطا	دبی خروجی در شبیه سازی [لیتر بر دقیقه]	دبی خروجی در آزمون تجربی [لیتر بر دقیقه]	فشار مطلق خروجی پمپ [بار]
2.8	59.23	57.5	2.31
2.4	58.53	57.2	3.29
2.6	50.56	53.7	4.66
-2.6	44.69	49.3	5.08
-9.7	37.42	41.5	6.07
-25.6	22.80	26.2	7.12
-17.3	15.66	15.1	7.64
-18	12.41	10.9	7.79
-19.1	8.82	9.7	7.83
-7.5	4.44	4.8	8.06
54.4	0.34	0.2	8.20

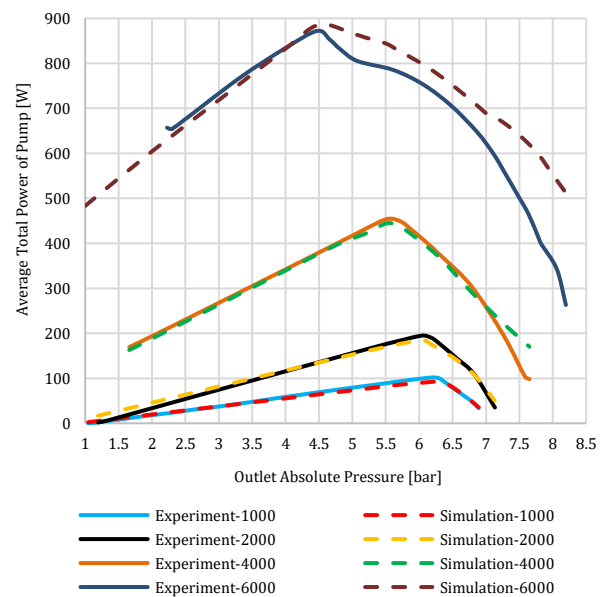
جدول ۵: مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی توان مصرفی پمپ در

سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه، دمای ۹۰°C و روغن 10W40

درصد خطا	توان مصرفی پمپ در شبیه سازی [وات]	توان مصرفی پمپ در آزمون تجربی [وات]	فشار مطلق خروجی پمپ [بار]
49.5	7.9	5	1.35
22.3	12.1	10	1.58
8.6	18.4	17	1.93
6.4	24.5	23	2.27
1.1	31.3	31	2.65
-0.1	41	41	3.19
-5.0	52.8	56	3.85
-6.9	66.3	71	4.61
-7.6	75.6	82	5.13
6.1	35.5	34	6.89



شکل ۶: منحنی دبی خروجی پمپ برحسب فشار خروجی آن در سرعت‌های مختلف، دمای ۹۰°C و روغن 10W40



شکل ۷: منحنی توان مصرفی پمپ برحسب فشار خروجی آن در سرعت‌های مختلف، دمای ۹۰°C و روغن 10W40

جدول ۱: مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی دبی خروجی پمپ در

سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه، دمای ۹۰°C و روغن 10W40

درصد خطا	دبی خروجی در شبیه سازی [لیتر بر دقیقه]	دبی خروجی در آزمون تجربی [لیتر بر دقیقه]	فشار مطلق خروجی پمپ [بار]
-0.3	9.97	10	1.05
-2.7	9.14	9.4	1.93
-2.8	8.95	9.2	2.27
-0.7	8.25	8.3	3.85
0.9	7.97	7.9	4.61
1.2	7.80	7.7	5.13
2.4	7.22	7.1	6.18
13.4	6.69	5.9	6.37
21.7	4.74	3.9	6.55
36.5	1.91	1.4	6.76

