

تحلیل عددی و تجربی افت فشار روغن و نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه‌ی هیدرولیکی

منصور صادقی سلیمی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دزفول، ایران،
msadeghi1414@yahoo.com

پژمان نیک‌اندیش*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دزفول، ایران، nikandish@jsu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، تأثیر شیب محور و نسبت قطر سطوح مؤثر اسپول، بر افت فشار روغن و نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ‌های دوراهه‌ی هیدرولیکی به روش‌های عددی و تجربی، مطالعه گردید. بررسی‌ها نشان داد که متوسط اختلاف میان نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی کمیت‌های وابسته، با نتایج عددی، کمتر از ۶ درصد است. در ضمن، ایجاد شیب‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه بر روی محور اسپول، کاهش ۳۱/۵، ۲۹/۳ و ۲۵/۶ درصدی افت فشار روغن و همچنین، کاهش ۲۶/۱، ۲۳/۲ و ۲۰/۷ درصدی نیروی وارد بر اسپول را به همراه دارند. این در حالی است که با افزایش نسبت قطر برآمدگی اسپول به قطر محور آن از ۰/۶ به ۰/۸، افت فشار و نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ، به ترتیب، ۱۴ و ۱۰/۸ درصد افزایش می‌یابند. با کاهش نسبت قطر برآمدگی اسپول به قطر محور آن از ۰/۶ به ۰/۴، تغییر قابل توجهی در روند تغییرات افت فشار روغن و نیروی محوری وارد بر اسپول ایجاد نمی‌گردد. **واژه‌های کلیدی:** سوپاپ هیدرولیکی، افت فشار، تحلیل عددی، سامانه‌های هیدرولیکی، نسبت قطر، دو راهه.

Numerical and Experimental Analysis of Oil Pressure Loss and Flow Force required to Change the state of a Hydraulic Two-Way Valve

M. Sadeghi Salimi

Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

P. Nikandish

Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Abstract

This article studied the influence of the slope axis spool and diameter ratio of the effective spool surfaces on the oil pressure drop and the flow force of a two-way control valve by numerical and experimental methods. Investigations showed that the average difference between the results obtained from the experimental measurements of dependent quantities with numerical results is less than 6%. According to the simulation results, with slopes of 15, 20, and 25 degrees on the spool axis, the oil pressure loss dropped by 31.5, 29.3, and 25.6%, respectively, and the axial force on the spool was reduced by 26.1, 23.2 and 20.7%, respectively. Also, by increasing the ratio of the spool shank diameter to its axis diameter from 0.6 to 0.8, the pressure loss and the force required to move the spool increase by 14 and 10.8%, respectively. Meanwhile, by reducing the ratio of the spool shank diameter to its axis diameter from 0.6 to 0.4, there is no significant change in the pressure loss and the axial force on the spool.

Keywords: Hydraulic Valve, Pressure Loss, Numerical Analysis, Hydraulic Systems, Diameter Ratio, Two-Way

۱- مقدمه

در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، از سوپاپ‌های کنترل جهت، به‌طور گسترده‌ای، برای تغییر مسیر حرکت جزء متحرک عملگرهای هیدرولیکی و همچنین، تنظیم حجم روغن ارسالی به مجرای ورودی آنها، استفاده می‌شود [۱ و ۲]. بدین‌ترتیب، سوپاپ‌های کنترل جهت تناسبی، علاوه بر تغییر جهت حرکت جزء متحرک عملگرهای هیدرولیکی، امکان تغییر سرعت آنها را نیز فراهم می‌کنند [۳ و ۴]. در سال‌های اخیر، تغییر جهت و سرعت حرکت جزء متحرک عملگرهای هیدرولیکی، با رویکرد کاهش مصرف انرژی و همچنین، بهبود و اصلاح مشخصه‌های دینامیکی سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران بوده است [۵ و ۶]. از این رو، اصلاح و تغییر ساختار درونی سوپاپ‌های کنترل جهت، به‌منظور عملکرد بهینه در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، ضرورت

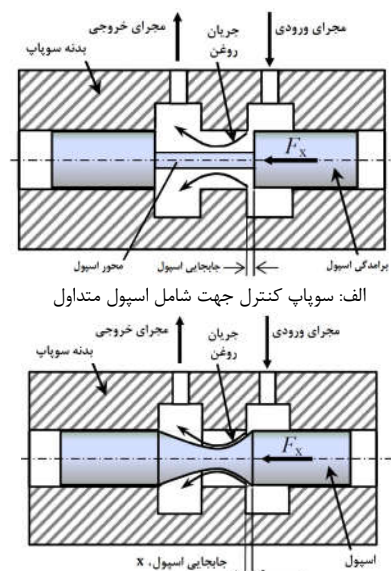
می‌یابد [۷]. در ساختار داخلی سوپاپ‌های کنترل جهت هیدرولیکی، از اجزای متحرکی به شکل پاپت، اسپول یا ترکیبی از آنها، استفاده می‌شود [۸]. در شکل ۱، ساختار درونی سوپاپ کنترل جهت هیدرولیکی دو راهه شامل اسپول (سوپاپ دو راهه) نشان داده شده است. مطابق شکل ۱، با جابجایی اسپول در راستای x (جابجایی جزء متحرک در برابر پوسته‌ی ثابت)، امکان ارتباط یا قطع ارتباط مجاری سوپاپ دو راهه، از طریق روزنه‌ای با سطح مقطع متغیر، فراهم می‌گردد. بدین‌ترتیب، متناسب با جابجایی جزء متحرک سوپاپ دو راهه (اسپول) و تغییر سطح مقطع روزنه، دبی روغن عبوری از سوپاپ هیدرولیکی تغییر می‌کند. اسپول به کار رفته در ساختار سوپاپ دو راهه، شامل دو برآمدگی بوده که از طریق یک محور، تحت عنوان محور اسپول، به هم متصل می‌شوند [۳ و ۶]. دبی روغن عبوری از سوپاپ هیدرولیکی دو راهه، علاوه بر سطح مقطع روزنه، به متغیرهای دیگری شامل ضریب تخلیه، جرم مخصوص روغن، اختلاف فشار روغن در

* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: nikandish@jsu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۷۰/۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۷۱/۱/۱۵

مجاری ورودی و خروجی، شکل و هندسه‌ی روزنه، وابسته است [۹]. سوپاپ‌های کنترل جهت شامل پاپت، نسبت به نمونه‌های دارای اسپول، درزبندی کاملی را بین مجاری ورودی و خروجی ایجاد می‌کنند و حساسیت کمتری به آلودگی روغن دارند [۷]. این در حالی است که سوپاپ‌های کنترل جهت شامل اسپول، نسبت به نمونه‌های دارای پاپت، به دلیل پاسخ دینامیکی مطلوب، استهلاک اندک، نیاز به نیروی محوری کمتر برای تغییر وضعیت، امکان کنترل دقیق کمیت‌های هیدرولیکی و در نهایت، افت فشار کمتر، کاربرد بیشتری در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی دارند [۱۰]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افت فشار و دبی روغن عبوری از روزنه‌ی ایجاد شده در ساختار درونی سوپاپ و همچنین، نیروی لازم برای جابجایی اسپول، از مهمترین کمیت‌های لازم، برای طراحی و انتخاب سوپاپ‌های کنترل جهت به شمار می‌آیند [۱۱]. در سوپاپ‌های کنترل جهت، جابجایی اسپول و دقت قرارگیری آن در یک موقعیت مشخص، به طور قابل توجهی، تحت تأثیر نیروی ناشی از جریان روغن عبوری از سوپاپ قرار دارد [۱۲].



