

تحلیل تجربی و عددی عملکرد سوپاپ هیدرولیکی شامل پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز

پژمان نیک اندیش* استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران، pn1356@gmail.com

محمد میرزاوند دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران، m.mirzavand1985@gmail.com

چکیده

به منظور بهینه‌سازی عملکرد سوپاپ‌های شامل پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، در مدارهای انتقال توان هیدرولیکی، بررسی ویژگی‌های جریان روغن عبوری از آنها، ضرورت دارد. در این مقاله، تاثیر زاویه راس و جابجایی پاپت مخروطی و فشار روغن ورودی به سوپاپ، بر توزیع فشار و سرعت جریان روغن در محفظه سوپاپ و نیروی محوری وارد بر پاپت مخروطی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور اطمینان از دقت عمل تحلیل عددی، نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی وارد بر پاپت مخروطی با نتایج عددی مقایسه می‌شوند. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش زاویه راس و جابجایی پاپت مخروطی، بیشینه سرعت جریان روغن عبوری از سوپاپ با کاهش روبه رو می‌گردد. همچنین، افزایش زاویه راس پاپت، موجب اعمال نیروی محوری بیشتر بر عضو متحرک سوپاپ مخروطی می‌گردد. انطباق مناسب بین نتایج تجربی با نتایج حاصل از حل عددی، نشان از دقت عمل روند حل عددی مساله دارد. از طرفی، جابجایی پاپت در سوپاپ‌های با نشیمنگاه لبه تیز، اثر معکوسی بر نیروی وارد بر عضو متحرک پاپتی دارد.

واژه‌های کلیدی: پاپت، نیروی ناشی از جریان، توزیع فشار، توزیع سرعت، نشیمنگاه لبه تیز، تحلیل عددی.

Experimental and Numerical Analysis of the Performance of the Hydraulic Valve Including Conical Poppet with the Sharp Edge Seat

P. Nikandish

Department of Mechanical Engineering, Jundi Shapur University of technology, Dezful, Iran

M. Mirzavand

Department of Mechanical Engineering, Jundi Shapur University of technology, Dezful, Iran

Abstract

In order to optimize the performance of valves including conical poppet with sharp seat in hydraulic power transmission circuits, it is necessary to examine the properties of the oil flow passing through them. In this paper, influence of the vertex angle and displacement of the poppet conical and pressure of the valve inlet oil on the distribution of the pressure and velocity of the oil flow in the valve chamber and the axial force applied to the conical poppet, are evaluated. To ensure the accuracy of numerical analysis, the results of the measured force on the conical poppet are compared with the numerical results. Studies showed that increasing the angle of cone and displacement of the poppet, the maximum speed of the flow of oil through the valve is reduced. Also, increasing the angle of poppet leads to an increase in the axial force on the movable member of the conical valve. A good agreement between the experimental results with the numerical results indicates the accuracy of the numerical solution of the problem. On the other hand, the displacement of the poppet in valves with a sharp edges seat has an inverse effect on the force applied to the moving poppet member.

Keywords: Poppet, Flow Force, Distribution of Pressure, Distribution of Velocity, Sharp Edge Seat, Numerical Analysis.

متحرک پاپتی انجام می‌گیرد. از این رو، با قرارگیری عضو متحرک پاپتی بر روی نشیمنگاه، ارتباط بین دو مجرای سوپاپ هیدرولیکی قطع می‌گردد. برای ایجاد ارتباط بین دو مجرای سوپاپ، عضو متحرک پاپتی، به وسیله مکانیزم ویژه‌ای از نشیمنگاه خود، فاصله می‌گیرد و بدین ترتیب، امکان جریان روغن بین دو مجرای سوپاپ فراهم می‌گردد [۱]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نشت روغن بین مجاری سوپاپ‌های هیدرولیکی با ساختار پاپتی، به دلیل قرارگیری کامل و بدون درز عضو متحرک پاپتی بر روی نشیمنگاه، به طور قابل توجهی کمتر از سوپاپ‌های با ساختار اسپولی است. این ویژگی سوپاپ‌های هیدرولیکی با ساختار پاپتی، موجب به‌کارگیری گسترده‌ی عضوهای متحرکی پاپتی در سوپاپ‌های کنترل فشار و یک طرفه شده است [۲]. به طور معمول، از عضوهای متحرک پاپتی در سه شکل، کروی، دیسکی (صفحه‌ای) و مخروطی در ساختار سوپاپ‌های کنترل هیدرولیکی استفاده می‌شود. پاپت‌های مخروطی به دلیل پایداری دینامیکی و ایجاد اختلاف فشار

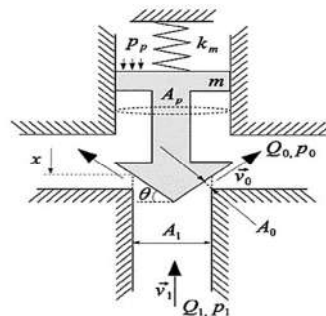
۱- مقدمه

در سامانه‌های هیدرولیکی مورد استفاده در صنعت، ورود و خروج و تنظیم مقدار روغن عبوری در بخش‌های مختلف، از اهمیت زیادی برخوردار است. مهمترین وظیفه سوپاپ‌های هیدرولیک، تعیین مقدار دقیق سیال ورودی به عملگرها می‌باشد [۱]. سوپاپ‌های هیدرولیک به سه دسته اصلی، شامل، سوپاپ‌های کنترل جهت، سوپاپ‌های کنترل فشار و سوپاپ‌های کنترل جریان تقسیم می‌شوند. این سوپاپ‌ها به طور کلی، به دو صورت سوپاپ‌های اسپولی^۱ یا لغزشی و سوپاپ‌های پاپتی^۲ تولید و عرضه می‌شوند [۲]. قطع و برقراری ارتباط بین دو مجرای ورودی و خروجی سوپاپ‌های هیدرولیکی با ساختار پاپتی، توسط عضو