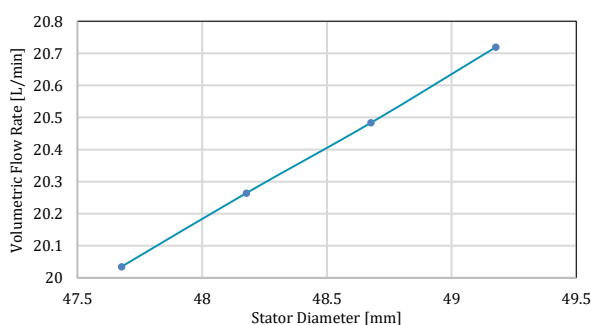


حساسیت سنجی پارامترهای مهم

استفاده از قابلیت حساسیت سنجی^۱ پارامترهای یکی از روش‌های مؤثر در ساده سازی مدل‌های عددی است. در مدل‌هایی که برای شبیه سازی عددی قطعاتی مثل پمپ روغن ساخته می‌شود، تعداد زیادی متغیر وجود دارد که لزوماً همه این متغیرها تأثیر یکسانی در خروجی مدل ندارند. لذا می‌توان با استفاده از روش‌های حساسیت سنجی، متغیرهای کم اهمیت را شناسایی کرد و آن‌ها را در مقادیر اسمی ثابت نگه داشت و مدلسازی‌ها و پیش‌بینی‌ها را بر مبنای متغیرهای حساس‌تر انجام داد تا در زمان و هزینه صرفه‌جویی شود. اهداف متعددی از حساسیت سنجی دنبال می‌شود که می‌توان به درک مدل، ساده‌سازی مدل و اولویت‌بندی پارامترها اشاره کرد. فرآیند بررسی و تأیید کدهای کامپیوتری نیز یکی از اهداف اصلی آنالیز حساسیت است [7]. با حساسیت سنجی می‌توان تشخیص داد که عدم قطعیت در نتایج بدست آمده از یک مدلسازی تا چه اندازه از هر یک از منابع مختلف عدم قطعیت در ورودی‌های مدل ناشی می‌شود [8].

الف - حساسیت سنجی قطر روتور، قطر استاتور و میزان ناهم مرکزی آن‌ها در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار مقاوم خروجی ۲ بار مطلق

اولین پارامتر حجم محفظه پمپ است که به سه پارامتر قطر روتور، قطر استاتور و میزان ناهم مرکزی آن‌ها وابسته است. این پمپ از نوع جابجایی مثبت است. یعنی بدون در نظر گرفتن فشار، به ازای هر دور چرخش محور پمپ، مقدار مشخصی از سیال از پمپ خارج خواهد شد. پس انتظار می‌رود که تغییر این پارامترها به شکل مستقیم بر روی دبی حجمی پمپ اثر بگذارند. کاهش قطر روتور، افزایش قطر استاتور و کاهش ناهم‌مرکزی آن‌ها موجب افزایش دبی حجمی می‌شود که نمونه این رفتار در شکل ۸ قابل مشاهده است [10].



شکل ۸: تغییر دبی حجمی پمپ برحسب قطر استاتور در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۲ بار مطلق

پارامتر بعدی دمای کاری روغن است. تغییر دمای روغن از این جهت اهمیت دارد که موجب تغییر یکی از کلیدی‌ترین پارامترهای روغن

جدول ۶: مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی توان مصرفی پمپ در سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه، دمای ۹۰°C و روغن 10W40

درصد خطا	توان مصرفی پمپ در شبیه سازی [وات]	توان مصرفی پمپ در آزمون تجربی [وات]	فشار مطلق خروجی پمپ [بار]
17.3	65.2	56	2.54
-2.7	161.7	166	5.25
-5.1	184.8	195	6.03
-2.8	141	145	6.56
-1.2	108.3	110	6.82
44.4	50.6	35	7.13

جدول ۷: مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی توان مصرفی پمپ در سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه، دمای ۹۰°C و روغن 10W40