شکل ۱- ساختار درونی سوپاپ کنترل جهت دو راهه شامل اسپول

در سال‌های اخیر، اصلاح اسپول‌های به کار رفته در ساختار درونی سوپاپ‌های کنترل جهت، امکان هدایت و عبور جریان بالای روغن را در کمینه افت فشار و همچنین، کمینه نیروی لازم برای تغییر وضعیت، فراهم کرده است. به همین ترتیب، پژوهش‌های متنوعی در خصوص ویژگی‌ها و مشخصه‌های عملکردی سوپاپ‌های کنترل جهت، به روش‌های عددی و تجربی انجام شده است. بورقی و همکاران [۱۳]، تأثیر شکل شیرهای روی برآمدگی اسپول را بر مشخصه‌ی جریان روغن عبوری از سوپاپ‌های کنترل جهت مطالعه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که دبی روغن عبوری از سوپاپ کنترل جهت، بر حسب جابجایی اسپول شامل شیرهای مثلثی شکل، به صورت خطی، و در سوپاپ‌های شامل اسپول‌های با شیرهای هلالی و مربعی شکل، به صورت غیر خطی تغییر می‌کند [۱۳]. لیسووسکی و همکاران [۱۴]، در

پژوهشی، عملکرد سوپاپ‌های کنترل جهت شامل جزء متحرک اسپولی شکل را به روش عددی و تجربی بررسی نمودند. پی و همکاران [۱۵] نیز، اثر سه نوع شیر متفاوت بر روی برآمدگی اسپول را بر مشخصه‌های جریان روغن عبوری از سوپاپ، در حالت پایا، مطالعه کردند. همچنین، آنگ و همکاران [۱۶]، تأثیر شیرهای ۷ شکل بر روی برآمدگی اسپول را بر نیروی لازم برای تغییر وضعیت و دبی روغن عبوری از سوپاپ کنترل جهت، مطالعه نمودند. ارزیابی‌های آنها نشان داد که شیرهای ۷ شکل بر روی برآمدگی اسپول، کاهش نیروی ناشی از جریان روغن در حالت پایا، را به همراه دارند. ژانگ و همکاران [۶]، مشخصه‌های دینامیکی و دقت عمل یک سوپاپ کنترل جهت تناسبی، تحت تأثیر سوپاپ فرمان مستقل را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. ژانگ و همکاران [۴]، شبیه‌سازی عددی و ارزیابی تجربی یک سوپاپ کنترل جهت تناسبی دو مرحله‌ای را در شرایط کاری مختلف، مطالعه نمودند. آنها در این پژوهش، وابستگی حرکت اجزای متحرک واحدهای فرمان و اصلی سوپاپ کنترل جهت دو مرحله‌ای مفروض را بررسی کردند. ارزیابی‌های آنها نشان داد که هندسه‌ی شیرهای روی برآمدگی اسپول، تأثیر قابل توجهی بر حرکت اجزای متحرک واحدهای فرمان و اصلی، دارد [۴]. ریتوراج و همکاران [۱۷]، به روش عددی، تأثیر نیروهای شعاعی وارد بر اسپول، را بر نیروی محوری لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ کنترل جهت، بررسی نمودند. ارزیابی‌های آنها نشان داد که نیروی محوری لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ کنترل جهت، به طور معنی‌داری تحت تأثیر نیروی شعاعی وارد بر اسپول قرار می‌گیرد. همچنین، تانگ و همکاران [۱۸]، به تأثیر خطاهای مرتبط با ساخت و پرداخت سطح برآمدگی اسپول بر عملکرد و نشت روغن در سوپاپ‌های کنترل جهت پرداختند. آنها دریافتند که خطاهای مرتبط با پرداخت سطح، موجب ایجاد روزنه‌های کوچکی، با سطوح هندسی نامنظم، در فضای میان برآمدگی اسپول و پوسته‌ی ثابت می‌گردد که نشت روغن در سوپاپ کنترل جهت را تحت تأثیر قرار می‌دهند. فی و همکاران [۱۹]، تأثیر دما و لزجت روغن را بر نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ کنترل جهت شامل جزء متحرک اسپولی شکل مطالعه نمودند. لی و همکاران [۲۰] نیز، به روش‌های عددی و تجربی، تأثیر چهار شیر متفاوت بر روی برآمدگی اسپول را در شرایط کاری مختلف، بر عملکرد یک سوپاپ کنترل جهت تناسبی دو مرحله‌ای، بررسی کردند. چن و همکاران [۲۱]، در پژوهشی، تأثیر دما و هندسه‌ی شیرهای روی برآمدگی اسپول را بر توزیع فشار روغن بر سطح اسپول، نیروی جانبی و نشت روغن، بررسی نمودند. همچنین، لدوون و همکاران [۲۲] در پژوهشی، روند تغییرات نیروی ناشی از جریان روغن وارد بر جزء متحرک سوپاپ کنترل جهت چهار دهانه‌ی سه وضعیتی تناسبی، با هم‌پوشانی صفر را در شرایط کاری مختلف، به روش‌های عددی و تجربی، مطالعه نمودند. ارزیابی‌های آنها نشان داد که نیروی ناشی از جریان روغن، به‌طور معنی‌داری، تحت تأثیر دبی و مسیره‌های جریان روغن عبوری از سوپاپ قرار دارد. لدوون و همکاران [۲۳] در پژوهشی دیگر، به بررسی عوامل مؤثر بر نشت روغن در سوپاپ‌های کنترل جهت پرداختند. در نهایت، دوماگالا [۵]، روش‌های مختلف مدل‌سازی عددی و تحلیل نیروی ناشی از جریان در سوپاپ‌های هیدرولیکی را مقایسه کرد.

