



ارزیابی متغیرهای موثر بر عملکرد سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی

پژمان نیک اندیش

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

چکیده

با توجه به کاربرد گسترده سوپاپ‌های فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی در ساختار سوپاپ‌های کنترل فشار دو مرحله‌ای، ارزیابی و تحلیل عملکرد آنها به منظور بهینه‌سازی و کنترل ضرورت دارد. در این مقاله، تأثیر برخی مشخصات هندسی سوپاپ فرمان هیدرولیکی مانند شیب، طول و انحنای نشیمنگاه سوپاپ بر توزیع فشار و سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، ضریب جریان، ضریب نیرو و نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ، به روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در همه شرایط کاری، اختلاف میان نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی ضریب جریان و نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ فرمان با نتایج عددی، به طور متوسط، کمتر از ۶ درصد تعیین گردید. بررسی نتایج نشان داد که، کاهش شیب و طول نشیمنگاه، افزایش نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ را به همراه دارد. در حالی که، ایجاد انحناء در مجرای ورودی سوپاپ، موجب کاهش ۳۶ درصدی نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ و افزایش ۷۰ درصدی ضریب جریان آن می‌گردد. در ضمن، نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ‌های شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی نسبت به سوپاپ با نشیمنگاه قائم، به طور متوسط، ۲۰ درصد کمتر تعیین گردید.

کلمات کلیدی: سوپاپ فرمان هیدرولیکی؛ روزنه؛ ضریب جریان؛ انحنای روزنه؛ طول روزنه.

Evaluation of the Effective Variables on the Performance of the Hydraulic Pilot Valve Including the Orifice with the Fixed and Moving Parallel Surfaces

Pezhman Nikandish

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

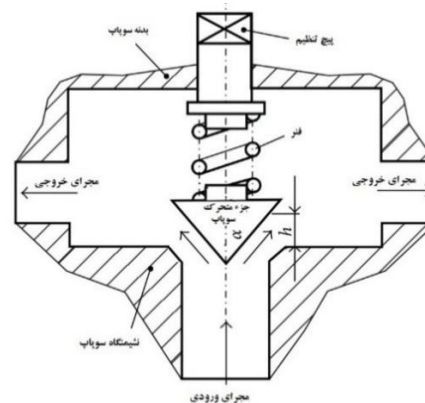
Abstract

Considering the widespread use of hydraulic pilot valves, including orifices with fixed and moving parallel surfaces in the structure of two-stage pressure control valves, it is necessary to evaluate and analyze their performance in order to optimize and control. In this article, the effect of slope, length and curvature of the valve seat on pressure distribution and oil flow rate passing through the pilot valve chamber, flow coefficient, force coefficient and force on the moving part of the valve were investigated using numerical and experimental methods. In all working conditions, the difference between the results obtained from the experimental measurements of the flow coefficient and the force on the moving part of the pilot valve with the numerical results was determined to be less than 6%. Investigation results showed that reducing the slope and length of the seat, the force on the moving part of the valve is increased. Meanwhile, creating a curve in the inlet port of the valve causes 36% reduction in the force on the moving part of the valve and 70% increase in its flow coefficient. The force on the moving component of the valves including orifices with fixed and moving parallel surfaces was determined to be 20% lower on average than the valve with a vertical seat.

Keywords: Hydraulic Pilot Valve; Orifice; Flow Coefficient; Orifice Curvature; Orifice Length.

۱- مقدمه

در سوپاپ‌های هیدرولیکی حرکت یک جزء متحرک در برابر پوسته‌ی ثابت شامل مجاری ورودی و خروجی روغن، روزنه‌ی (اریفیس) با سطح مقطع متغیر ایجاد می‌کند [۱]. از این رو، با تغییر سطح مقطع روزنه، دبی روغن عبوری از سوپاپ هیدرولیکی تغییر می‌کند [۲]. دبی روغن عبوری از یک سوپاپ هیدرولیکی، علاوه بر سطح مقطع روزنه، به متغیرهای دیگری شامل ضریب تخلیه، جرم مخصوص روغن، اختلاف فشار روغن در مجاری ورودی و خروجی سوپاپ، شکل و هندسه‌ی روزنه، وابسته است [۳]. سوپاپ‌های متنوعی از نظر شکل و هندسه جزء متحرک و در نتیجه، شکل و ساختار روزنه، توسط شرکت‌های سازنده‌ی تجهیزات هیدرولیکی عرضه شده است [۱]. در سال‌های اخیر، از سوپاپ‌های شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، در واحد فرمان برخی سوپاپ‌های فشارشکن دو مرحله‌ای، مطابق شکل ۱، استفاده شده است [۳ و ۴].



شکل ۱- ساختار درونی سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی

مطابق شکل ۱، سوپاپ فرمان از یک جزء متحرک مخروطی با زاویه‌ی رأس α و یک نشیمنگاه مایل، با زاویه‌ی شیب برابر تشکیل یافته است. با حرکت جزء متحرک تحت تأثیر فشار روغن (در سوپاپ‌های کنترل فشار) یا در اثر نیروی خارجی (در سوپاپ‌های کنترل جهت و جریان) در برابر بخش ثابت (بدنه‌ی سوپاپ)، یک روزنه‌ی با سطح مقطع متغیر شامل سطوح موازی ایجاد می‌گردد [۲ و ۳]. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که عملکرد سوپاپ‌های فرمان شامل روزنه‌های با

سطوح ثابت و متحرک موازی تحت تأثیر کمیت‌های هندسی جزء متحرک و نشیمنگاه قرار دارد [۵]. از این رو، با توجه به استفاده روز افزون سوپاپ‌های شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی به دلیل ویژگی‌های مطلوب دینامیکی، طراحی و بهینه‌سازی آنها اهمیت پیدا می‌کند [۶]. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی سوپاپ‌های شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، تحت تأثیر، زاویه‌ی رأس، ابعاد و موقعیت جزء متحرک، طول نشیمنگاه و همچنین، ابعاد مجاری ورودی و خروجی، قرار دارد [۵ و ۷]. از سوی دیگر، نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ (برقراری و قطع جریان روغن بین مجاری سوپاپ) به مجموعه نیروهای ناشی از جریان روغن وارد بر جزء متحرک (نیروی ناشی از جریان روغن، برابر با مجموع نیروی حاصل از اعمال فشار روغن بر سطح موثر جزء متحرک، نیروی حاصل از تغییر سرعت جریان روغن در محفظه‌ی سوپاپ و نیروی ناشی از لغزش روغن بر سطح جانبی جزء متحرک می‌باشد) وابسته است [۸]. از این رو، برای انتخاب بهینه‌ی فنر در سوپاپ فشارشکن شامل جزء متحرک مخروطی با نشیمنگاه مایل و همچنین انتخاب مناسب تجهیزات لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ کنترل جهت، تحلیل نیروهای وارد بر جزء متحرک و بررسی متغیرهای موثر بر آن ضرورت دارد [۹]. این در حالی است که برای تعیین دبی روغن عبوری از سوپاپ‌های شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، تخمین ضریب جریان اهمیت دارد [۶]. بنابراین، با توجه به استفاده روز افزون سوپاپ‌های شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی به عنوان سوپاپ‌های اصلی و فرمان هیدرولیکی در سال‌های اخیر و اهمیت طراحی، ساخت و بهینه‌سازی آنها، بررسی تأثیر متغیرهای هندسی بر عملکرد این نمونه از سوپاپ‌ها، به روش تجربی و عددی، در دستور کار این پژوهش قرار گرفته است.