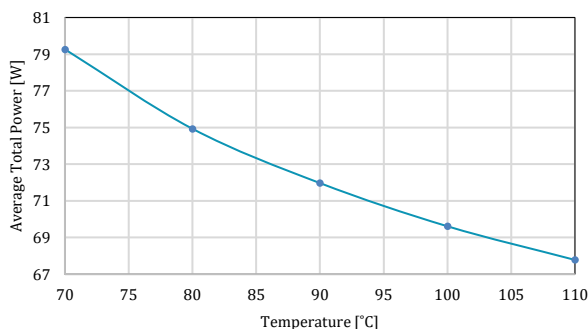
درصد خطا	توان مصرفی پمپ در شبیه سازی [وات]	توان مصرفی پمپ در آزمون تجربی [وات]	فشار مطلق خروجی پمپ [بار]
-4.0	162.7	169	1.66
-2.5	203.1	208	2.20
-0.7	391.8	395	4.70
-2.4	420.5	431	5.18
-2.1	444.6	454	5.52
-2.8	435.5	448	5.73
-2.4	420.3	431	5.88
-2.3	401.6	411	6.04
13.8	220.5	194	7.27
71.7	180	105	7.58

جدول ۸: مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی توان مصرفی پمپ در سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه، دمای ۹۰°C و روغن 10W40

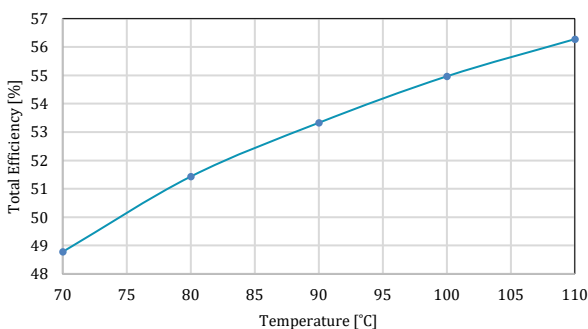
درصد خطا	توان مصرفی پمپ در شبیه سازی [وات]	توان مصرفی پمپ در آزمون تجربی [وات]	فشار مطلق خروجی پمپ [بار]
-8.0	604.3	657	2.31
-6.0	718.2	765	3.29
-0.3	832.6	835	4.01
1.6	885.6	872	4.47
7.6	866.4	853	4.66
5.4	827.6	831	5.08
6.7	802.7	805	6.07
6.6	751.3	785	6.87
35.0	652.8	597	7.79
45.1	626.6	553	7.83
61.1	595	510	8.06

در فشارهای خروجی زیاد به دلیل ورود ناخواسته حبابهای هوا، جریان روغن متلاطم و آشفتگی می‌گردد. لذا دبی سنج و گشتاور سنج دستگاه دچار خطای اندازه‌گیری می‌شوند. این پدیده با افزایش سرعت تشدید می‌شود. به همین دلیل کنترل سرعت در سرعت‌های زیاد (مخصوصاً ۶۰۰۰ د.د.د) نیز دشوارتر می‌گردد. بنابراین طبق آنچه در جداول ۱ تا ۸ مشاهده می‌شود در هر سرعت با افزایش فشار خروجی پمپ اختلاف بین دبی و توان مصرفی شبیه سازی و آزمون تجربی بیشتر می‌شود. از طرف دیگر در شبیه سازی برخی از ضرایب محاسباتی مانند ضریب بونزن و ضرایب مربوط به انحلال حباب هوا در روغن و یا جدا شدن از آن از دیگر دلایل مهم اختلاف بین نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی می‌باشند که این ضرایب براساس آزمون تجربی بدست می‌آیند.

¹ Sensitivity Analysis



شکل ۱۲: تغییر توان مصرفی کل پمپ برحسب دمای کاری روغن در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۲ بار مطلق



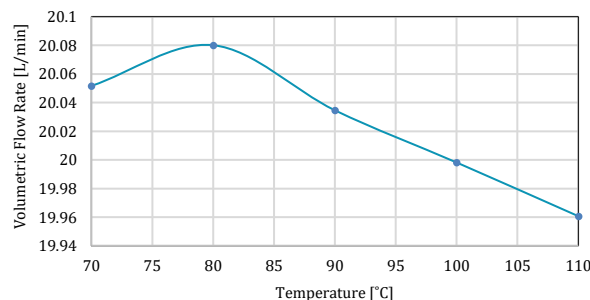
شکل ۱۳: تغییر راندمان کل پمپ برحسب دمای کاری روغن در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۲ بار مطلق