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که در سال‌های

کمیت G_k ، معرف تولید انرژی جنبشی ناشی از گرادبان‌های سرعت متوسط جریان، کمیت G_b ، معرف تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از بویانسی، کمیت Y_m ، معرف تولید انرژی جنبشی ناشی از اثرات تراکم‌پذیری جریان، هستند. $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ در روابط بالا، کمیت‌های ثابت مدل محسوب می‌شوند. همچنین، σ_k و σ_ε نیز به ترتیب اعداد پرانتل آشفتگی برای دو کمیت k و ε تعریف می‌شوند. در ضمن، s_k و s_ε نیز، جملات چشمه در روابط متناظر با k و ε هستند [۷]. هر یک از کمیت‌های ثابت در مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ شامل، $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، s_k و s_ε به ترتیب برابر با، $1/44$ ، $1/92$ ، 1 و $1/3$ ، در نظر گرفته می‌شوند [۲۲].

برای تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ دو راهه، مدل‌سازی هندسی آن ضرورت دارد. به دلیل آشفتگی جریان عبوری از سوپاپ دو راهه، مدل‌سازی هندسی آن، به صورت سه بعدی انجام می‌شود. دامنه‌ی محاسباتی در این مسأله، شامل مجاری ورودی و خروجی، و همچنین، فضای محدود بین برآمدگی‌ها و محور اسپول، می‌باشد. بر این اساس، شبکه‌بندی دامنه‌ی محاسباتی مدل هندسی، در محیط نرم‌افزار Ansys، مطابق شکل ۲، انجام می‌گیرد. برای این منظور، از سلول‌های شش وجهی نامنظم استفاده می‌شود. همچنین، با توجه به اهمیت جریان روغن عبوری از روزه‌ی حاصل از جابجایی جزء متحرک سوپاپ دو راهه، تمرکز سلول‌ها در روزه، نسبت به سایر نواحی محفظه‌ی سوپاپ، بالاتر در نظر گرفته می‌شود. برای تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ دو راهه شامل اسپول متحرک، از بخش نرم‌افزار Ansys، به روش حجم محدود و توسط حل گر بر پایه‌ی فشار استفاده می‌شود. در این روش، با استفاده از حل یک معادله برای فشار، تضمین می‌کند که قانون بقای جرم در سراسر حوزه‌ی محاسباتی، ارضاء شده باشد. در ضمن، روش حل در نرم‌افزار Ansys، بر پایه‌ی الگوریتم سرعت-فشار SIMPLE انجام می‌گیرد. در تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ دو راهه، شامل اسپول متحرک، روغن، سیالی تراکم‌ناپذیر با چگالی 850 kg/m^3 و لزجت $38/6 \text{ mm}^2/\text{s}$ فرض می‌گردد. عدم تغییر ویژگی‌های فیزیکی روغن، نبود نشت داخلی در سوپاپ، سطح صاف و صیقلی برآمدگی‌ها و محور اسپول، و در نهایت، عدم انتقال گرما میان روغن و محفظه‌ی سوپاپ، فرض‌های دیگری است که در حل این مسأله به‌کار گرفته می‌شوند. همچنین، از سرعت جریان روغن ورودی و فشار روغن خروجی، برای تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ دو راهه، استفاده می‌شود. از سوی دیگر، فشار روغن در مجرای خروجی سوپاپ به دلیل ارتباط با مخزن ذخیره‌ی روغن، برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در ضمن، از شرط مرزی بدون لغزش در همه‌ی دیواره‌ها و جداره‌های سوپاپ، استفاده می‌شود.

گذشته، تأثیر شکل و هندسه‌ی شیارهای ایجاد شده بر روی برآمدگی اسپول، نوع و میزان همپوشانی اسپول، دما و ویژگی‌های فیزیکی روغن، بر عملکرد سوپاپ‌های کنترل جهت، از جمله، نشت روغن، نیروی لازم برای تغییر وضعیت، توزیع فشار روغن وارد بر سطح برآمدگی اسپول، نیروی شعاعی وارد بر اسپول، مشخصه‌های جریان و در نهایت، پاسخ دینامیکی، مورد بررسی قرار گرفته است. در حالی که پژوهشی در خصوص، تأثیر شکل و ساختار هندسه‌ی محور اسپول، بر عملکرد سوپاپ‌های کنترل جهت، انجام نگرفته است. در شکل ۱، ساختار درونی یک سوپاپ کنترل جهت دو راهه شامل اسپول با محور شیب‌دار نشان داده شده است. در این مقاله، تأثیر شکل و ساختار هندسی محور اسپول، از جمله، شیب محور اسپول (α) و نسبت قطر اسپول (نسبت قطر برآمدگی به قطر محور)، بر روی دو کمیت مؤثر بر عملکرد سوپاپ‌های کنترل جهت، شامل، افت فشار روغن در مجاری و همچنین، نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ، در شرایط کاری مختلف (جابجایی‌های مختلف اسپول و جریان‌های متفاوت)، مطالعه می‌شود. در نهایت، به منظور ارزیابی دقت عمل مدل‌سازی عددی سوپاپ کنترل جهت، طراحی و ساخت سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی، برای اندازه‌گیری دو کمیت وابسته، شامل، نیروی وارد بر اسپول و افت فشار روغن در مجاری سوپاپ، در شرایط کاری مختلف، در دستور کار قرار می‌گیرد.

۲- روش انجام پژوهش

برای تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ دو راهه‌ی هیدرولیکی شامل اسپول، تعیین رژیم جریان اهمیت دارد [۲۰]. ارزیابی‌های اولیه نشان می‌دهد که جریان روغن عبوری از سوپاپ دو راهه شامل اسپول، بر اساس بزرگی عدد رینولدز، آشفته پیش‌بینی می‌گردد. از این رو، روابط ریاضی حاکم بر میدان لزج، تراکم‌ناپذیر، غیر دائمی و آشفته درون محفظه‌ی سوپاپ دوراهه، بازنویسی می‌شود [۳]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right] \quad (۲)$$

نرم‌افزار Ansys Fluent شامل مجموعه‌ی متنوعی از مدل‌های آشفتگی است. با توجه به هندسه‌ی روزه، عدد رینولدز بالای جریان و دربرگرفتن سطح مقطع روزه توسط روغن، از مدل $k-\varepsilon$ برای شبیه‌سازی جریان آشفته در سوپاپ دو راهه شامل اسپول استفاده می‌شود [۷]. متغیرهای این مدل آشفتگی شامل انرژی جنبشی (k) و ضریب اضمحلال انرژی جنبشی (ε)، به شرح زیر تعریف می‌گردند:

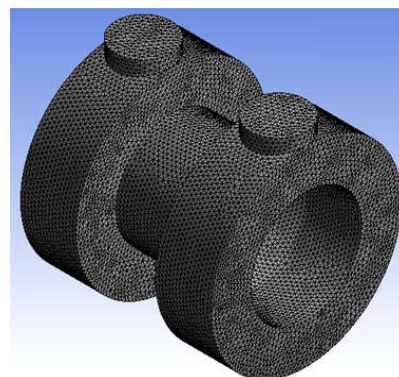
$$k = \frac{1}{2} (\bar{u}_1'^2 + \bar{u}_2'^2 + \bar{u}_3'^2) \quad (۳)$$

$$\varepsilon = v \frac{\partial \bar{u}_i' \partial \bar{u}_i'}{\partial x_k \partial x_k} \quad (۴)$$

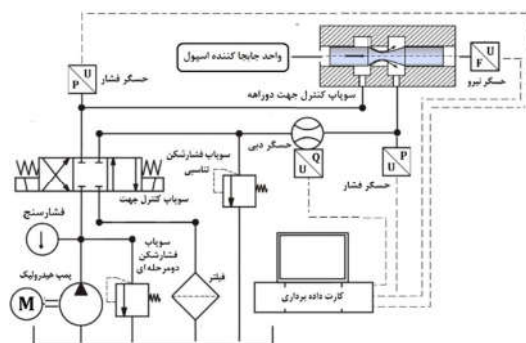
انرژی جنبشی (k) و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی (ε)، بر اساس روابط انتقال، به شرح زیر به دست می‌آیند [۳]:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (۵)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{-Y_M + s_k}{C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + s_\varepsilon} \quad (۶)$$



شکل ۲- شبکه‌بندی محدوده‌ی محاسباتی سوپاپ دو راهه



شکل ۴- مدار هیدرولیکی برای ارزیابی تجربی عملکرد سوپاپ دو راهه

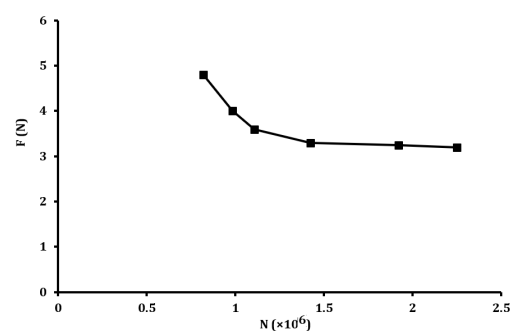
فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ کنترل جهت دو راهه، توسط سوپاپ فشارشکن دو مرحله‌ای تناسبی، مدل EDG-01-H، در سطح معینی تنظیم می‌شود. همچنین، اندازه‌گیری فشار روغن در مجرای ورودی و خروجی سوپاپ کنترل جهت، توسط حسگر A-10 و اندازه‌گیری دبی روغن عبوری از سوپاپ، توسط حسگر VHZO-020GA50 انجام می‌گیرد. برای جلوگیری از افزایش فشار روغن در مجرای خروجی سوپاپ دو راهه‌ی هیدرولیکی، مجرای خروجی آن، از طریق لوله‌ی انتقال انعطاف‌پذیر، با مقاومت اندک، به مخزن را می‌یابد. از سوی دیگر، مطابق شکل ۴، برای تغییر و تنظیم موقعیت جزء متحرک سوپاپ دو راهه، از واحد جابجاکنده‌ی اسپول شامل ریزسنگ، استفاده می‌شود. همچنین، اندازه‌گیری نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاپ دو راهه نیز، توسط حسگر نیروی SS۳۰۰ انجام می‌گیرد. جریان الکتریکی خروجی از حسگرهای فشار، دبی و نیرو به کارت داده‌برداری، مدل MA-GL 16، منتقل می‌شود. در نهایت، پس از پردازش، اصلاح و تقویت جریان‌های الکتریکی دریافتی توسط کارت داده‌برداری، ثبت و تحلیل متغیرهای فیزیکی، در رایانه انجام می‌گیرد. بدین‌ترتیب، امکان مقایسه نتایج حاصل از حل عددی جریان عبوری از سوپاپ دو راهه‌ی هیدرولیکی، با نتایج تجربی و در نتیجه‌ی آن، ارزیابی دقت عمل تحلیل عددی، فراهم می‌شود.

۳- نتایج

۳-۱- ارزیابی عملکرد سوپاپ دو راهه شامل اسپول ساده

همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، برای ارزیابی عملکرد سوپاپ کنترل جهت دو راهه شامل اسپول ساده، روند تغییرات نیروی وارد بر جزء متحرک و همچنین، افت فشار روغن عبوری، در شرایط کاری مختلف، بررسی می‌گردد. برای این منظور، در شکل ۵، روند تغییرات افت فشار روغن در مجرای سوپاپ، بر حسب دبی روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، در موقعیت‌های مختلف اسپول، نشان داده شده است.

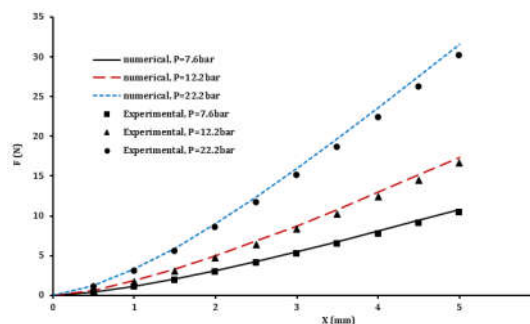
برای اطمینان از دقت تحلیل عددی جریان عبوری از سوپاپ دو راهه شامل اسپول، تأثیر تعداد المان‌ها در حوزه‌ی محاسباتی بر یکی از متغیرهای وابسته اهمیت دارد [۵]. برای این منظور، آزمون استقلال از شبکه، برای محاسبه‌ی نیروی محوری وارد بر اسپول متحرک، در شرایطی که اسپول در موقعیت $1/5\text{mm}$ قرار دارد و همچنین، اختلاف فشار روغن در مجرای سوپاپ کنترل جهت، برابر با $12/2\text{bar}$ باشد، انجام می‌گیرد. در شکل ۳، روند تغییرات نیروی محوری وارد بر اسپول متحرک، بر حسب تعداد المان‌ها در حوزه محاسباتی، نشان داده شده است. مطابق شکل ۳، با افزایش تعداد المان‌ها، نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، در شرایطی که، تعداد المان‌ها درون محفظه‌ی سوپاپ دو راهه‌ی مفروض، از مرز $1/42$ میلیون فراتر می‌رود، نیروی وارد بر اسپول متحرک، به طور قابل توجهی تغییر نمی‌کند. در این شرایط، تحلیل عددی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ دو راهه، مستقل از تعداد المان‌ها، خواهد بود.