شیفل [۱۰]، تحلیل دینامیکی سوپاپ فشارشکن با نشیمنگاه مایل را مورد بررسی قرار داد. او تأثیر ضریب میرایی و ضریب حجمی سیال بر پاسخ زمانی سوپاپ را مطالعه کرد. برناد و همکاران [۱۱] نیز، به تأثیر جابجایی جزء متحرک مخروطی بر توسعه‌ی گردابه‌های جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ کنترل جهت و سیر تکاملی آنها به روش عددی پرداختند. آنها نشان دادند که جابجایی جزء متحرک سوپاپ بر تعداد و موقعیت گردابه‌ها در محفظه‌ی سوپاپ، تأثیر

نیروی گذرا، نیروی پایا، افت فشار و دبی جریان روغن عبوری از سوپاپ کنترل جریان شامل جزء متحرک و نشیمنگاه مخروطی، یک مدل ریاضی ارائه نمودند. ژانگ و همکاران [۴]، به ارزیابی نیروی جانبی وارد بر جزء متحرک یک سوپاپ کنترل جهت تحت تأثیر فشار روغن به روش عددی پرداختند. بررسی‌های آنها نشان داد که نیروی جانبی وارد بر جزء متحرک لغزشی به طور قابل توجهی تحت تأثیر فشار روغن قرار دارد. بررسی پژوهش‌های انجام شده در سال‌های گذشته نشان می‌دهد که تحلیل عملکرد سوپاپ‌های هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی کمتر مورد توجه بوده است [۴ و ۱۴]. از سوی دیگر، عملکرد دینامیکی مطلوب این نوع از سوپاپ‌های کنترل هیدرولیکی، موجب بکارگیری گسترده‌ی آنها در واحد فرمان سوپاپ‌های کنترل فشار دو مرحله‌ای، در سال‌های اخیر شده است [۱۴]. در پژوهش‌های قبلی، تأثیر متغیرهایی مانند ویژگی‌های روغن، هندسه‌ی مجاری، موقعیت و شکل جزء متحرک، بر موقعیت گردابه‌های جریان، مشخصه‌های دینامیکی و استاتیکی سوپاپ‌های با نشیمنگاه قائم، مطالعه شده است. در حالی که در این مقاله، به منظور طراحی و بهینه‌سازی سوپاپ‌های فرمان شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، تأثیر کمیت‌های هندسی دیگری، مانند زاویه‌ی نشیمنگاه، طول و انحنا‌ی نشیمنگاه در مجرای ورودی بر توزیع فشار و سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، به روش عددی بررسی می‌گردد. بررسی مراجع مختلف نشان می‌دهد که ارزیابی ضرایب جریان و نیرو در سوپاپ‌های شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی و همچنین، سوپاپ‌های با نشیمنگاه قائم، انجام نشده است. لذا در این مقاله، به مطالعه‌ی تأثیر متغیرهای مختلف هندسی نشیمنگاه بر نیروی لازم برای تغییر وضعیت سوپاپ، ضریب جریان و ضریب نیرو، پرداخته می‌شود. در نهایت، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ، ضرایب جریان و نیرو، با نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی، مقایسه می‌شوند.

۲- روش انجام پژوهش

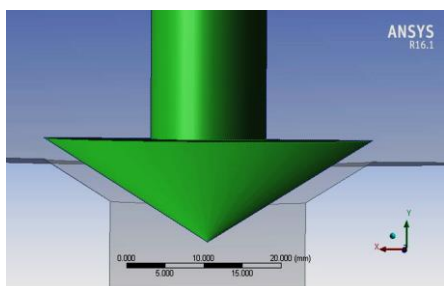
به منظور تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ کنترل هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، تعیین رژیم جریان ضرورت دارد [۱۵]. بررسی‌های اولیه نشان

قابل توجهی دارد. از سوی دیگر، امیرانت و همکاران [۸]، به بررسی شکل هندسی مجاری داخلی بر نیروی ناشی از جریان روغن وارد بر جزء متحرک سوپاپ و دبی جریان روغن عبوری از سوپاپ به روش عددی پرداختند. ساندور و سوسان-رسیگا [۱۲]، به بررسی و تحلیل عددی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی یک سوپاپ کنترل هیدرولیکی شامل جزء متحرک مخروطی پرداختند. بررسی نتایج آنها نشان داد که گردابه‌های جریان در نزدیکی مجاری ورودی و خروجی سوپاپ شکل می‌گیرند و موقعیت گردابه‌ها، تحت تأثیر فشار روغن قرار می‌گیرد. باژو و هاس [۳]، تأثیر هندسه‌ی جزء متحرک مخروطی، میزان تراکم اولیه‌ی و ثابت فنر را بر پایداری یک سوپاپ هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح متحرک و ثابت موازی مطالعه کردند. بررسی‌های آنها نشان داد که با اصلاح هندسه‌ی جزء متحرک سوپاپ و ایجاد محدودیت در اعمال نیروی فنر، پایداری سوپاپ بهبود می‌یابد. همچنین، فینسو و همکاران [۱۳]، تأثیر هندسه‌ی جزء متحرک مخروطی سوپاپ فشارشکن بر مشخصه‌ی فشار-جریان سوپاپ را به روش عددی و تجربی بررسی کردند. آنها دریافتند که زاویه‌ی رأس جزء متحرک مخروطی و موقعیت قرارگیری آن، تأثیر معنی‌داری بر روی منحنی مشخصه‌ی فشار-جریان و نیروی وارد جزء متحرک مخروطی دارد. گومز و همکاران [۹]، تحلیل و طراحی سوپاپ کنترل هیدرولیکی شامل جزء متحرک مخروطی و نشیمنگاه قائم را در دستور کار قرار دادند. بررسی‌های آنها نشان داد که زاویه‌ی رأس جزء متحرک سوپاپ، تأثیر اندکی بر توزیع فشار روغن در محفظه‌ی درونی سوپاپ دارد، در حالی که، با کاهش زاویه‌ی رأس جزء متحرک سوپاپ، نیروی محوری وارد بر آن کاهش می‌یابد. هان و همکاران [۶]، با ارائه‌ی یک مدل ریاضی، تأثیر هندسه‌ی شیارهای ایجاد شده در دامنه‌ی جزء متحرک استوانه‌ای یک سوپاپ هیدرولیکی تناسبی را بر روی نیروی ناشی از جریان روغن و همچنین، مشخصه‌های دینامیکی سوپاپ، بررسی کردند. لیو و همکاران [۷]، به روش عددی، تأثیر انحناء در بخش انتهایی جزء متحرک مخروطی در یک سوپاپ کنترل هیدرولیکی را بر روی نیروی محوری ناشی از جریان روغن وارد بر جزء متحرک سوپاپ مطالعه نمودند. بررسی‌های آنها نشان داد که با افزایش انحنا‌ی بخش انتهایی جزء متحرک مخروطی، نیروی محوری وارد بر آن، به میزان اندکی کاهش می‌یابد. ژائو و همکاران [۱۴]، برای تعیین