^۱ Spool

^۲ Poppet

روغن کمتر در مجاری ورودی و خروجی، نسبت به دو نمونه‌ی دیگر، به صورت گسترده‌تری در سوپاپ‌های کنترل هیدرولیکی به کار گرفته می‌شوند [۳]. از سوی دیگر، نمونه‌های متفاوتی از پاپت‌های مخروطی شکل برای به‌کارگیری در ساختار سوپاپ‌های هیدرولیکی توسط شرکت‌های سازنده، تولید و عرضه می‌شوند. برخی از این نمونه‌ها شامل پاپت‌های مخروطی ساده، پاپت‌های مخروطی لبه‌دار، پاپت‌های مخروطی ناقص می‌باشند. همچنین، از دو نشیمنگاه لبه تیز و مایل برای استقرار انواع پاپت‌های مخروطی در سوپاپ‌های هیدرولیکی، استفاده می‌شود. در شکل ۱ ساختار داخلی سوپاپ هیدرولیکی شامل پاپت مخروطی ساده با نشیمنگاه لبه تیز نشان داده شده است [۴].



شکل ۱- سوپاپ هیدرولیکی شامل پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز [۴]

تحلیل جریان روغن عبوری از سوپاپ‌های پاپتی، با وجود هندسه‌ی ساده، دارای پیچیدگی‌های خاصی است. به دلیل تغییرات ناگهانی در مقدار و جهت سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ پاپتی، جت جریان روغن خروجی از تنگنای ایجاد شده توسط پاپت و نشیمنگاه، گردابه‌های مختلفی ایجاد می‌گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که توسعه‌ی گردابه‌ها و روند تغییرات آنها درون محفظه‌ی سوپاپ پاپتی مخروطی، تابعی از جابه‌جایی و موقعیت عضو متحرک پاپتی می‌باشد [۵]. از سوی دیگر، پایداری سوپاپ با ساختار پاپتی، تحت تأثیر اصطکاک و نیروهای ناپایستار، نیروی فنر، نوسانات فشار روغن در مجرای ورودی و تغییر رژیم جریان قرار دارد [۶]. از این رو، به‌منظور تعیین و ایجاد نیروی لازم برای حرکت عضو متحرک سوپاپ با ساختار پاپتی، پیش‌بینی دقیق نیروهای مختلف وارد بر پاپت، از جمله، نیروی ناشی از جریان سیال اهمیت دارد [۱]. یکی از پارامترهای بسیار مؤثر بر عملکرد سوپاپ با ساختار پاپتی، هندسه و زاویه رأس پاپت است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، نیروی ناشی از جریان روغن وارد بر عضو متحرک سوپاپ، دبی جریان روغن عبوری از تنگنای ایجاد شده در سوپاپ، اختلاف فشار روغن در بالادست و پایین دست سوپاپ و همچنین، پایداری اجزای متحرک سوپاپ، تحت تأثیر زاویه رأس پاپت، قرار دارند [۷].

برای بررسی عملکرد سوپاپ‌های کنترل فشار، کنترل جریان و کنترل جهت، شامل پاپت‌های مختلف و متنوع، پژوهش‌های مختلفی انجام گرفته است. از این رو، در این بخش، به نتایج حاصل از برخی پژوهش‌ها، در زمینه‌ی، تجزیه و تحلیل نیروی وارد بر عضو متحرک سوپاپ‌های پاپتی، بهینه‌سازی، طراحی، ساخت و کنترل سوپاپ‌های پاپتی اشاره می‌شود.

علیرضا نادری قمی در سال ۱۳۹۳ در مقاله‌ای به تحلیل عددی جریان سیال درون دستگاه لوله‌ی گردابی و تأثیر به‌کارگیری سوپاپ کنترل مخروطی بر عملکرد آن پرداخت. در این مطالعه، تغییرات دما و سرعت جریان سیال در بخش‌های مختلف ورتکس تیوب با جریان مخالف، مورد بررسی قرار گرفت [۸].

باژو و هاس در سال ۲۰۱۳، تحلیل استاتیکی (نیروی جریان و ضریب تخلیه) و دینامیکی جریان روغن درون محفظه‌ی سوپاپ هیدرولیکی با ساختار پاپتی را به صورت تجربی، و تحت تأثیر رینولدزهای مختلف جریان مورد بررسی قرار دادند. آنها، همچنین تغییرات فشار روغن و نیروی وارد بر عضو متحرک سوپاپ را مطالعه نمودند [۹]. آنها دریافتند که با افزایش دبی جریان روغن عبوری از سوپاپ و افزایش اختلاف فشار در دو سوی آن، بزرگی نیروی ناشی از جریان روغن افزایش خواهد یافت. بررسی نتایج آنها نشان داد که در دبی‌های بالای جریان روغن، سوپاپ با ساختار پاپتی، پایدارتر عمل می‌کند و نوسانات کمتری دارد. به عبارت دیگر، با کاهش دبی روغن، سوپاپ پایداری خود را به تدریج از دست خواهد داد. آنها به این نتیجه رسیدند که با تنظیم نیروی اولیه‌ی فنر، مشکل ناپایداری سوپاپ در جریان‌های عبوری کم، تا حدود زیادی قابل حل است [۹]. باژو و هاس در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۵، پایداری یک سوپاپ با ساختار پاپتی را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. هدف آنها، بررسی تأثیر هندسه‌ی سوپاپ، تراکم اولیه‌ی و ثابت فنر، بر پایداری سوپاپ و همچنین ایجاد نوسانات کمتر در سوپاپ بود. بررسی‌های آنها نشان داد که با انتخاب مناسب هندسه‌ی سوپاپ و محدود کردن نیروی فنر، پایداری بهبود می‌یابد. طبق نتایج حاصل از پژوهش باژو و هاس، دو کمیت، ثابت و تراکم اولیه‌ی فنر، بر پایداری سوپاپ مؤثر می‌باشند [۶]. ساندور و سوزان رسیگا در سال ۲۰۱۲، به بررسی جریان روغن درون یک سوپاپ کنترل هیدرولیکی شامل پاپت مخروطی با هندسه و مشخصات معین، به روش عددی پرداختند. هدف آنها، بررسی مکان شکل‌گیری گردابه‌های جریان درون محفظه‌ی سوپاپ و اختلاف فشار جریان در دو مجرای سوپاپ بود. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که گردابه‌های جریان در نواحی مختلفی از مجرای خروجی سوپاپ شکل می‌گیرند [۷].