شکل ۳- روند تغییرات نیروی محوری وارد بر اسپول متحرک سوپاپ دو راهه بر حسب تعداد المان‌ها

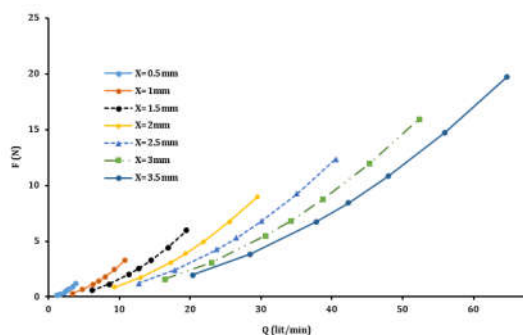
برای ارزیابی تجربی و بررسی صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان عبوری از سوپاپ دو راهه‌ی هیدرولیکی، طراحی و ساخت سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی نشان داده شده در شکل ۴، در دستور کار قرار می‌گیرد. در این سامانه‌ی انتقال توان، پمپ دنده‌ای با حجم جابجایی 78cc ، وظیفه‌ی ایجاد جریان روغن را بر عهده دارد. روغن خروجی پمپ از طریق سوپاپ کنترل جهت چهار دهانه‌ی سه وضعیتی تناسبی به مجرای ورودی سوپاپ دو راهه، ارسال می‌شود.

ضمن افزایش سرعت جریان روغن در محفظه‌ی سوپاپ و افزایش نیروی ناشی از مومنوم روغن، موجب افزایش نیروی وارد بر اسپول، می‌گردد. لازم به ذکر است که در برخی مراجع، اختلاف میان نتایج تجربی با نتایج حاصل از تحلیل عددی، مربوط به ارزیابی عملکرد سوپاپ‌های هیدرولیکی با ساختارهای پاپتی و اسپولی را تا ۸ درصد، و در برخی سوپاپ‌های خاص تا ۱۰ درصد نیز گزارش کرده‌اند [۵، ۷، ۱۴، ۲۰ و ۲۲].

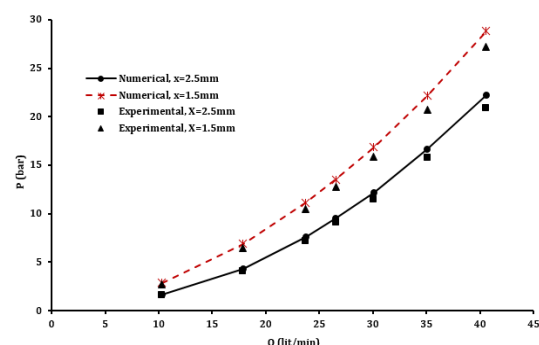


شکل ۶- روند تغییرات نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاپ دو راهه بر حسب جابجایی اسپول ساده

در شکل ۷، روند تغییرات نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاپ دو راهه، بر حسب دبی روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ و در موقعیت‌های متفاوت اسپول، نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، در هر موقعیتی که اسپول متحرک قرار می‌گیرد، افزایش دبی روغن عبوری از سوپاپ، موجب افزایش نیروی محوری وارد بر اسپول، به‌طور غیر خطی می‌گردد. لازم به ذکر است که، در هر موقعیت اسپول، افزایش دبی روغن عبوری از سوپاپ دو راهه، افزایش سرعت روغن عبوری از تنگنای ایجاد شده در محفظه‌ی سوپاپ را به‌همراه دارد. بدین‌ترتیب، نیروی ناشی از مومنوم جریان روغن وارد بر اسپول و در نهایت، نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، مطابق شکل ۷، با افزایش جابجایی اسپول، ظرفیت سوپاپ دو راهه در هدایت جریان روغن نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۷- روند تغییرات نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاپ دو راهه بر حسب دبی روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ



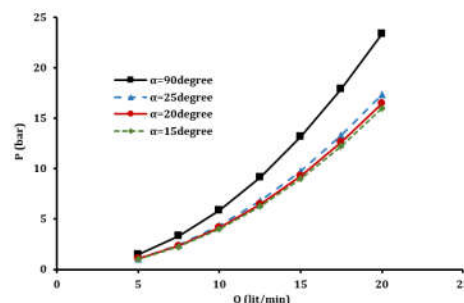
شکل ۵- روند تغییرات افت فشار روغن عبوری از سوپاپ بر حسب دبی روغن عبوری در جابجایی‌های مختلف اسپول ساده

مطابق شکل ۵، با افزایش دبی روغن عبوری از مجاری سوپاپ، در هر موقعیت قرارگیری اسپول، افت فشار روغن، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در صورت عدم تغییر سطح مقطع عبور جریان در تنگنای ایجاد شده توسط اسپول در سوپاپ دو راهه، افزایش دبی روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، افزایش فشار روغن در مجرای ورودی و در نهایت، افزایش افت فشار روغن در مجاری سوپاپ را به‌همراه دارد. در شکل ۵، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی افت فشار روغن در مجاری سوپاپ، در دو موقعیت متفاوت اسپول، نیز آمده است. بر اساس بررسی‌های به عمل آمده، در شرایطی که اسپول سوپاپ دو راهه، در فاصله‌ی ۱/۵mm و ۲/۵mm از موقعیت خلاص قرار دارد، اختلاف میان نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی و تحلیل عددی، مربوط به افت فشار روغن در مجاری سوپاپ، به‌طور متوسط، ۵/۶ و ۵/۱ درصد، تعیین می‌گردد. این اختلاف، به دلیل نشت محدود روغن از لقی میان اسپول و بدنه‌ی سوپاپ، روی می‌دهد. از سوی دیگر، با جابجایی اسپول و تغییر سطح مقطع عبور جریان روغن، اختلاف فشار در بالادست و پایین‌دست سوپاپ دو راهه، با تغییر همراه می‌گردد. به بیانی دیگر، جابجایی بیشتر اسپول، افت فشار کمتری را برای عبور حجم معینی از روغن ایجاد می‌کند.