در روابط (۳) و (۴)، 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، می‌باشند. $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ 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 می‌باشند [۳]. بدین ترتیب، امکان محاسبه‌ی لزجت آشفتگی (μ_t) ، بر حسب دو کمیت k و ε به شرح زیر فراهم می‌گردد [۱۵]:

$$\mu_t = \rho C_\mu + \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

کمیت C_μ ، در رابطه‌ی (۵)، ثابت مدل تعریف می‌گردد. مقادیر عددی هر یک از کمیت‌های ثابت در مدل $k - \varepsilon$ عبارتند از: $C_{1\varepsilon} = 1/44$ ، $C_{2\varepsilon} = 1/92$ ، $C_{3\varepsilon} = 1$ ، $C_\mu = 0/99$ ، $s_k = 1$ و $s_\varepsilon = 1/3$ [۳]. به منظور تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ کنترل هیدرولیکی شامل اجزای ثابت و متحرک با سطوح موازی، مدل‌سازی هندسی سوپاپ فرمان هیدرولیکی ضرورت دارد. برای این منظور، از سوپاپ فرمان شامل یک جزء متحرک مخروطی با نشیمنگاه مایل دارای یک مجرای ورودی و یک مجرای خروجی استفاده می‌شود. در شکل ۲، نمایی کلی از مدل هندسی سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل اجزای متحرک و ثابت با سطوح موازی نشان داده شده است.



شکل ۲- مدل هندسی سوپاپ کنترل هیدرولیکی شامل اجزای ثابت و متحرک با سطوح موازی

داد که عدد رینولدز^۱ متناظر با جریان روغن عبوری از این سوپاپ هیدرولیکی بر اساس هندسه روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ، گرانروی و دبی روغن عبوری، در محدوده‌ی 10^3 تا 10^4 متغیر است. از این رو، رژیم سیال عبوری از روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ با سطوح ثابت و متحرک موازی، آشفته خواهد بود. معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان لزج، غیر قابل تراکم، غیر دائمی و آشفته درون محفظه‌ی سوپاپ فرمان، به شرح زیر تعریف می‌شوند [۳]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right] \quad (2)$$

نرم افزار انسیس فلونت^۲ شامل مجموعه‌ی گسترده و متنوعی از مدل‌های آشفتگی است. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که با توجه به هندسه و ساختار روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ کنترل هیدرولیکی با سطوح ثابت و متحرک موازی، عدد رینولدز بالای جریان روغن عبوری از سوپاپ و دربرگرفتن سطح مقطع روزنه توسط روغن، از مدل $k - \varepsilon$ برای شبیه‌سازی جریان آشفته در این سوپاپ استفاده می‌شود [۱۳]. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که از این مدل آشفتگی در پژوهش‌های مشابه برای تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ‌های کنترل هیدرولیکی استفاده شده است [۷ و ۱۲]. متغیرهای اصلی این مدل آشفتگی شامل انرژی جنبشی (k) و ضریب اضمحلال انرژی جنبشی (ε) است، که بر اساس روابط انتقال به شرح زیر بدست می‌آیند [۳ و ۷]:

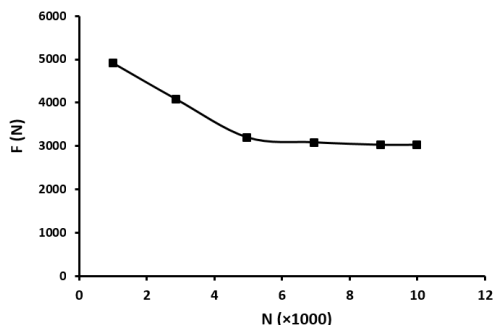
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + s_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + s_\varepsilon \quad (4)$$

¹ Reynolds

² Ansys fluent

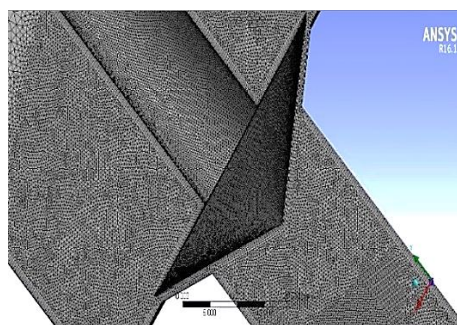
از متغیرهای وابسته ضرورت دارد [۷] و [۱۵]. برای این منظور، آزمون استقلال از شبکه برای نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاپ، در شرایطی که شیب نشیمنگاه سوپاپ، موقعیت جزء متحرک و فشار روغن در مجرای ورودی، به ترتیب برابر با، ۳۰ درجه، ۲/۵۴mm و ۱۰۰bar، باشند، انجام می‌گیرد. در شکل ۴، روند تغییرات نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاپ فرمان هیدرولیکی مورد نظر بر حسب تعداد المان‌های به کار رفته در حوزه محاسباتی، نشان داده شده است. مطابق شکل ۴، با افزایش تعداد المان‌ها، مقدار نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ، کاهش می‌یابد. در شرایطی که، تعداد المان‌های درون محفظه‌ی سوپاپ فرمان از مرز ۵ میلیون فراتر می‌رود، نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ تا حدود زیادی برابر با مقدار ثابتی خواهد بود. از این رو، با افزایش بیشتر تعداد المان‌ها در محدوده‌ی جریان روغن عبوری از سوپاپ، تغییر قابل ملاحظه‌ی در نیروی محوری وارد بر جزء متحرک ایجاد نمی‌گردد. در این صورت، تحلیل عددی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، مستقل از تعداد المان‌ها خواهد بود.



شکل ۴- روند تغییرات نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاپ فرمان هیدرولیکی بر حسب تعداد المان‌ها در حوزه‌ی محاسباتی

برای تحلیل عددی جریان روغن عبوری از روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل دو سطح ثابت و متحرک موازی، از بخش فلونت نرم افزار انسیس، به روش حجم محدود و توسط حل گر بر پایه‌ی فشار استفاده می‌شود. این روش با استفاده از حل یک معادله برای فشار، تضمین می‌کند که قانون بقای جرم در سراسر حوزه‌ی محاسباتی، ارضاء شده باشد. همچنین روش حل در نرم افزار، بر پایه

مطابق شکل ۲، حرکت جزء متحرک مخروطی در برابر نشیمنگاه شیب‌دار، موجب ایجاد یک روزنه‌ی قابل تنظیم به طول L، می‌گردد. به دلیل پیچیدگی و آشفتگی جریان روغن عبوری از سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی قابل تنظیم با سطوح ثابت و متحرک موازی، مدلسازی هندسی سوپاپ به صورت سه بعدی انجام می‌گیرد. پس از مدل‌سازی هندسی سوپاپ فرمان هیدرولیکی با سطوح ثابت و متحرک موازی، مش‌ریزی محفظه‌ی درونی سوپاپ انجام می‌شود. شبکه محاسباتی مناسب، یکی از مسائل اساسی در تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ‌های هیدرولیکی است [۳]. از این رو، با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری و ظرفیت رایانه‌های در دسترس، شبکه‌ی محاسباتی لازم است تا حد امکان کوچک انتخاب گردد. دامنه‌ی محاسباتی شامل مجرای ورودی، روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ، محفظه‌ی مرتبط با مجرای خروجی در بالادست روزنه، می‌باشد. با ورود مدل هندسی سوپاپ هیدرولیکی به نرم افزار انسیس و تعریف محدوده‌ی محاسباتی، مش‌ریزی در حوزه‌ی تعریف شده، توسط نرم افزار، مطابق شکل ۳، انجام می‌گیرد. بر اساس شکل ۳، در شبکه‌بندی مدل هندسی سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، از سلول‌های شش وجهی نامنظم استفاده شده است. با توجه به اهمیت جریان روغن عبوری از روزنه‌ی سوپاپ فرمان هیدرولیکی، تمرکز سلول‌ها در این ناحیه نسبت به سایر نواحی بالاتر است.