چن و استوفل در سال ۲۰۰۴، کاویتاسیون در یک سوپاپ کنترل جهت شامل پاپت مخروطی را در حین برقراری ارتباط مجاری اصلی سوپاپ به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها، جریان روغن درون سوپاپ با ساختار پاپتی را ناپایا فرض کرده و از نظریه‌ی k-ε برای تحلیل جریان آشفته روغن استفاده کردند. بررسی‌های آنها نشان داد که با افزایش فشار روغن در مجرای خروجی سوپاپ، تا حدود زیادی از وقوع کاویتاسیون جلوگیری به عمل می‌آید [۱۰].

ژوریچ و همکارانش در سال ۲۰۱۰، به بررسی تأثیر زاویه‌ی رأس پاپت بر کمیت‌های دینامیکی یک سوپاپ با ساختار پاپت مخروطی تحت تأثیر نیروی فنر پرداختند. بررسی‌های اولیه‌ی آنها نشان داد که در ابتدای برقراری جریان روغن در سوپاپ و ارتباط مجاری آن، فشار روغن در مدار هیدرولیکی و همچنین سرعت و شتاب حرکت عضو متحرک سوپاپ، به شدت دچار نوسان می‌شوند [۱۱].

پسندیده فرد و معین در سال ۲۰۰۸، به تحلیل عددی و بررسی نیروی ناشی از جریان روغن در سوپاپ با ساختار پاپت مخروطی، در

کنترل در سوپاپ پاپتی نشان داده شده در شکل ۱ و نظریه‌ی انتقال، توسط رابطه‌ی (۱) تعیین می‌گردد [۱۰]:

$$F_M = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho \vec{V} dV + \int_{CS} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS \quad (1)$$

در سمت راست رابطه‌ی (۱)، جمله‌ی اول، بیان‌گر نرخ تغییرات اندازه‌ی حرکت در حجم کنترل (CV) و جمله‌ی دوم، عبارت مربوط به اندازه‌ی حرکت جریان خالص عبوری از سطح کنترل (CS) می‌باشد. در ارتباط با نیروی محوری وارد بر پاپت مخروطی به کار رفته در ساختار سوپاپ‌های هیدرولیکی با نشیمنگاه لبه تیز، ضریب نیرو (C_F)، یکی از مشخصه‌های استاتیکی این سوپاپ‌ها محسوب می‌گردد. ضریب نیرو، برابر نسبت نیروی ناشی از جریان روغن در سوپاپ‌های پاپتی (F_P)، به نیروی ناشی از فشار روغن بر سطح موثر عضو متحرک پاپتی (F_T) تعریف می‌گردد [۱۴]. مطابق شکل ۱، جریان روغن عبوری از سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز (Q)، متأثر از سطح مقطع عبور جریان در تنگنای ایجاد شده توسط پاپت (A₀)، ضریب تخلیه (C_Q)، جرم مخصوص روغن (ρ) و اختلاف فشار روغن در دو سوی سوپاپ (ΔP) است [۱]:

$$Q = C_Q A_0(x) \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

ضریب دبی یا ضریب تخلیه (C_Q)، به کمیت‌های مختلفی از جمله اصطکاک بین روغن و جداری تنگنا، لزجت روغن، نوع و شکل تنگنا بستگی دارد. بر اساس رابطه‌ی (۲)، برای تخمین دبی روغن عبوری از تنگنای ایجاد شده توسط عضو متحرک پاپتی در سوپاپ‌های کنترل هیدرولیکی، تعیین ضریب تخلیه، اهمیت فراوانی دارد [۱۴].

با فرض، تغییرات بسیار اندک در جرم مخصوص روغن، روابط پایستگی جرم و اندازه‌ی حرکت برای روغن غیر قابل تراکم جاری در سوپاپ کنترل هیدرولیکی شامل پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز به شرح زیر است [۱۵]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (\vec{V}) + \nabla \cdot (\vec{V} \times \vec{V}) \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (4)$$

در معادله‌ی (۴)، تنش برشی اعمال شده (τ) نیز به کمک رابطه (۵) تعیین می‌گردد [۱۵]:

$$\vec{\tau} = \mu \left(\nabla \times \vec{V} + (\nabla \times \vec{V})^T \right) \quad (5)$$

روغن در سوپاپ‌های هیدرولیک شامل پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، به دلیل مقدار بالای عدد رینولدز، به صورت آشفته در جریان است [۱۵]. برای مدل‌سازی جریان آشفته‌ی روغن درون محفظه‌ی سوپاپ پاپتی، متوسط‌گیری زمانی معادلات حاکم بر جریان سیال، ضرورت دارد. برای این منظور، هر کمیت از جریان سیال، در هر لحظه، برابر مجموع دو جزء متوسط و نوسانی آن به شرح زیر خواهد بود:

$$V = \bar{V} + \tilde{V}, P = \bar{P} + \tilde{P}, \tau = \bar{\tau} + \tilde{\tau} \quad (6)$$

بدین ترتیب معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس (RANS) حاکم بر جریان روغن درون محفظه‌ی سوپاپ پاپتی به شرح زیر به دست می‌آیند [۱۶]:

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (\bar{V}) + \nabla \cdot (\bar{V} \times \bar{V}) \right) = -\nabla \bar{P} + \nabla \cdot \left(\bar{\tau} - \rho (\bar{V} \times \bar{V}) \right) \quad (8)$$

حالت ناپایا پرداختند. برای این منظور، آنها از پنج پاپت با زوایای رأس ۲۲/۵، ۳۰، ۳۸/۵، ۴۵ و ۶۷/۵ درجه استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که، در دبی‌های پایین جریان روغن عبوری از سوپاپ، تغییر زاویه رأس پاپت مخروطی، تأثیر چندانی بر بزرگی نیروی ناشی از جریان وارد بر عضو متحرک سوپاپ ندارد [۱۲].