در شکل ۶، روند تغییرات نیروی محوری لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه بر حسب موقعیت اسپول، در شرایطی که اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ برابر با ۷/۶bar، ۱۲/۲bar و ۲۲/۲bar باشد، نشان داده شده است. مطابق شکل ۶، با افزایش جابجایی جزء متحرک سوپاپ، نیروی محوری وارد بر اسپول، به دلیل امکان عبور حجم بیشتر روغن، افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش جابجایی اسپول، اختلاف میان نتایج تجربی با نتایج حاصل از تحلیل عددی بیشتر می‌شود. این در حالی است که با افزایش فشار روغن و افزایش نشت روغن در محفظه‌ی سوپاپ دو راهه، نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی محوری وارد بر اسپول ساده، از دقت کمتری برخوردار هستند. لازم به ذکر است که متوسط اختلاف نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی نیروی محوری وارد بر اسپول با نتایج حاصل از تحلیل عددی، در شرایطی که اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ برابر با ۷/۶bar، ۱۲/۲bar و ۲۲/۲bar می‌باشد، به ترتیب، برابر با ۴/۸، ۴/۴ و ۶ درصد تعیین می‌گردد. از سوی دیگر، مطابق شکل ۶، در هر موقعیت معین جزء متحرک سوپاپ، افزایش اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ،

۳-۲- تأثیر شیب محور اسپول بر مشخصه‌های عملکردی سوپاپ دو راهه‌ی هیدرولیکی

در شکل ۸، تأثیر شیب محور اسپول (α) بر روی بزرگی اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ دو راهه، در شرایطی که، اسپول در فاصله‌ی ۱/۵mm از وضعیت خلاص قرار دارد، نشان داده شده است.

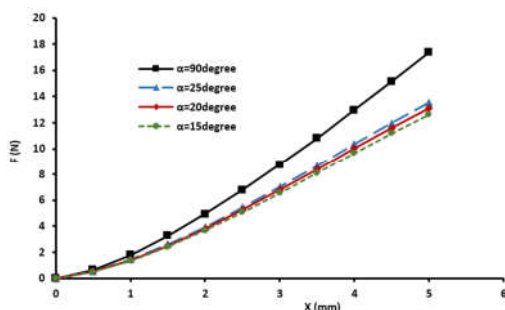


شکل ۸- تأثیر شیب محور اسپول بر روی بزرگی اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ دو راهه (تحلیل عددی)

مطابق شکل ۸، در سوپاپ دو راهه شامل اسپول ساده ($\alpha=90^\circ$)، با افزایش دبی روغن عبوری، اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ، افزایش می‌یابد. به همین ترتیب، ایجاد شیب بر روی محور اسپول نیز، موجب روند افزایشی اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ دو راهه، بر حسب دبی روغن عبوری از آن، می‌گردد. این در حالی است که ایجاد شیب بر روی محور اسپول، کاهش افت فشار در مجاری سوپاپ را، در شرایط عبور یکسان جریان روغن از محفظه‌ی سوپاپ، به همراه دارد. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که ایجاد شیب‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه بر روی محور اسپول، اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ دو راهه، نسبت به سوپاپ مشابه، شامل اسپول ساده، به‌طور متوسط، ۲۵/۶، ۲۹/۳ و ۳۱/۵ درصد کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که ایجاد شیب بر روی محور اسپول، ضمن حرکت یکنواخت‌تر روغن، کاهش حرکت آشفته‌ی جریان روغن در محفظه‌ی سوپاپ را نیز به همراه دارد. به بیانی دیگر، ایجاد شیب بر روی محور اسپول، موجب کاهش معنی‌دار مقاومت سوپاپ دو راهه در برابر جریان روغن و در نهایت، کاهش اختلاف فشار روغن در مجاری آن، می‌گردد. از این رو، در شرایطی که اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ دو راهه برابر با مقدار ثابتی باشد، به‌کارگیری اسپول‌های شیب‌دار در ساختار درونی این نمونه از سوپاپ‌های هیدرولیکی، ضمن افزایش حجم روغن عبوری از سوپاپ، افزایش راندمان کل سامانه‌ی انتقال توان را نیز، به همراه دارد. از سوی دیگر، تغییر شیب محور اسپول، تأثیر معنی‌داری بر روی اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ، ندارد.

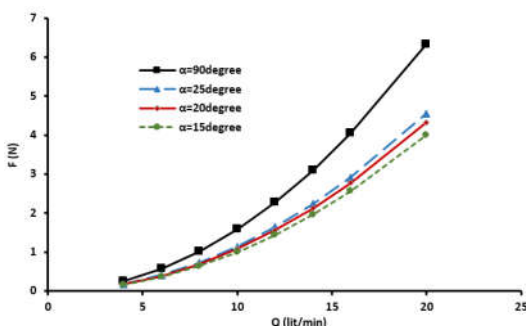
تأثیر شیب محور اسپول بر نیروی محوری لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه‌ی هیدرولیکی، در شرایطی که اختلاف فشار روغن در دو سوی سوپاپ برابر با ۱۲/۲bar می‌باشد، در شکل ۹، نشان داده شده است. مطابق شکل ۹، در سوپاپ دو راهه شامل اسپول ساده (اسپول با شیب ۹۰ درجه)، و سوپاپ‌های دو راهه مشابه، شامل اسپول‌های شیب‌دار، با جابجایی اسپول، نیروی محوری وارد بر آن، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، ایجاد شیب بر روی محور اسپول، موجب کاهش نیروی

محوری لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ، در شرایط کاری مشابه (موقعیت یکسان اسپول، دبی روغن عبوری و اختلاف فشار روغن برابر)، می‌گردد. بررسی نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ دو راهه نشان می‌دهد که در صورت ایجاد شیب‌های ۲۵، ۲۰ و ۱۵ درجه بر روی محور اسپول، نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ نسبت به سوپاپ مشابه شامل اسپول ساده، به‌طور متوسط، ۲۰/۷، ۲۳/۲ و ۲۶/۱ درصد کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که، ایجاد شیب بر روی محور اسپول، موجب کاهش حرکت آشفته‌ی روغن و جریان‌های گردابی در محفظه‌ی سوپاپ و در نتیجه‌ی آن، کاهش نیروی ناشی از جریان وارد بر جزء متحرک سوپاپ می‌گردد. این در حالی است که تغییر شیب محور اسپول، تأثیر معنی‌داری بر روی نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ و جابجایی اسپول ندارد.



شکل ۹- تأثیر شیب محور اسپول بر نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ کنترل جهت دو راهه

در شکل ۱۰ نیز، روند تغییرات نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه شامل اسپول‌های با شیب‌های متفاوت بر حسب دبی روغن عبوری، در شرایطی که اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ، برابر با ۱۲/۲bar می‌باشد، نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰، در صورتی که در ساختار درونی سوپاپ دو راهه از اسپول‌های ساده و شیب‌دار استفاده شود، با افزایش دبی روغن عبوری، نیروی محوری لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ، به‌طور غیر خطی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، ایجاد شیب بر روی محور اسپول، موجب کاهش نیروی محوری لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه، در شرایط کاری مشابه می‌گردد. این در حالی است که تغییر انحنای محور اسپول، تأثیر قابل‌توجهی بر روی نیروی محوری وارد بر اسپول ندارد.