شکل ۳- مش‌ریزی محدوده‌ی محاسباتی سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی

برای اطمینان از دقت تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ فرمان هیدرولیکی، بررسی اثر تعداد المان‌ها بر یکی

فشار روغن در مجرای ورودی به ترتیب برابر با ۶۰ درجه، ۲/۵۴mm و ۱۰۰bar، در نظر گرفته می‌شوند.

- تأثیر انحنای ورودی نشیمنگاه سوپاپ بر متغیرهای وابسته: در این بخش، تأثیر وجود دو انحنای، ۲ و ۴ میلی‌متری در ناحیه‌ی ورودی روزهی قابل تنظیم در سوپاپ هیدرولیکی بر کمیت‌های وابسته مطالعه می‌شود. در این مرحله نیز، شیب نشیمنگاه، فاصله‌ی عمودی جزء متحرک تا سطح نشیمنگاه و فشار روغن در مجرای ورودی به ترتیب برابر با، ۶۰ درجه، ۲/۵۴mm و ۱۰۰bar، در نظر گرفته می‌شوند.

ضریب نیرو از مشخصه‌های استاتیکی جریان روغن در سوپاپ‌های فرمان هیدرولیکی به حساب می‌آید. ضریب نیرو از نسبت نیروی وارد بر جزء متحرک در جهت افزایش سطح مقطع روزهی ایجاد شده در سوپاپ و نیروی ناشی از اعمال فشار روغن بر سطح موثر جزء متحرک سوپاپ به دست می‌آید [۱۵]. ضریب جریان، برای تخمین دبی روغن عبوری از روزهی ایجاد شده توسط جزء متحرک به کار رفته در ساختار سوپاپ‌های کنترل هیدرولیکی بکار می‌رود، که از رابطه‌ی (۶)، بر حسب دبی روغن عبوری از سوپاپ و اختلاف فشار روغن در مجاری ورودی و خروجی آن، به دست می‌آید [۵]:

$$C_q = \frac{Q}{4\pi r_0 h \sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho}} \quad (6)$$

برای ارزیابی تجربی و صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزهی با سطوح ثابت و متحرک موازی، طراحی و ساخت سامانه‌ی نشان داده شده در شکل ۵، انجام می‌گیرد. مطابق شکل ۵، پمپ هیدرواستاتیک دبی متغیر A1۷VSO2۸ با بیشینه حجم جابجایی ۲۰cc، تامین روغن مورد نیاز مدار هیدرولیک را بر عهده دارد. روغن خروجی پمپ از طریق خطوط انتقال به مجرای ورودی سوپاپ ارسال می‌شود. برای امکان ارزیابی تجربی سوپاپ‌های فرمان متفاوت، ساخت اجزای متحرک با زوایای رأس ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و نشیمنگاه‌های با شیب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه انجام می‌گیرد. به منظور جلوگیری از افزایش فشار روغن در مجرای خروجی سوپاپ فرمان، روغن خروجی از سوپاپ، به طور مستقیم و از طریق لوله‌ی انتقال انعطاف‌پذیر با مقاومت اندک، به مخزن ارسال می‌شود. برای

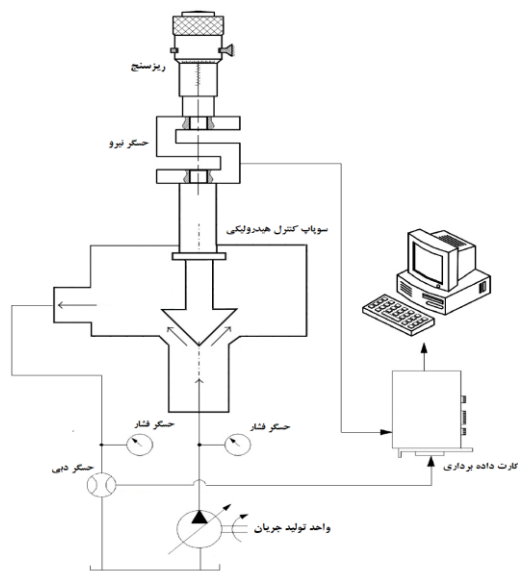
الگوریتم سرعت-فشار سیمپل انجام می‌گیرد. در تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزهی با سطوح ثابت و متحرک موازی، فرض‌های زیر بکار گرفته می‌شود:

- انجام شبیه‌سازی عددی در شرایط پایا.
- استفاده از روغن تراکم‌ناپذیر.
- عدم تغییر ویژگی‌های فیزیکی روغن.
- عدم وجود نشت روغن در سوپاپ فرمان.
- عدم زبری سطح دیواره‌های ثابت و متحرک سوپاپ.
- عدم انتقال حرارت بین روغن و دیواره‌های سوپاپ.

بعد از ایجاد مش در دامنه‌ی محاسباتی سوپاپ فرمان، تعریف شرایط مرزی ضرورت دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شرایط مرزی مناسب برای حل این مساله، شرط ورودی، سرعت جریان روغن و خروجی، فشار روغن است. فشار روغن در مجرای خروجی سوپاپ، برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین از شرط مرزی بدون لغزش در همه‌ی دیواره‌ها، شامل دیواره‌ی نشیمنگاه، دیواره‌ی جزء متحرک مخروطی و دیواره‌ی محفظه‌ی مرتبط با مجرای خروجی سوپاپ، استفاده می‌شود. در تحلیل‌های عددی و همچنین ارزیابی تجربی سوپاپ فرمان هیدرولیکی، از روغن با جرم مخصوص 870 kg/m^3 و گرانشی $40 \text{ mm}^2/\text{s}$ استفاده می‌شود. در این مقاله، تأثیر شیب یا زاویه‌ی رأس جزء متحرک سوپاپ فرمان، طول و شعاع انحنای نشیمنگاه در مجرای ورودی، بر توزیع سرعت و فشار جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، نیروی محوری وارد بر جزء متحرک، ضریب نیرو و جریان، در شرایط زیر، بررسی می‌شود:

- تأثیر شیب نشیمنگاه سوپاپ بر متغیرهای وابسته: برای این منظور، تأثیر سه شیب متفاوت نشیمنگاه شامل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه بر کمیت‌های وابسته، مورد بررسی قرار مطالعه می‌گردد. در این مرحله، فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ برابر با ۱۰۰bar و جزء متحرک، در فاصله‌ی ۲/۵۴mm از سطح نشیمنگاه قرار می‌گیرد.