کاستا و سهپری نیز در سال ۲۰۱۷، مدل ریاضی جدیدی برای پیش بینی نیروی ناشی از جریان روغن عبوری از سوپاپ فشارشکن با ساختار پاپتی ارائه نمودند. در این پژوهش، تنگنای ایجاد شده توسط پاپت در سوپاپ فشارشکن را یک تنگنای متغیر در نظر گرفتند که سطح مقطع آن متناسب با فشار روغن در مجرای ورودی تغییر می‌کند. آنها دریافتند که مدل جدید نسبت به مدل های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین، به خوبی عملکرد گذرای سوپاپ فشارشکن را پیش بینی می‌کند [۴].

یانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۱، به تأثیر قابل توجه هندسه پاپت مخروطی بر ویژگی‌های جریان روغن عبوری از سوپاپ کنترل جریان شامل عضو متحرک پاپتی و نشیمنگاه لبه تیز پی بردند [۱۳].

پژوهش‌های گذشته غالباً بر بهبود پایداری سوپاپ‌های با ساختار پاپتی و اصلاح رفتار دینامیکی آنها متمرکز بوده است. در این پژوهش در نظر است تأثیر کمیت های هندسی و جریانی روغن، بر روی توزیع فشار روغن در محفظه درونی سوپاپ با ساختار پاپتی شامل نشیمنگاه لبه تیز و همچنین نیروی وارد بر پاپت مخروطی به روش عددی مورد مطالعه قرار گیرد. در ضمن، مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی نیروی وارد بر عضو متحرک پاپتی با نتایج عددی، به منظور بررسی دقت عمل تحلیل عددی، در دستور کار قرار می‌گیرد.

۲- مبانی و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم

به منظور طراحی، تحلیل دینامیکی، کنترل و به ویژه بهینه‌سازی سوپاپ‌های کنترل هیدرولیکی، تعیین نیروی وارد بر عضو متحرک آنها ضرورت دارد. از این رو، در این بخش، به طور مختصر، به تحلیل نیرویی پاپت مخروطی به کار رفته در ساختار سوپاپ‌های هیدرولیکی شامل نشیمنگاه لبه تیز پرداخته می‌شود. نیروهای وارد بر عضو متحرک پاپتی سوپاپ هیدرولیکی، شامل نیروهای ناشی از جریان سیال و نیروهای خارجی می‌باشند. نیروهای خارجی وارد بر عضو متحرک پاپتی، شامل نیروی وارده از سوی فنر، نیروی ناشی از اصطکاک بین پاپت با بدنه‌ی سوپاپ و نیروهای محرک برای تغییر وضعیت یا جابجایی پاپت می‌باشند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر هندسه‌ی پاپت، بر نیروهای ناشی از جریان روغن عبوری از سوپاپ‌های پاپتی است. نیروی ناشی از جریان روغن در سوپاپ‌های پاپتی (F_P)، از سه مولفه، شامل نیروی ناشی از فشار روغن بر سطح موثر عضو متحرک پاپتی (F_T)، نیروی متأثر از تغییرات اندازه حرکت سیال (F_M) و نیروی برشی ناشی از تنش برشی بین روغن و بخش مورب پاپت (F_V)، تشکیل یافته است (نیروی F_T برابر مجموع سه نیروی F_M، F_P و F_V می‌باشد). نیروی F_V، سهم اندکی از نیروی وارد بر عضو متحرک پاپتی را به خود اختصاص می‌دهد و نیروی F_T نیز، برابر حاصل ضرب فشار روغن (A) در مجرای ورودی بر سطح موثر پاپت است. این در حالی است که نیروی ناشی از تغییر سرعت جریان عبوری از سوپاپ، با تعریف حجم

برای محاسبه جمله $\rho(\vec{V} \times \vec{V})$ ، تحت عنوان تنش‌های رینولدز در رابطه (۸)، از رابطه بوزینسک^۱ استفاده می‌شود [۱۶]:

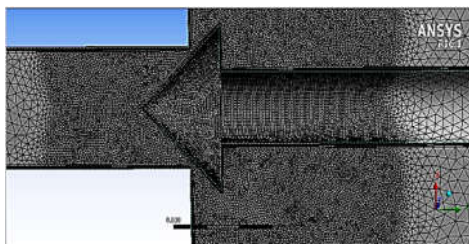
$$\rho(\vec{V} \times \vec{V}) = \mu_t \left(\nabla \times \vec{V} + (\nabla \times \vec{V})^T \right) - \frac{2}{3} \rho I k \quad (9)$$

در این رابطه، μ_t لزجت آشفتگی و k انرژی آشفتگی تعریف می‌گردند. در این پژوهش، از مجموعه روابط (۶) تا (۹) و یک مدل آشفتگی، به منظور تعیین لزجت آشفتگی، برای مدل‌سازی جریان آشفتگی درون محفظه سوپاپ پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز به کمک یک حلگر عددی تحت عنوان Ansys-CFX استفاده می‌شود.

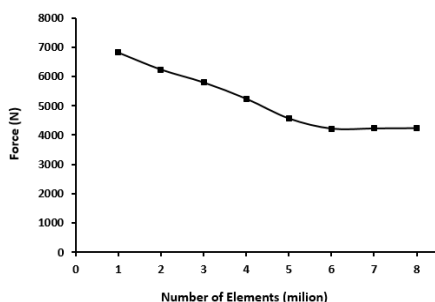
۲-۲- روش حل عددی

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی عددی جریان روغن عبوری از تنگنای ایجاد شده در سوپاپ هیدرولیکی شامل پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، از بخش CFX نرم افزار Ansys، به روش حجم محدود و توسط حل‌گر بر پایه فشار استفاده می‌شود. این روش با استفاده از حل یک معادله برای فشار، تضمین می‌کند که قانون بقای جرم در سراسر ناحیه حل ارضاء شده باشد. همچنین روش حل در نرم افزار، بر پایه الگوریتم سرعت-فشار SIMPLE انجام می‌گیرد. برای مدل‌سازی جریان آشفتگی در سوپاپ پاپتی مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، مدل $k-\epsilon$ استاندارد به کار گرفته می‌شود. بررسی نتایج و روش انجام پژوهش‌های پیشین، نشان از دقت عمل مدل $k-\epsilon$ در مدل‌سازی جریان آشفتگی روغن در سوپاپ‌های پاپتی دارد [۶] و [۱۵]. در ابتدای کار، مطابق شکل ۲، طراحی و ترسیم سوپاپ هیدرولیکی با ساختار پاپتی و نشیمنگاه لبه تیز، در نرم‌افزار Ansys، بر اساس نقشه‌های فنی شرکت سازنده، انجام گرفت.