ب- حساسیت سنجی سختی فنر و فشردگی اولیه آن در فشار خروجی ۶.۲۵ بار مطلق

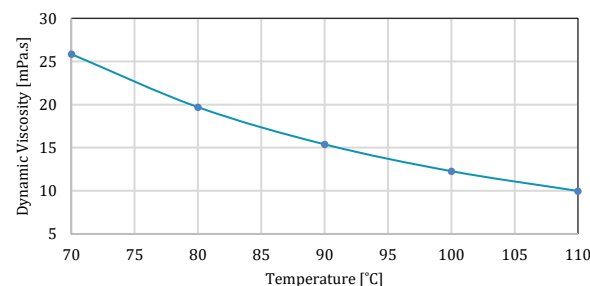
از دیگر پارامترهای مهم طراحی پمپ، ویژگی‌های فیزیکی فنر است؛ از جمله سختی فنر و نیروی فشردگی در حالت اولیه. تغییر نیروی فشردگی اولیه و سختی فنر، باعث می‌شود محل شکست و شیب منحنی‌های مشخصه پمپ تغییر کند. یعنی روغن در فشاری متفاوت و با سرعتی متفاوت بتواند شروع به دوران مجموعه استاتور حول محور چرخش خود بکند و در نتیجه ناهم‌مرکزی پمپ را تغییر دهد. در خصوص نمودارهای این بخش باید به این نکته توجه نمود که تأثیر تغییرات مشخصات فنر در فشارهای بالاتر از ۲ بار مطلق نمایان می‌شود. زیرا در فشارهای بالا است که سیستم بر گشتاور حاصل از نیروی فنر غلبه کرده و شروع به فشردن آن می‌کند. بنابراین در اینجا برای اینکه تأثیر تغییر مشخصات فنر بر روی نتایج نمایان شده و ملموس گردد، فشار مقاوم بجای ۲ بار به ۶.۲۵ بار تغییر پیدا کرده است.

نتایج بدست آمده در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان می‌دهند که افزایش سختی فنر سبب می‌شود تا گشتاور لازم برای جابجایی استاتور حول لولای خود افزایش یابد. بنابراین این چرخش در فشارهای بالاتری رخ خواهد داد. بدین ترتیب در یک فشار خروجی ثابت با افزایش سختی فنر میزان ناهم‌مرکزی روتور و استاتور و در نتیجه دبی خروجی پمپ

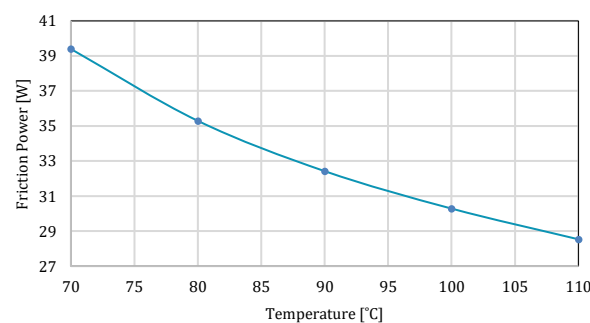
یعنی گرانیروی^۱ می‌شود. تغییر گرانیروی روغن در بسیاری از جنبه‌های کارکرد سیستم موثر است. از جمله گشتاور مقاوم سیال، فشار، نشتی‌ها و غیره. از نمودارهای شکل ۹ تا ۱۳ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دمای روغن و کاهش گرانیروی، توان اتلافی پمپ کاهش پیدا کرده و راندمان آن افزایش می‌یابد. با این حال دبی خروجی پمپ به دلیل افزایش نشتی‌ها کاهش پیدا می‌کند [10].