- تأثیر طول نشیمنگاه سوپاپ بر متغیرهای وابسته: برای این منظور، تأثیر سه نشیمنگاه به طول‌های ۳، ۵ و ۱۰ میلی‌متر، بر عملکرد سوپاپ شامل روزهی با سطوح ثابت و متحرک موازی بررسی می‌گردد. در این مرحله از پژوهش، شیب نشیمنگاه، فاصله‌ی عمودی جزء متحرک تا سطح نشیمنگاه و



ب: مدار سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی
 شکل ۵- سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی برای
 ارزیابی تجربی سوپاب فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی
 با سطوح ثابت و متحرک موازی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر طول نشیمنگاه بر عملکرد سوپاب

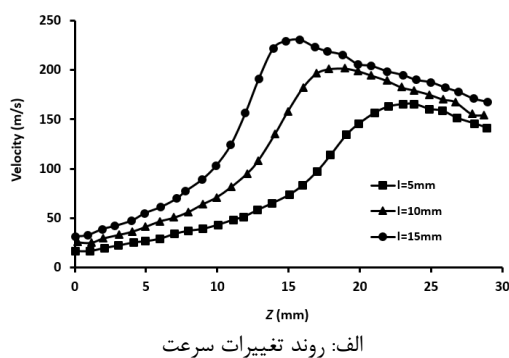
به منظور بررسی تأثیر طول نشیمنگاه بر عملکرد سوپاب فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، جزء متحرکی با زاویه‌ی رأس ۶۰ درجه که در فاصله‌ی ۲/۵۴ میلیمتری از سطح نشیمنگاه قرار دارد، بکارگرفته می‌شود. در شکل ۶، تأثیر طول نشیمنگاه بر روند تغییرات نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاب فرمان حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی به همراه نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان داده شده است. مطابق شکل ۶، با افزایش طول نشیمنگاه سوپاب، نیروی محوری وارد بر جزء متحرک مخروطی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با افزایش طول نشیمنگاه سوپاب، ضمن افزایش طول روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاب، سطح بیشتری از جزء متحرک در معرض فشار روغن قرار می‌گیرد. از این رو، مولفه‌ی نیروی ناشی از جریان روغن وارد بر جزء متحرک سوپاب در راستای عمودی با افزایش روبه‌رو می‌گردد. از سوی دیگر، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاب، به دلیل نشت محدود روغن از محفظه‌ی سوپاب و همچنین لقی بدنه‌ی سوپاب با راهنمای آن، به طور

تنظیم فشار روغن در مجرای ورودی سوپاب فرمان، سوپاب فشارشکن دو مرحله‌ای، مدل EDG۳-۰۳-L۱۰، بکار گرفته شده است. به منظور تعیین ضرایب جریان و نیرو در شرایط کاری مختلف، اندازه‌گیری فشار روغن در مجرای سوپاب فرمان، توسط حسگر STU۰۰۳۷۲۱ و اندازه‌گیری دبی روغن عبوری از سوپاب، توسط حسگر VC۱۶، انجام می‌گیرد. همچنین، برای تغییر و تنظیم موقعیت جزء متحرک سوپاب فرمان هیدرولیکی، از ریزسنجی با دقت ۰/۰۱ mm استفاده شده است. در ضمن، نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاب فرمان نیز، توسط حسگر SS۳۰۰ اندازه‌گیری می‌شود. مطابق شکل ۵، حسگر نیرو در حد فاصل ریزسنج و جزء متحرک الکتریکی خروجی از حسگرهای فشار، دبی و نیرو به کارت داده‌برداری مدل PCI۶۲۵۱ منتقل می‌شود. بدین ترتیب، پس از پردازش، اصلاح و تقویت جریان الکتریکی دریافتی توسط کارت داده‌برداری، ثبت و تحلیل متغیرهای فیزیکی در رایانه انجام می‌گیرد. از این رو، امکان مقایسه نتایج حاصل از حل عددی جریان روغن عبوری از سوپاب فرمان هیدرولیکی با نتایج تجربی و ارزیابی دقت عمل تحلیل عددی فراهم می‌گردد.

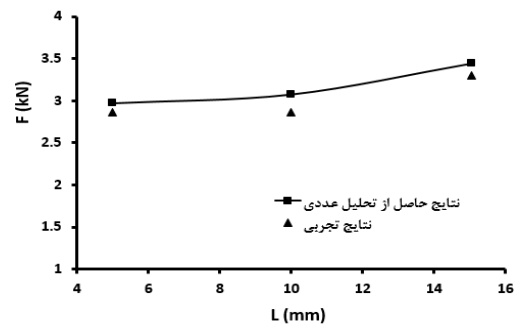


الف: نمای ظاهری سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی

پس از تایید دقت عمل تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، در شکل ۸، تأثیر طول نشیمنگاه بر روند تغییرات سرعت جریان و فشار روغن در محفظه‌ی سوپاپ نشان داده شده است. مطابق شکل ۸، سرعت جریان روغن در حین عبور از روزنه‌ی سوپاپ فرمان هیدرولیکی تا نقطه‌ی معینی در امتداد روزنه افزایش می‌یابد. سپس، سرعت جریان روغن با شیب ملایمی کاهشی خواهد بود. بر این اساس، با افزایش طول نشیمنگاه سوپاپ، بیشینه سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش طول نشیمنگاه، روند تغییرات سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، با شیب بیشتری دنبال می‌گردد. در مجموع، افزایش طول نشیمنگاه در سوپاپ، افزایش سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ را به همراه دارد. لازم به ذکر است که افزایش طول نشیمنگاه موجب جریان یکنواخت‌تر روغن در روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ و در نتیجه‌ی آن، افزایش سرعت جریان روغن عبوری از روزنه می‌گردد. مطابق شکل ۸، در ابتدای روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ، فشار روغن با شیب اندکی کاهش می‌یابد. سپس، در نواحی میانی روزنه، فشار روغن با شیب قابل توجهی کم می‌شود. همچنین، با افزایش طول نشیمنگاه، روند کاهشی فشار روغن در روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ، به دلیل جریان یکنواخت‌تر و سرعت بیشتر جریان روغن در روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ فرمان، با شیب بیشتری ادامه می‌یابد.

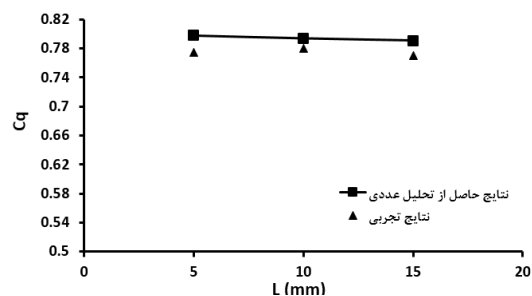


متوسط ۴ درصد کمتر از نتایج حاصل از تحلیل عددی روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ می‌باشند. به همین ترتیب، در این نمونه از سوپاپ‌های هیدرولیکی با افزایش طول نشیمنگاه، ضریب نیرو نیز، کاهش می‌یابد. ضریب نیرو برای سوپاپ فرمان شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی با طول‌های نشیمنگاه، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر، به ترتیب برابر با ۱/۷۵، ۱/۶۶ و ۱/۴۹ تعیین می‌گردد.