عددی، مستقل از تعداد و اندازه‌ی سلول‌ها باشند. برای این منظور، مطابق شکل ۴، در شرایط معینی برای سوپاپ هیدرولیکی مورد نظر (زاویه‌ی راس پاپت مخروطی: ۳۰ درجه، فاصله‌ی پاپت از نشیمنگاه: ۲/۵۴mm و فشار روغن ورودی: ۱۰۰Bar)، تاثیر تعداد سلول‌ها بر نیروی محوری وارد بر عضو متحرک پاپتی مورد بررسی قرار گرفت.



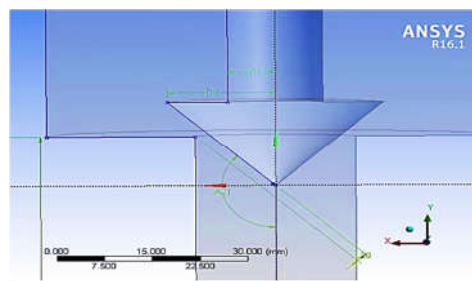
شکل ۳- شبکه‌بندی محفظه‌ی سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز



شکل ۴- تحلیل حساسیت نیروی وارد بر پاپت مخروطی به تعداد سلول‌ها مربوط به سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز

مطابق شکل ۴، با افزایش تعداد سلول‌ها، مقدار نیروی وارد بر عضو متحرک پاپتی سوپاپ کاهش می‌یابد. در شرایطی که، تعداد سلول‌های درون محفظه‌ی سوپاپ از مرز ۷ میلیون فراتر رود، نیروی وارد بر عضو متحرک سوپاپ (پاپت) تا حدود زیادی برابر مقدار ثابتی خواهد بود. بدین ترتیب، با افزایش بیشتر تعداد سلول‌ها در محدوده‌ی جریان روغن عبوری از سوپاپ، تغییر قابل ملاحظه‌ی در نیروی محوری وارد بر پاپت ایجاد نمی‌گردد. در این شرایط، تحلیل عددی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز، مستقل از تعداد سلول‌ها خواهد بود.

برای حل عددی شکل گسسته روابط حاکم بر سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز، تعیین شرایط مرزی و اولیه‌ی آن ضرورت دارد. برای این منظور، کلیه‌ی دیواره‌های موجود در سوپاپ نشان داده شده در شکل ۳، به صورت بدون لغزش به نرم‌افزار معرفی می‌شوند. همچنین، جرم مخصوص و لزجت سینماتیکی روغن معدنی در سوپاپ به کار رفته در این پژوهش، به ترتیب برابر 870 kg/m^3 و $40 \text{ mm}^2/\text{s}$ می‌باشند. در این پژوهش، در نظر است، تاثیر زاویه راس پاپت، موقعیت پاپت (فاصله عمودی پاپت تا سطح نشیمنگاه) و فشار روغن، بر عملکرد سوپاپ پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز مورد بررسی قرار گیرد. از این رو، شرایط اولیه و مرزی، در مراحل مختلف این پژوهش، به صورت جداگانه، در جداول ۱، ۲ و ۳ آمده است.

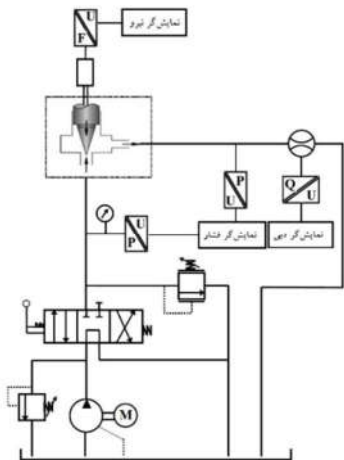


شکل ۲- هندسه‌ی سوپاپ پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز

پس از مدل‌سازی هندسی سوپاپ پاپتی، شبکه‌بندی فضای درونی سوپاپ پاپتی در دستور کار قرار گرفت. مطابق شکل ۳، فضای درونی سوپاپ هیدرولیکی نشان داده شده در شکل ۲، به وسیله‌ی سلول‌های شش وجهی نامنظم، شبکه‌بندی گردید. این کار، امکان تغییر تراکم گره‌ها و اندازه‌ی سلول‌ها در تنگنای ایجاد شده توسط پاپت و نشیمنگاه را فراهم می‌کند. بدین ترتیب، فرآیند گسسته‌سازی معادلات حاکم در سوپاپ پاپتی، با دقت بیشتری انجام می‌گیرد. برای حصول اطمینان از دقت حل عددی به کمک نرم افزار، شبکه‌بندی محفظه‌ی درونی سوپاپ می‌باید به گونه‌ای انجام گیرد که کمیت‌های حاصل از حل

¹ Boussinesq

مدل EDG03-3-L10، ساخت شرکت ترک هیدرولیک^۲ استفاده شده است. به منظور تعیین ضریب تخلیه و ضریب نیرو در شرایط کاری مختلف، اندازه‌گیری فشار روغن در دو سوی سوپاپ پاپتی و همچنین دبی روغن عبوری از آن ضرورت دارد. برای اندازه‌گیری فشار روغن در دو سوی سوپاپ پاپتی، حسگر فشار، مدل STU003721 ساخت شرکت جمز^۳ و برای اندازه‌گیری دبی روغن عبوری از سوپاپ، حسگر دبی دنده‌ای مدل VC16 ساخت شرکت کراخت^۴ استفاده شده است. در نهایت، اندازه‌گیری نیروی محوری وارد بر عضو متحرک پاپتی توسط حسگر نیروی ساخت شرکت سوها^۵ مدل SS300-500 انجام می‌گیرد. در این پژوهش، پس از ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل عددی، به بررسی تاثیر زاویه پاپت، موقعیت پاپت (میزان بازشدگی سوپاپ) و اختلاف فشار روغن در دو مجرای ورودی و خروجی سوپاپ، بر توزیع سرعت و فشار جریان روغن عبوری از سوپاپ، نیروی ناشی از جریان روغن بر عضو متحرک سوپاپ و ضرایب تخلیه و نیرو پرداخته می‌شود.