شکل ۹: تغییر دبی حجمی پمپ برحسب دمای کاری روغن در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۲ بار مطلق



شکل ۱۰: تغییر گرانیروی روغن برحسب دمای کاری روغن در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۲ بار مطلق

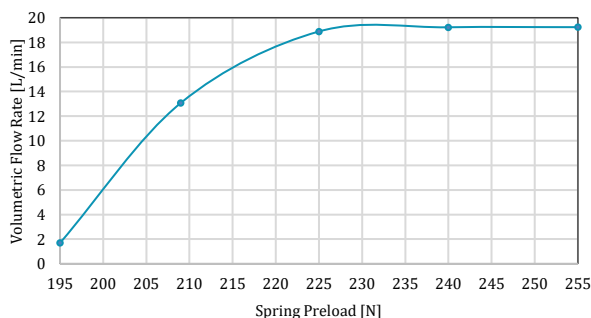


شکل ۱۱: تغییر توان کل اصطکاکی بر حسب دمای کاری روغن در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۲ بار مطلق

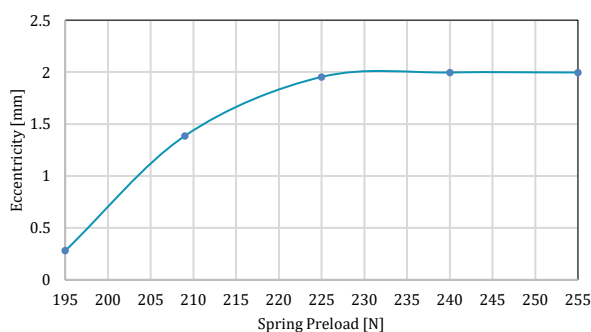
¹ Viscosity



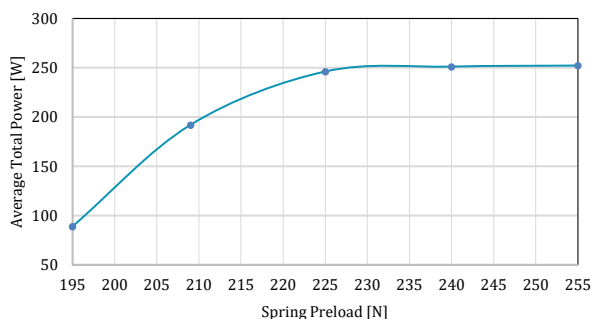
این حال در نیروهای کمتر از ۲۲۵ نیوتن رفتاری مشابه با آنچه در افزایش سختی فنر ارائه شد، از خود نشان می‌دهد [10].



شکل ۱۷: تغییر دبی حجمی برحسب نیروی فشردگی اولیه فنر در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۶.۲۵ بار مطلق

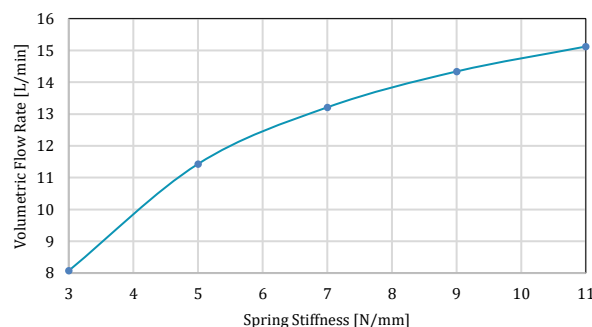


شکل ۱۸: تغییر ناهم‌مرکزی برحسب نیروی فشردگی اولیه فنر در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۶.۲۵ بار مطلق

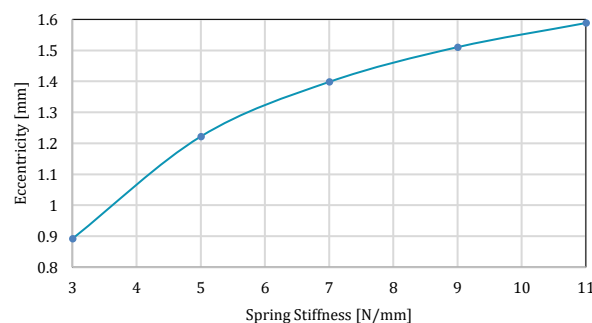


شکل ۱۹: تغییر توان مصرفی کل پمپ برحسب نیروی فشردگی اولیه فنر در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۶.۲۵ بار مطلق