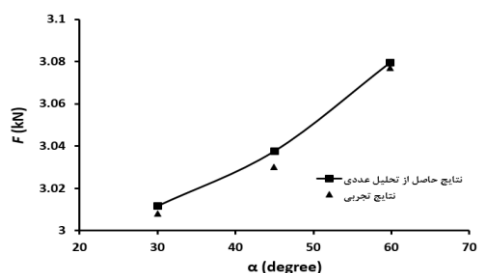
شکل ۶- تأثیر طول نشیمنگاه بر نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ فرمان هیدرولیکی

در شکل ۷ نیز تأثیر طول نشیمنگاه بر روی ضریب جریان سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، افزایش طول نشیمنگاه سوپاپ ضمن افزایش مقاومت در برابر جریان روغن، موجب کاهش ضریب جریان نیز می‌گردد. از سوی دیگر، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی ضریب جریان سوپاپ فرمان، به دلیل نشت روغن از راهنمای جزء متحرک، به طور متوسط ۵ درصد پایین‌تر از نتایج عددی گزارش می‌شود.



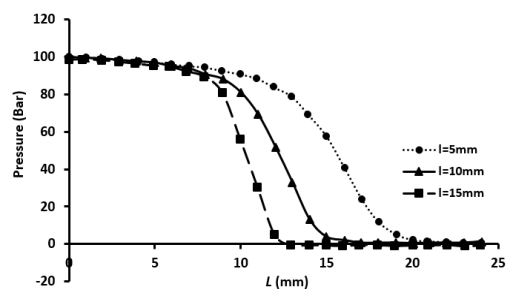
شکل ۷- تأثیر طول نشیمنگاه بر ضریب جریان سوپاپ

تأثیر شیب نشیمنگاه قرار می‌گیرد. بر اساس ارزیابی‌های تجربی در این پژوهش، نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ‌های شامل روزنه‌های با سطوح ثابت و متحرک موازی با شیب‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به سوپاپ‌های مشابه با نشیمنگاه قائم، به طور متوسط، ۲۰ درصد کمتر برآورد می‌گردد.



شکل ۹- تأثیر شیب نشیمنگاه بر نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ فرمان شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی

تأثیر شیب نشیمنگاه سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی بر ضریب جریان سوپاپ نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. افزایش شیب نشیمنگاه سوپاپ فرمان، ضمن تغییر در اندازه و موقعیت قرارگیری گردابه‌ها، موجب می‌گردد مقاومت بیشتری در برابر جریان روغن ایجاد نماید. از این رو، مطابق شکل ۱۰، با افزایش شیب نشیمنگاه، ضریب جریان، در روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ فرمان، کاهش می‌یابد. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد که سوپاپ فرمان شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی نسبت به سوپاپ شامل نشیمنگاه قائم مشابه، به دلیل جریان یکنواخت‌تر روغن و موقیت گردابه‌های ایجاد شده در محفظه‌ی سوپاپ، ضریب جریان بالاتری دارد. به بیانی دیگر، در شرایط هندسی مشابه، سوپاپ با نشیمنگاه مایل نسبت به سوپاپ با نشیمنگاه قائم دبی بیشتری را عبور می‌دهد. در شکل ۱۱، تأثیر شیب نشیمنگاه سوپاپ فرمان هیدرولیکی بر روند تغییرات سرعت جریان و فشار روغن عبوری از روزنه نشان داده شده است.

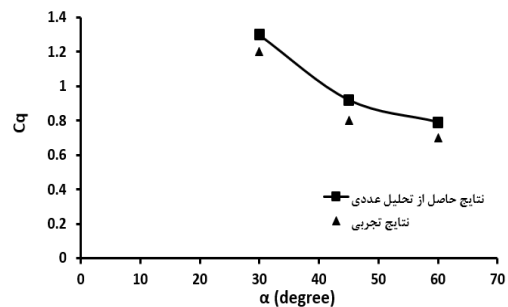


ب: روند تغییرات فشار
شکل ۸- تأثیر طول نشیمنگاه سوپاپ فرمان هیدرولیکی بر روند تغییرات سرعت جریان و فشار روغن در محفظه‌ی سوپاپ

۲-۳- بررسی تأثیر شیب نشیمنگاه بر عملکرد سوپاپ
به منظور بررسی تأثیر شیب نشیمنگاه بر عملکرد سوپاپ فرمان هیدرولیکی شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی، فشار روغن در مجرای ورودی برابر با ۱۰۰ بار در نظر گرفته می‌شود. همچنین، جزء متحرک سوپاپ برای ایجاد روزنه‌ی با سطوح موازی در فاصله‌ی ۲/۵۴mm از نشیمنگاه قرار داده می‌شود. در شکل ۹، تأثیر شیب نشیمنگاه بر نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاپ فرمان هیدرولیکی نشان داده شده است. مطابق شکل ۹، نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ فرمان هیدرولیکی، با افزایش شیب نشیمنگاه و افزایش سطح موثر جزء متحرک آن در برابر فشار روغن مجرای ورودی، افزایش می‌یابد. این در حالی است که، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی نیروی محوری وارد بر جزء متحرک سوپاپ، به دلیل فشار کمتر روغن ناشی از نشت جزئی روغن از محفظه‌ی سوپاپ، اندکی کمتر از نتایج حاصل از تحلیل عددی می‌باشند. از سوی دیگر، با افزایش شیب نشیمنگاه، ضریب نیرو، با کاهش روبه‌رو می‌گردد، به طوری که این ضریب برای سوپاپ‌های فرمان با شیب‌های نشیمنگاه، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، به ترتیب برابر با ۱/۷۲، ۱/۶۹ و ۱/۶۶ تعیین می‌شود. با توجه به تأثیرپذیری نیروی محوری وارد بر جزء متحرک مخروطی از الگوی جریان روغن عبوری، ضریب نیرو نیز به طور عکس تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ فرمان شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی نسبت به سوپاپ شامل نشیمنگاه قائم، به دلیل جریان آرام‌تر روغن از روزنه ایجاد شده در سوپاپ و در نتیجه‌ی آن، توزیع یکنواخت‌تر فشار روغن، به میزان کمتری تحت

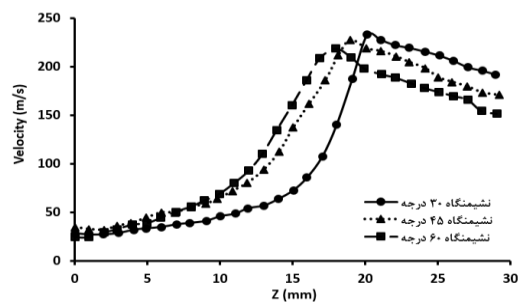
متناظر با بیشینه سرعت، با شیب بیشتری افزایش می‌یابد (تا پیش از نقطه بیشینه‌ی سرعت در روزنه، افزایش شیب نشیمنگاه، موجب جریان سریع‌تر روغن در نقاط مختلف روزنه می‌گردد. این در حالی است که بعد از نقطه‌ی بیشینه سرعت جریان روغن عبوری از روزنه، افزایش شیب نشیمنگاه، کاهش سرعت جریان در نقاط مختلف روزنه را به همراه دارد).

- با افزایش شیب نشیمنگاه، روند کاهش فشار روغن با شیب ملایم‌تری انجام می‌گیرد.