شکل ۵- سامانه‌ی هیدرولیکی برای ارزیابی تجربی نتایج حاصل از حل عددی جریان عبوری از سوپاپ مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر زاویه‌ی راس پاپت بر عملکرد سوپاپ،
به منظور بررسی تاثیر زاویه‌ی راس پاپت بر عملکرد سوپاپ، اختلاف فشار روغن در دو مجرای خروجی و ورودی سوپاپ به میزان ۱۰۰ bar، ثابت نگه‌داشته می‌شود. همچنین عضو متحرک سوپاپ به فاصله‌ی ۲/۵۴ میلی‌متر از نشیمنگاه خود قرار داده می‌شود. در شکل ۶، بردارهای سرعت جریان روغن عبوری از سوپاپ پاپتی با زاویه راس ۳۰ درجه نشان داده شده است. همچنین در شکل ۷، تأثیر زاویه راس پاپت بر تغییر سرعت جریان روغن در نقاط مختلف سطح یال مخروطی عضو متحرک سوپاپ آمده است. بررسی نتایج حاصل از حل عددی نشان می‌دهد که در یک موقعیت معین پاپت، با تغییر زاویه‌ی راس پاپت سوپاپ، سطح مقطع تنگنای ایجاد شده توسط پاپت مخروطی و

جدول ۱- کمیت‌های اولیه در مرحله بررسی تأثیر زاویه‌ی راس پاپت بر عملکرد سوپاپ پاپتی مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز

مقدار عددی	کمیت (واحد)
۲/۵۴	موقعیت پاپت (mm)
۱۰۰	فشار روغن ورودی سوپاپ (Bar)
۰	فشار روغن خروجی سوپاپ (Bar)
۶۰، ۴۵، ۳۰	زاویه‌ی راس پاپت (درجه)

جدول ۲- کمیت‌های اولیه در مرحله بررسی تأثیر موقعیت پاپت بر عملکرد سوپاپ پاپتی مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز

مقدار عددی	کمیت (واحد)
۶۰	زاویه‌ی راس پاپت (درجه)
۱۰۰	فشار روغن ورودی سوپاپ (Bar)
۰	فشار روغن خروجی سوپاپ (Bar)
۵/۰۸، ۳/۸۱، ۲/۵۴، ۱/۲۷	میزان بلندشدگی پاپت (mm)

جدول ۳- کمیت‌های اولیه در مرحله بررسی تأثیر فشار روغن بر عملکرد سوپاپ پاپتی مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز

مقدار عددی	کمیت (واحد)
۲/۵۴	موقعیت پاپت (mm)
۶۰	زاویه‌ی راس پاپت (درجه)
۰	فشار روغن خروجی سوپاپ (Bar)
۱۵۰، ۱۰۰، ۵۰	فشار روغن ورودی سوپاپ (Bar)

۳-۲- بررسی صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی

برای ارزیابی تجربی و صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان روغن عبوری از سوپاپ کنترل هیدرولیکی شامل پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، طراحی و ساخت مدار هیدرولیک نشان داده شده در شکل ۵، در دستور کار قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۵، پمپ هیدرولیک جابجایی ثابت مدل PFG2-4X ساخت شرکت بوش^۱، وظیفه‌ی ایجاد جریان روغن در مدار هیدرولیک را بر عهده دارد. به منظور کنترل جهت جریان روغن در مدار هیدرولیک، سوپاپ کنترل جهت چهار دهانه‌ی سه وضعیت‌ه ساخت شرکت پارکر به کار گرفته شده است. سوپاپ فشارشکن با عملکرد غیر مستقیم، در حد فاصل پمپ هیدرولیک و سوپاپ کنترل جهت، وظیفه‌ی تنظیم بیشینه فشار روغن در مدار هیدرولیک را بر عهده دارد. مطابق شکل ۵، روغن خروجی پمپ از طریق سوپاپ کنترل جهت به مجرای ورودی سوپاپ کنترل هیدرولیکی پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز ارسال می‌شود. به منظور جلوگیری از افزایش فشار روغن در مجرای خروجی سوپاپ پاپتی و انطباق بیشتر با شرایط حل مساله به روش عددی، روغن خروجی از سوپاپ پاپتی به طور مستقیم و از طریق لوله انتقال با مقاومت اندک، به مخزن ذخیره روغن ارسال می‌شود. لازم به ذکر است انتقال روغن خروجی از سوپاپ پاپتی، از طریق سوپاپ کنترل جهت، موجب افزایش فشار در مجرای خروجی سوپاپ می‌گردد. برای تنظیم فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ پاپتی، سوپاپ فشارشکن تناسبی دو مرحله‌ای،

² Tork hydraulics

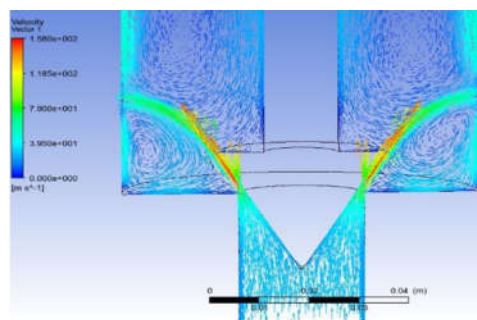
³ Gems

⁴ Kracht

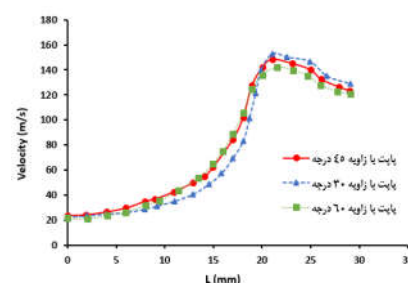
⁵ Sewha

¹ Bosch

در نتیجه آن، سرعت جریان روغن عبوری نیز تغییر می‌کند.