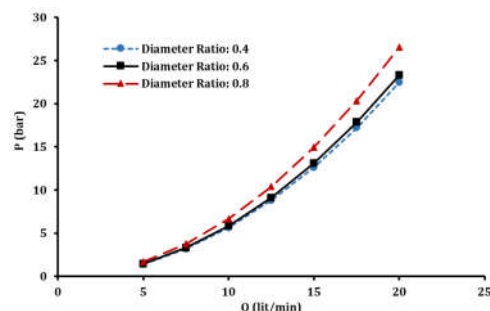


شکل ۱۰- روند تغییرات نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه شامل اسپول با شیب‌های متفاوت بر حسب دبی روغن عبوری

۳-۳- تأثیر نسبت قطر اسپول بر مشخصه‌های عملکردی

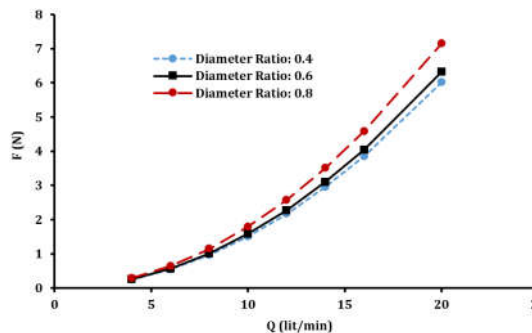
سوپاپ دو راهه‌ی هیدرولیکی

در شکل ۱۱، تأثیر نسبت قطر برآمدگی اسپول به قطر محور آن (نسبت قطر اسپول)، بر اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ دو راهه، در شرایطی که اسپول، در فاصله‌ی ۱/۵mm وضعیت خلاص قرار دارد، نشان داده شده است.



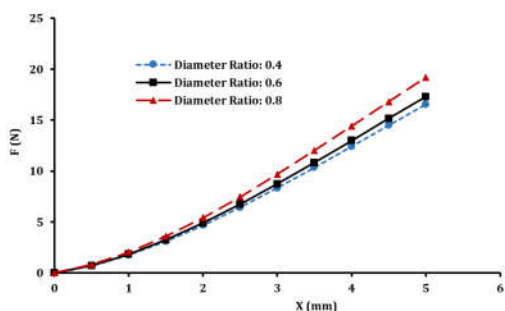
شکل ۱۱- تأثیر نسبت قطر سطوح مؤثر اسپول بر اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ دو راهه

افزایش نسبت قطر اسپول از ۰/۴ به ۰/۶، متوسط نیروی لازم برای جابجایی اسپول و تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه، به اندازه‌ی، ۴/۹ درصد، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش نسبت قطر سطوح مؤثر اسپول از ۰/۴ به ۰/۸، موجب افزایش ۱۸/۸ درصدی نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه می‌گردد.



شکل ۱۲- روند تغییرات نیروی محوری برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه بر حسب دبی روغن در نسبت‌های مختلف قطر اسپول

در شکل ۱۳ نیز، تأثیر نسبت قطر سطوح مؤثر اسپول بر روند تغییرات نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه بر حسب جابجایی اسپول، در شرایطی که اختلاف فشار روغن در مجاری آن، برابر با ۱۲/۲bar باشد، نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۳، در سوپاپ دو راهه، شامل اسپول‌های با ابعاد متفاوت، با افزایش جابجایی اسپول، نیروی محوری وارد بر آن افزایش می‌یابد. بررسی نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد که با افزایش نسبت قطر اسپول از ۰/۴ به ۰/۶، افزایش قابل‌توجهی در نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ در موقعیت‌های مختلف اسپول روی نمی‌دهد. این در حالی است که افزایش بیشتر نسبت قطر برآمدگی اسپول به محور آن (افزایش از ۰/۴ به ۰/۸)، موجب تفاوت معنی‌داری در متوسط نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ، می‌گردد.



شکل ۱۳- روند تغییرات نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه بر حسب جابجایی اسپول در نسبت‌های مختلف قطر اسپول

۴- نتیجه‌گیری

در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، از سوپاپ‌های دو راهه شامل اسپول، برای تغییر مسیر و سرعت حرکت جزء متحرک عملگرهای هیدرولیکی استفاده می‌شود. در این پژوهش، با توجه به اهمیت سوپاپ‌های دو راهه در مصرف انرژی و مشخصه‌های دینامیکی

مطابق شکل ۱۱، در هر نسبت قطر اسپول، با افزایش دبی روغن عبوری از مجاری سوپاپ دو راهه، اختلاف فشار روغن در بالادست و پایین‌دست سوپاپ، افزایش می‌یابد. این در حالی است که، افزایش نسبت قطر اسپول، ضمن افزایش مقاومت سوپاپ دو راهه در برابر جریان، موجب افزایش اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ، به دلیل کاهش سطح مقطع عبور جریان، می‌گردد. در ضمن، با افزایش نسبت قطر اسپول از ۰/۴ به ۰/۶، متوسط اختلاف فشار روغن در دو سوی سوپاپ دو راهه، به اندازه‌ی ۳/۸ درصد، افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش نسبت قطر سطوح مؤثر اسپول از ۰/۴ به ۰/۸، موجب افزایش ۱۸/۳ درصدی اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ دو راهه می‌گردد.

روند تغییرات نیروی محوری لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه بر حسب دبی روغن عبوری، در نسبت‌های مختلف قطر سطوح مؤثر اسپول، در شکل ۱۲، نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۲، با افزایش دبی روغن عبوری از مجاری سوپاپ شامل اسپول‌های با نسبت قطرهای متفاوت، نیروی لازم برای جابجایی اسپول و تغییر وضعیت سوپاپ، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که افزایش دبی روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ شامل اسپول‌های با هندسه‌ی متفاوت، ضمن افزایش سرعت روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، موجب افزایش نیروی ناشی از جریان روغن، وارد بر محور اسپول، می‌گردد. از سوی دیگر، افزایش نسبت قطر برآمدگی اسپول به قطر محور آن، افزایش متوسط نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ در شرایط کاری مشابه (دبی روغن عبوری یکسان و موقعیت مشابه اسپول) را به همراه دارد. در واقع، با افزایش قطر محور اسپول، سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، به دلیل کاهش سطح مقطع عبور جریان، افزایش می‌یابد. بدین‌ترتیب، افزایش قطر محور اسپول، موجب افزایش نیروی ناشی از جریان روغن و در نتیجه‌ی آن، افزایش نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ، می‌گردد. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که با

- Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2015;38.
- [10] Liu J, Li R, Ding X, Liu Q. Flow force research and structure improvement of cartridge valve core based on CFD method. *Heliyon*. 2022; 8(11): 11700.
- [11] Lisowski E, Filo G, Rajda J. Analysis of Flow forces in the initial phase of a throttle gap opening in a proportional control valve. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2018;59:157-67.
- [12] Li R, Sun Y, Wu X, Zhang P, Li D, Lin J, et al. Review of the Research on and Optimization of the Flow Force of Hydraulic Spool Valves. *Processes*. 2023;11(7):2183.
- [13] Borghi M, Milani M, Paoluzzi R. Influence of Notch Shape and Number of Notches on the Metering Characteristics of Hydraulic Spool Valves. *International Journal of Fluid Power*. 2005;6:5-18.
- [14] Lisowski E, Rajda J. CFD analysis of pressure loss during flow by hydraulic directional control valve constructed from logic valves. *Energy Conversion and Management*. 2013;65:285-91.
- [15] Ye Y, Yin C-B, Li X-D, Zhou W-j, Yuan F-f. Effects of groove shape of the notch on the flow characteristics of the spool valve. *Energy Conversion and Management*. 2014;86:1091-101.
- [16] Aung NZ, Jinghui P, Songjing L. Reducing the steady flow force acting on the spool by using a simple jet-guiding groove. 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM). 2015:289-94.
- [17] Rituraj R, Scheidl R. Stability analysis of spools with imperfect sealing gap geometries. *International Journal of Fluid Power*. 2020; 21(3): 383-404.
- [18] Tang W, Xu G, Zhang S, Jin S, Wang R. Digital twin-driven mating performance analysis for precision spool valve. *Machines*. 2021; 9(8): 157.
- [19] Fei S, Jia C, Likun P, Jie L. Experimental research on the internal leakage of hydraulic slide valve. *Fluid Machinery*. 2021; 49(7): 1-6.
- [20] Li S, Du J, Shi Z, Xu K, Shi W. Characteristics Analysis of the Pilot-Operated Proportional Directional Valve by Experimental and Numerical Investigation. *Energies*. 2022;15(24):9418.
- [21] Chen J, Li F, Yang Y. An accurate mathematical model and experimental research of pressure distribution in the spool valve clearance film. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022; 11: 1-18.
- [22] Ledvoň M, Hružík L, Bureček A, Polášek T, Dýrr F, Kolář D. Experimental and Numerical Analysis of Flow Force Acting on the Spool of Proportional Directional Valve. *Processes*. 2023;11(12):3415.
- [23] Ledvoň M, Hružík L, Bureček A, Dýrr F, Polášek T. Leakage Characteristics of Proportional Directional Valve. *Processes*. 2023;11(2):512.
- سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، تأثیر هندسه‌ی اسپول، بر مشخصه‌های جریان و نیروی لازم برای تغییر وضعیت آنها بررسی شده است. در زیر به برخی نتایج حاصل از این پژوهش اشاره می‌شود:
- در شرایط کاری مختلف، انطباق قابل قبولی میان نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، با نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی کمیت‌های وابسته، وجود دارد.
- ایجاد شیب ۲۰ درجه بر روی محور اسپول، موجب کاهش ۲۹/۳ درصدی اختلاف فشار روغن در مجاری و کاهش ۲۳/۲ درصدی نیروی لازم برای جابجایی اسپول، نسبت به سوپاپ مشابه شامل اسپول ساده، گردید. این در حالی است که تغییر شیب محور اسپول، تأثیر معنی‌داری بر روی اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ و نیروی لازم برای تغییر وضعیت آن، ندارد.
- با افزایش نسبت قطر اسپول از ۰/۴ به ۰/۶ و ۰/۸، متوسط اختلاف فشار روغن در مجاری سوپاپ دو راهه، به ترتیب، به اندازه‌ی ۳/۸ و ۱۸/۳ درصد افزایش یافت. از سوی دیگر، افزایش نسبت قطر اسپول از ۰/۴ به ۰/۶، موجب افزایش ۴/۹ درصدی متوسط نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه، گردید. این در حالی است که، افزایش نسبت قطر اسپول از ۰/۴ به ۰/۸، افزایش ۱۸/۸ درصدی، نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ دو راهه را به همراه داشت.
- بر این اساس، ایجاد شیب ۲۰ درجه‌ای محور اسپول، در شرایطی که نسبت قطر در اسپول برابر با ۰/۴ باشد، تأثیر مطلوبی بر عملکرد سوپاپ دو راهه‌ی هیدرولیکی، از نظر افت فشار روغن عبوری و همچنین، نیروی لازم برای تغییر وضعیت دارد.

۵- مراجع

- [1] Li Y, Li R, Yang J, Yu X, Xu J. Review of Recent Advances in Hydraulic Control Valve Drive Method. *Processes*. 2023;11(9):2537.
- [۲] نیک‌اندیش پ، میرزاوند م، تحلیل تجربی و عددی عملکرد سوپاپ هیدرولیکی شامل پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۲، ص ۲۴۹-۲۵۸.
- [۳] نیک‌اندیش پ، مینایی س، قبادیان ب، شیخ داوودی ج، تعیین کمیت‌های مؤثر در رابطه‌ی خطی‌سازی شده جریان برای سوپاپ‌های کنترل جهت هیدرولیکی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۳، د. ۴۴، ش. ۱، ص ۳۹-۴۹.
- [4] Zhang H, Liao Y, Tao Z, Lian Z, Zhao R. Dynamic Characteristics of a Novel High-Pressure and Large-Flow Water Hydraulic Proportional Valve. *Machines*. 2022;10(1):37.
- [5] Domagala M, Fabis-Domagala J. A Review of the CFD Method in the Modeling of Flow Forces. *Energies*. 2023;16(16):6059.
- [6] Zhang J, Lu Z, Xu B, Su Q. Investigation on the dynamic characteristics and control accuracy of a novel proportional directional valve with independently controlled pilot stage. *ISA Trans*. 2019;93:218-30.
- [7] Gomez I, Gonzalez-Mancera A, Newell B, Garcia-Bravo J. Analysis of the Design of a Poppet Valve by Transitory Simulation. *Energies*. 2019;12(5):889.
- [8] Zhang J-h, Wang D, Xu B, Su Q, Lu Z, Wang W. Flow control of a proportional directional valve without the flow meter. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019.
- [9] Zhu Y, Jin B. Analysis and modeling of a proportional directional valve with nonlinear solenoid. *Journal of the*