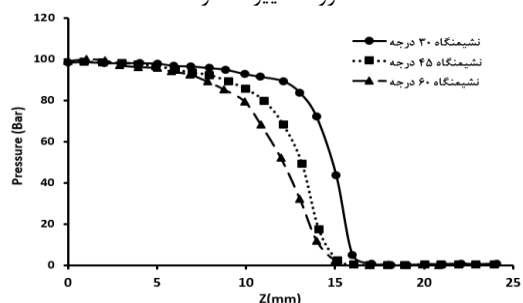


شکل ۱۰- تأثیر شیب نشیمنگاه بر ضریب جریان سوپاپ فرمان شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی

۳-۳- بررسی تأثیر انحنای نشیمنگاه بر عملکرد سوپاپ
 به منظور بررسی تأثیر انحنای نشیمنگاه (R) در مجرای ورودی جریان روغن بر عملکرد سوپاپ فرمان شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی از جزء متحرک مخروطی با زاویه‌ی رأس ۶۰ درجه استفاده می‌شود. در شکل ۱۲، تأثیر اندازه‌ی انحناء در مجرای ورودی سوپاپ فرمان بر روی نیروی محوری وارد بر جزء متحرک مخروطی نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۲، با ایجاد انحنای ۲ میلیمتری در مجرای ورودی، نیروی محوری وارد بر جزء متحرک مخروطی سوپاپ در حدود ۳۶ درصد کاهش می‌یابد. این در حالی است که با تغییر انحناء در مجرای ورودی، نیروی وارد بر جزء متحرک تغییر چندانی ندارد. انحناء در مجرای ورودی سوپاپ فرمان، موجب افزایش سطح مقطع موثر برای عبور جریان روغن و در نتیجه‌ی آن، کاهش سرعت جریان می‌گردد. بدین ترتیب، نیروی وارد بر جزء متحرک به دلیل کاهش تکان ناشی از جریان روغن عبوری از روزنه و کاهش تغییرات سرعت در این ناحیه، با کاهش روبه‌رو می‌گردد. مطابق شکل ۱۲، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی نیروی وارد بر جزء متحرک، اختلاف اندکی با نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ دارد. همچنین، ضریب نیرو در حالت بدون انحنای نشیمنگاه سوپاپ برابر با ۱/۶۶ و در شرایطی که شعاع انحنای ۲ و ۴ میلیمتری بر نشیمنگاه سوپاپ ایجاد می‌گردد، به ترتیب برابر با ۲/۶ و ۲ برآورد می‌شود.



الف: روند تغییرات سرعت

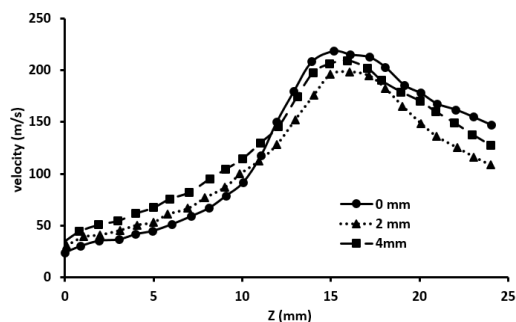


ب: روند تغییرات فشار

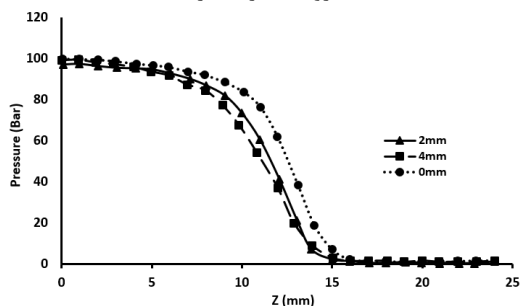
شکل ۱۱- تأثیر شیب نشیمنگاه سوپاپ فرمان هیدرولیکی بر روند تغییرات سرعت جریان و فشار روغن در محفظه‌ی سوپاپ

برخی نتایج حاصل از بررسی شکل ۱۱ به شرح زیر است:
 - با افزایش شیب نشیمنگاه، بیشینه سرعت جریان روغن عبوری از روزنه‌ی سوپاپ فرمان به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان روغن کاهش می‌یابد.
 - با افزایش شیب نشیمنگاه، موقعیت بیشینه سرعت جریان روغن عبوری از روزنه به ابتدای روزنه نزدیک‌تر می‌شود.
 - با افزایش شیب نشیمنگاه، سرعت جریان روغن عبوری از روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ فرمان تا پیش از نقطه‌ی

محفظه‌ی سوپاپ، به دلیل افزایش سطح مقطع موثر روزنه‌ی ایجاد شده در سوپاپ می‌گردد. این در حالی است که وجود انحناء در مجرای ورودی سوپاپ، تأثیر قابل توجهی بر روی موقعیت نقطه‌ی متناظر با بیشینه سرعت جریان روغن عبوری در محفظه‌ی سوپاپ ندارد. همچنین، ایجاد انحناء در مجرای ورودی سوپاپ موجب تغییر شیب روند تغییرات سرعت جریان روغن در بالادست و پایین‌دست روزنه می‌گردد. در بخش ابتدایی روزنه، انحناء در مجرای ورودی، موجب می‌گردد که به دلیل نوع رژیم جریان، روغن با سرعت بیشتری حرکت نماید.



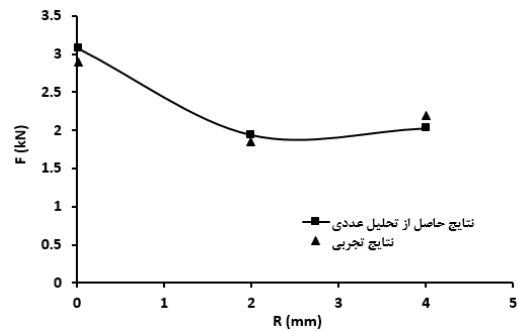
الف: روند تغییرات سرعت



ب: روند تغییرات فشار

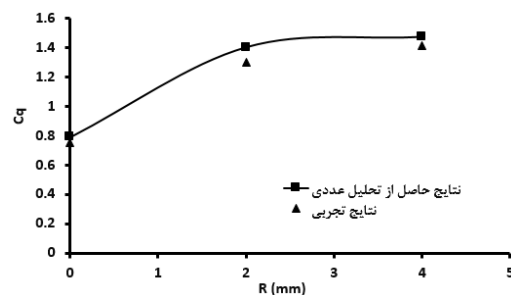
شکل ۱۴- تأثیر انحنای نشیمنگاه بر روند تغییرات سرعت جریان و فشار روغن عبوری از روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی

مطابق شکل ۱۴، روند تغییرات سرعت جریان روغن در محفظه‌ی سوپاپ شامل انحنای ۴ میلیمتری در مجرای ورودی در سطح بالاتری نسبت به سوپاپ با انحنای ۲ میلیمتری قرار دارد. انحنای بیشتر در مجرای ورودی سوپاپ موجب ورود جریان با سرعت بیشتر به محفظه‌ی سوپاپ به دلیل جریان یکنواخت‌تر و مقاومت کمتر در برابر جریان روغن می‌گردد. این در حالی است که، با افزایش شعاع انحناء در مجرای ورودی



شکل ۱۲- تأثیر شعاع انحنای نشیمنگاه بر نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی

شکل ۱۳ نیز تأثیر انحنای نشیمنگاه در مجرای ورودی بر ضریب جریان سوپاپ فرمان با سطوح ثابت و متحرک موازی نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۳، ایجاد انحناء و افزایش انحناء در مجرای ورودی سوپاپ، به طور متوسط، موجب افزایش ۷۰ درصدی ضریب جریان، به دلیل وجود مقاومت کمتر در برابر جریان روغن، می‌گردد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ضریب نیروی سوپاپ نسبت به ضریب جریان آن، به مقدار کمتری تحت تأثیر انحناء در مجرای ورودی سوپاپ قرار می‌گیرد. نزدیکی نتایج تجربی به نتایج عددی نشان از دقت عمل تحلیل عددی در این شرایط دارد.