شکل ۶- بردارهای سرعت جریان روغن عبوری از سوپاپ هیدرولیکی شامل پاپت مخروطی با زاویه‌ی راس ۳۰ درجه



شکل ۷- تأثیر زاویه‌ی رأس پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز بر روی سرعت جریان روغن عبوری از تنگنا در سوپاپ هیدرولیکی

مطابق شکل ۷، سرعت روغن در مجرای ورودی سوپاپ برای هر سه نوع پاپت برابر و در حدود ۲۰ متر بر ثانیه می‌باشد که با نزدیکی به تنگنای ایجاد شده توسط پاپت مخروطی، سرعت جریان روغن افزایش یافته تا به مقدار بیشینه نزدیک می‌شود. بدین ترتیب، زاویه رأس پاپت، تغییر چندانی در سرعت بیشینه‌ی روغن ایجاد نمی‌کند. این در حالی است که با کاهش زاویه رأس پاپت در سوپاپ مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، سرعت بیشینه افزایش یافته است. از سوی دیگر، با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، مسیر جریان روغن به سمت دیواره کوتاه‌تر می‌شود به‌گونه‌ای که در تمامی الگوها، روغن عبوری به سطح پاپت کاملاً چسبیده و تا آخرین لحظه، جدایشی در آن رخ نمی‌دهد و تقریباً همان زاویه‌ای که پاپت به آن می‌دهد به مسیر خود ادامه می‌دهد تا به دیواره می‌رسد و سپس در راستای دیواره به سمت بالا حرکت می‌کند. با توجه به بررسی‌ها و مقایسه‌های انجام شده بین سه پاپت با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نتایج زیر حاصل می‌شود:

- بیشینه سرعت جریان روغن در محفظه‌ی سوپاپ، در زمان عبور از تنگنای ایجاد شده بین نشیمنگاه و پاپت به وجود می‌آید. پس از عبور روغن از این ناحیه، سرعت جریان روغن با روند کاهشی روبه‌رو می‌گردد.

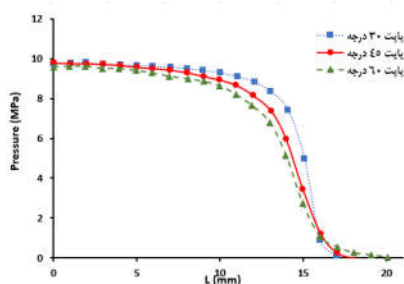
- با کاهش زاویه‌ی رأس پاپت، سرعت جریان روغن عبوری از تنگنای ایجاد شده در سوپاپ، افزایش می‌یابد. علت این امر، تأثیر مستقیم زاویه رأس پاپت بر روی سطح مقطع تنگنای ایجاد شده می‌باشد. بر اساس هندسه پاپت مخروطی و نشیمنگاه لبه تیز، با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، سطح مقطع تنگنای ایجاد شده در سوپاپ بزرگ‌تر

می‌شود.

- مطابق شکل ۶، در محفظه‌ی سوپاپ مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، دو گردابه متفاوت، یکی در قسمت پایین محفظه، در مجاورت تنگنای ایجاد شده در سوپاپ و دیگری در قسمت بالای محفظه و در نزدیکی مجرای خروجی ایجاد می‌گردد. با افزایش زاویه رأس پاپت مخروطی، گردابه پایین (گردابه نزدیک‌تر به پاپت) کوچک‌تر شده و اثرات آن نیز بر روی سیال خروجی از سوپاپ، کمتر می‌شود. این در حالی است که گردابه‌ای که در پشت پاپت مخروطی ایجاد می‌گردد، با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، بزرگ‌تر می‌شود. بدین ترتیب، با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، تأثیر گردابه‌ی مجاور تنگنا، بر عملکرد سوپاپ بیشتر خواهد بود.

- موقعیت قرارگیری گردابه‌ها در محفظه‌ی سوپاپ، تحت تأثیر زاویه‌ی رأس پاپت قرار می‌گیرد. بررسی بردارهای سرعت جریان روغن عبوری از سوپاپ‌های با پاپت‌های متفاوت نشان می‌دهد که با افزایش زاویه‌ی پاپت، دو گردابه به هم نزدیک‌تر می‌شوند. تغییر در اندازه و مکان دو گردابه در محفظه‌ی داخلی سوپاپ‌های پاپتی، به دلیل تأثیر تغییر زاویه‌ی رأس بر محل برخورد جت روغن خروجی از تنگنا با دیواره‌ی محفظه‌ی سوپاپ می‌باشد.

در شکل ۸ نیز تأثیر زاویه‌ی رأس پاپت مخروطی بر روی تغییرات فشار روغن عبوری از سوپاپ هیدرولیکی در طول یال پاپت مخروطی، بر اساس شرایط مندرج در جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۸، در هر سه سوپاپ، فشار روغن در مجرای ورودی بیشینه‌ی مقدار را دارد. سپس در طول یال هر سه نوع پاپت، فشار روغن با شیب معینی کاهش می‌یابد. بر اساس آنچه که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، روند تغییرات فشار روغن عبوری از سوپاپ شامل پاپت با زاویه‌ی رأس بیشتر، ملایم‌تر است. با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، سطح مقطع عبور جریان روغن در تنگنای ایجاد شده افزایش و در نتیجه‌ی آن، فشار روغن عبوری به طور یکنواخت‌تری تا انتهای پاپت تغییر می‌کند.