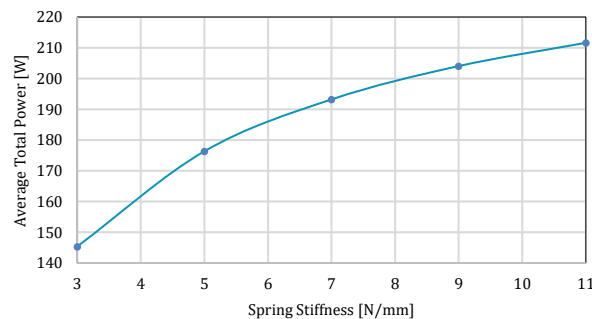
افزایش پیدا می‌کند که در پی آن باعث افزایش توان مصرفی پمپ نیز می‌شود [10].



شکل ۱۴: تغییر دبی حجمی برحسب سختی فنر در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۶.۲۵ بار مطلق



شکل ۱۵: تغییر ناهم‌مرکزی برحسب سختی فنر در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۶.۲۵ بار مطلق



شکل ۱۶: تغییر توان مصرفی کل پمپ برحسب سختی فنر در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د و فشار ۶.۲۵ بار مطلق

مقایسه پمپ حجم جابجایی متغیر با پمپ حجم جابجایی ثابت در شرایط برابر

در پمپ‌های با حجم جابجایی ثابت فشار ایجاد شده توسط پمپ^۱ به شکل خطی با سرعت موتور افزایش پیدا می‌کند. درحالی که فشار مورد نیاز روغن برای موتور، رفتار خطی ندارد. بنابراین طبق شکل ۲۰ می‌توان دریافت که توان مصرفی پمپ‌های حجم جابجایی ثابت روند صعودی خواهند داشت. اما در طراحی پمپ‌های حجم جابجایی متغیر

طبق شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ که نتایج حاصل از افزایش نیروی فشردگی اولیه فنر را نشان می‌دهند، در نیروهای بالای ۲۲۵ نیوتن رفتار پمپ ثابت خواهد بود. این بدین دلیل است که گشتاور حاصل از این افزایش نیرو از این نقطه به بعد بیش از گشتاور حاصل از نیروی فشار روغن درون محفظه کنترل پمپ حول لولا است و فشار روغن توانایی غلبه بر این گشتاور را نخواهد داشت. در نتیجه شرایط عملکردی پمپ در نیروهای فشردگی بالای ۲۲۵ نیوتن یکسان خواهد بود و پمپ مانند یک پمپ حجم جابجایی ثابت بدون شیر فشار شکن عمل می‌کند. با

¹ Delivered Pressure



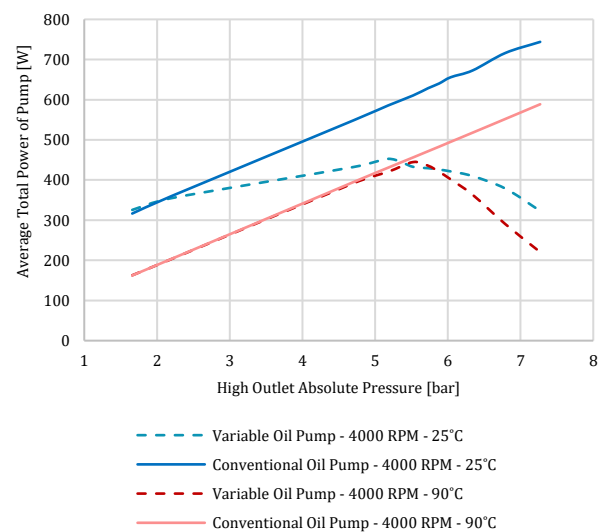
آلایندگی و استهلاک قطعات حاصل می‌شود. این کاهش توان مصرفی در نتایج حل عددی در قسمت نمودارهای توان پمپ قابل مشاهده و بررسی است.