شکل ۱۳- تأثیر شعاع انحنای نشیمنگاه بر ضریب جریان سوپاپ شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی

در شکل ۱۴، تأثیر انحنای نشیمنگاه در مجرای ورودی سوپاپ شامل روزنه‌ی با سطوح ثابت و متحرک موازی بر روند تغییرات سرعت جریان و فشار روغن در محفظه‌ی سوپاپ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۴، ایجاد انحناء در مجرای ورودی، موجب کاهش بیشینه سرعت جریان روغن در

سوپاپ، فشار روغن در محفظه‌ی عبور جریان با شیب ملایم‌تری تغییر می‌کند. در شرایط مشابه با افزایش انحنا در مجرای ورودی سوپاپ، فشار روغن در تمامی نقاط متناظر محفظه‌ی سوپاپ کاهش می‌یابد.

می‌گردد.

- افزایش طول، شیب و انحناى نشیمنگاه، موجب افزایش شیب نمودار افت فشار در سوپاپ فرمان هیدرولیکی می‌گردد.

فهرست علائم

A	سطح مقطع، m^2
C_F	ضریب نیرو، -
C_q	ضریب جریان، -
F	نیروی ناشی از جریان روغن، N
h	موقعیت جزء متحرک نسبت به نشیمنگاه، mm
k	انرژی جنبشی، J
L	طول نشیمنگاه، mm
P_i	فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ، bar
P_o	فشار روغن در مجرای خروجی سوپاپ، bar
Q	دبی روغن، m^3s^{-1}
R	شعاع انحنا در مجرای ورودی سوپاپ، mm
r_o	شعاع مجرای ورودی سوپاپ، mm
u	سرعت، ms^{-1}
α	شیب نشیمنگاه، درجه
ϵ	ضریب اضمحلال انرژی جنبشی
μ	لزجت، m^2/s
μ_t	لزجت آشفتگی
ρ	جرم مخصوص روغن، kgm^{-3}

مراجع

- [۱] نیک اندیش پ، (۱۳۹۵) عضوهای منطقی در هیدرولیک. انتشارات دانشگاه صنعتی جندی شاپور. دزفول.
- [۲] نیک اندیش پ، (۱۳۹۵) هیدرولیک مهندسی. انتشارات دانشگاه صنعتی جندی شاپور. دزفول.
- [3] Bazsó C, Hos CJ (2015) On the static instability of liquid poppet valves. *Periodica Polytechnic Mechanical Engineering* 59(1): 1-7.
- [4] Zhang ZH, Su Q, Li HB, Fang ZF (2022) Optimized design of diversion structure for low hydraulic valve core of proportional servo valve. *Flight Control Detect*, 5(1): 8–15.
- [5] Costa GK, Sepehri N (2017) A critical review of the existing models for direct operated hydraulic relief valves with the proposal of a new modelling approach. *Int. J. Fluid Power* 18: 142-153.

۴- نتیجه‌گیری

امروزه، سوپاپ‌های فرمان هیدرولیکی شامل روزهی با سطوح ثابت و متحرک موازی، به طور گسترده‌ای برای تغییر وضعیت سوپاپ‌های کنترل فشار دو مرحله‌ای بکار گرفته می‌شوند. برای بهینه‌سازی این سوپاپ‌ها و دستیابی به عملکرد مطلوب در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، بررسی و تحلیل مشخصات جریان روغن عبوری از آنها، اهمیت دارد. از این رو، در این پژوهش، تأثیر برخی مشخصات هندسی مانند شیب، طول و انحناى نشیمنگاه سوپاپ بر توزیع فشار و سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ، ضریب جریان، ضریب نیرو و در نهایت، نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ، به روش عددی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. برای اطمینان از دقت تحلیل عددی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ فرمان هیدرولیکی، طراحی و ساخت سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر جزء متحرک و همچنین، ضریب جریان سوپاپ در دستور کار قرار گرفت. برخی از نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- در همه شرایط کاری، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی ضریب جریان و نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ فرمان، انطباق قابل قبولی با نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ دارند.

- نیروی وارد بر جزء متحرک و ضریب نیروی سوپاپ، با افزایش شیب و طول نشیمنگاه، به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. این در حالی است که افزایش انحناى نشیمنگاه، کاهش نیروی وارد بر جزء متحرک سوپاپ و افزایش ضریب نیرو را به همراه دارد.

- ضریب جریان سوپاپ رابطه‌ی معکوسی با طول و شیب نشیمنگاه و رابطه‌ی مستقیمی با انحناى نشیمنگاه دارد.

- با افزایش طول نشیمنگاه، بیشینه سرعت جریان روغن عبوری از روزهی با سطوح ثابت و متحرک موازی افزایش می‌یابد، در حالی که، با افزایش شیب و انحناى نشیمنگاه، بیشینه سرعت جریان روغن در روزهی سوپاپ، با کاهش روبه‌رو

- [11] Bernad S, Muntean S, Susan-Resiga R, Anton I (2004) Vortex flow analysis in poppet valve chamber. The 6th Int. Con. on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara, Romania, October 21 -22.
- [12] Sandor I, Susan-Resiga R (2012) Numerical model for cavitation flow in hydraulic poppet valves. *J. Modelling and Simulation in Engineering* 6: 1-10.
- [13] Finesso R, Rundo M (2017) Numerical and experimental investigation on a conical poppet relief valve with flow force compensation. *Int. J. Fluid Power* 18(2): 111-122.
- [14] Zhao RH, Lian ZS, Liao YY (2022) Design and experimental study of water hydraulic valve port based on flow force. *Machin Tool and Hydraulics* 50 (1): 1-6.
- [15] Liu J, Xie H, Hu L, Yang H, Fu X (2017) Flow force regulation of the main poppet in a large flow load control valve. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: J. of Power and Energy* 231(8): 706 – 720.
- [6] Han M, Liu Y, Zheng K, Ding Y, Wu D (2020) Investigation on the modeling and dynamic characteristics of a fast-response and large-flow water hydraulic proportional cartridge valve. *J. Mech. Eng. Sci.*, 234(22): 4415–4432.
- [7] Liu J, Li R, Ding X, Liu Q (2022) Flow force research and structure improvement of cartridge valve core based on CFD method. *Heliyon* 8(11): 1-13.
- [8] Amirante R, Moscatelli PG, Catalano LA (2007) Evaluation of the flow forces on a direct (single stage) proportional valve by means of a computational fluid dynamic analysis. *Energy Conversion and Management* 48(3): 942-953.
- [9] Gomez I, Gonzalez-Mancera A, Newell B, Garcia-Bravo J (2019) Analysis of the Design of a Poppet Valve by Transitory Simulation. *Energies* 12(5): 889-907.
- [10] Scheffel G (1978) Dynamically counteracting a direct-acting conical seat valve under the influence of the geometry of the closing element. *Oil-Hydraulic and Pneumatic* 5: 280-282.