مراجع و منابع

- [1] M. Rundo and R. Squarcini, "Hydraulic-mechanical coupled simulation of 2D micromotion in variable displacement vane pumps for engine lubrication," in *Proc. Int. Design Engineering Technical Conf. and Computers and Information in Engineering Conf.*, vol. 88346, Aug. 2024, p. V02AT02A002, ASME.
- [2] F. Fatigati, G. Di Giovine, and R. Cipollone, "Model-based optimization of a sliding vane rotary pump for micro-organic Rankine cycle," *Energies*, vol. 18, no. 1, p. 97, 2024.
- [3] W. Zhang, B. Wang, Y. Zhang, L. Peng, M. Liu, and Y. Lv, "Research on modelling and simulation of a new variable displacement oil pump," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 13, pp. 350–354, 2019.
- [4] C. Rengaraj and A. V. K. PS, "Investigation of variable displacement oil pump and its influence on fuel economy for a 1.5 L, 3 cylinder diesel engine," *SAE Technical Paper 2023-01-0465*, 2023.
- [5] R. R. Khatri, Y. Liu, S. S. Pasunurthi, R. Ahmed, J. Stallmann, B. Yang, ... and D. Scheffler, "A 3-D CFD performance simulation of a feedback controlled variable displacement vane pump," *SAE Technical Paper 2025-01-8179*, 2025.
- [6] H. Schulz-Andres and D. Kamarys, "Temperature-controlled lubricating oil pumps save fuel," in *Proc. 7th LuK Symposium*, 2002.
- [7] B. Iooss and P. Lemaître, "A review on global sensitivity analysis methods," in *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications*, pp. 101–122, 2015.
- [8] A. Saltelli, "Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 145, no. 2, pp. 280–297, 2002.
- [9] رحمان وحدتی، طراحی و ساخت دستگاه آزمون استخراج منحنی‌های عملکردی تلمبه روغن شار متغیر و شار ثابت، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علمی کاربردی ایران خودرو، اردی بهشت ماه ۱۳۹۷
- [۱۰] محمد صدرا علی خانی، شبیه سازی پمپ روغن دبی متغیر، پایان نامه کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، آذر ماه ۱۴۰۲

سعی بر این است که دبی و فشار به اندازه مورد نیاز موتور تولید شود. بنابراین توان مصرفی این پمپ‌ها کمتر از پمپ‌های حجم جابجایی ثابت خواهد بود.

بر اساس دبی حاصل از فشار خروجی پمپ‌ها مشاهده می‌شود که توان مصرفی پمپ حجم جابجایی متغیر نسبت به پمپ حجم جابجایی ثابت با حجم جابجایی یکسان، در سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه و دماهای روغن ۲۵ و ۹۰ درجه سانتیگراد به ترتیب تا ۵۶۶ و ۶۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان دریافت که استفاده از پمپ حجم جابجایی متغیر می‌تواند تأثیر چشمگیری در کاهش توان مصرفی پمپ روغن و در پی آن، کاهش مصرف سوخت و آلایندگی داشته باشد.



شکل ۲۰: مقایسه منحنی توان مصرفی پمپ روغن حجم جابجایی ثابت و پمپ روغن حجم جابجایی متغیر موتور در شرایط یکسان (در سرعت ۴۰۰۰ د.د.د و دماهای ۲۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد)

نتیجه‌گیری

به طور کلی پمپ‌های حجم جابجایی متغیر متولد شده‌اند تا از اتلاف توان موتور جلوگیری کنند. پمپ‌های حجم جابجایی متغیر رفتاری خاص و متفاوت از پمپ‌های حجم جابجایی ثابت مرسوم (حجم جابجایی ثابت) دارند. این رفتار با افت دبی در انتهای منحنی‌های مشخصه نمایش داده می‌شود. اتفاقی که در نتایج شبیه‌سازی انجام شده نیز قابل مشاهده است. از اهداف اصلی استفاده از پمپ‌های حجم جابجایی متغیر در موتور خودروها، کاهش توان مصرفی کلی سیستم روانکاری است که در نتیجه این پدیده، کاهش مصرف سوخت،