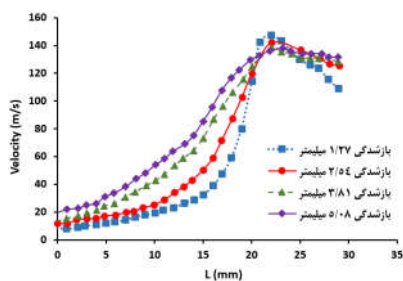
شکل ۸- تأثیر زاویه‌ی رأس پاپت مخروطی بر فشار روغن عبوری از تنگنای ایجاد شده در سوپاپ هیدرولیکی

تأثیر زاویه رأس پاپت مخروطی بر نیروی وارد بر عضو متحرک سوپاپ با ساختار پاپتی و نشیمنگاه لبه تیز در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل ۹، با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت در سوپاپ‌های با نشیمنگاه لبه تیز، نیروی وارد بر عضو متحرک سوپاپ، افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، سطح موثر پاپت در مجرای ورودی که تحت تأثیر فشار روغن قرار دارد، با افزایش روبه‌رو می‌گردد. در شکل ۹، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی نیروی وارد بر عضو متحرک پاپتی نیز نشان داده شده است. مطابق شکل ۹، انطباق مناسبی بین نتایج

بالاتری نسبت به نتایج تجربی قرار دارند. بررسی‌ها نشان از انطباق مناسب نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تجربی دارند.

۳-۲- تأثیر موقعیت پاپت مخروطی بر عملکرد سوپاپ

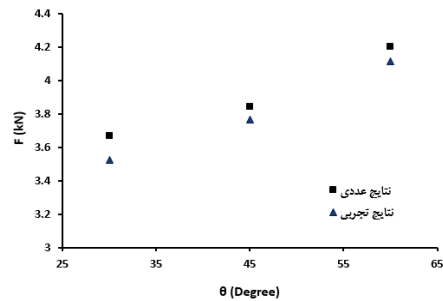
به منظور بررسی تأثیر موقعیت پاپت (جابجایی عمودی عضو متحرک پاپتی) بر عملکرد سوپاپ کنترل هیدرولیکی مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، زاویه رأس پاپت، برابر ۶۰ درجه و اختلاف فشار روغن در بالادست و پایین دست سوپاپ برابر ۱۰۰ بار، در نظر گرفته می‌شود. بررسی عملکرد سوپاپ، برای چهار موقعیت متفاوت پاپت، شامل، ۱/۲۷، ۲/۵۴، ۳/۸۱ و ۵/۰۸ میلی‌متر انجام می‌گیرد. در شکل ۱۱، تأثیر موقعیت پاپت به کار رفته در سوپاپ کنترل هیدرولیکی بر تغییرات سرعت جریان روغن عبوری از آن در امتداد طول پاپت (L) پاپت نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تأثیر موقعیت پاپت بر سرعت جریان عبوری از سوپاپ

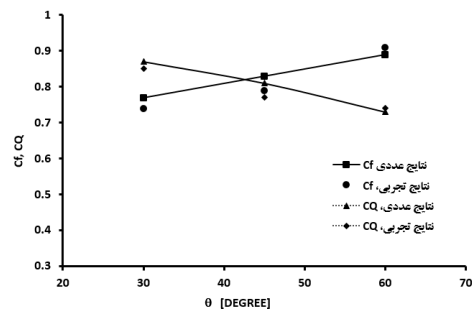
مطابق شکل ۱۱، سرعت جریان روغن ورودی به سوپاپ کنترل هیدرولیکی در هر چهار وضعیت مکانی پاپت برابر مقدار معینی می‌باشد. سرعت جریان روغن، با نزدیکی به تنگنای ایجاد شده توسط پاپت مخروطی، افزایش یافته تا به مقدار بیشینه می‌رسد. از سوی دیگر، با جابجایی بیشتر پاپت، سرعت بیشینه‌ی جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ با کاهش روبه‌رو می‌گردد. این در حالی است که سرعت جریان روغن عبوری از سوپاپ، برای هر چهار موقعیت پاپت، تا پیش از تنگنای ایجاد شده در سوپاپ، با شیب یکسان و مشابه افزایش می‌یابد تا به مقدار بیشینه خود در تنگنا نزدیک می‌شود. این در حالی است که در بازشدگی کمتر سوپاپ، شیب نمودار سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ افزایش می‌یابد. بررسی بردارها و تغییرات سرعت جریان روغن در سوپاپ کنترل هیدرولیکی نشان می‌دهد که روغن در حین عبور از محفظه‌ی سوپاپ، به سطح پاپت کاملاً چسبیده و تا آخرین لحظه، جدایشی در آن رخ نمی‌دهد. در ادامه، جریان روغن با شیبی برابر با زاویه رأس پاپت به مسیر خود ادامه داده تا به دیواره برخورد نماید. در نهایت، جریان روغن، پس از برخورد به دیواره، در راستایی عمودی به حرکت خود ادامه می‌دهد. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که ضخامت جت روغن خروجی از تنگنا، با افزایش جابجایی پاپت، افزایش می‌یابد. در هر جابجایی پاپت، جریان روغن در محفظه‌ی سوپاپ، شامل دو گردابه می‌باشد. گردابه کوچک‌تر در مجاورت تنگنا و گردابه بزرگ‌تر در مسیر جریان روغن خروجی از سوپاپ قرار می‌گیرند. با افزایش جابجایی پاپت، ابعاد گردابه‌ی نزدیک به تنگنا بزرگ‌تر و از پاپت فاصله‌ی بیشتری می‌گیرد. از سوی دیگر، جابجایی بیشتر پاپت، به دلیل تغییر در محل برخورد جت روغن به دیواره جانبی سوپاپ، موجب

تجربی با نتایج حاصل از حل عددی مشاهده می‌گردد. در نتایج تجربی نیز روند افزایشی نیروی وارد بر عضو متحرک سوپاپ با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت وجود دارد. همچنین در هر سه نوع پاپت مخروطی، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی در سطح پایین‌تری نسبت به نتایج حاصل از حل عددی قرار دارند. بر اساس آنچه که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، اختلاف نیروی وارد بر پاپت حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی و نتایج حاصل از حل عددی کاهش می‌یابد.



شکل ۹- تأثیر زاویه‌ی پاپت مخروطی بر نیروی وارد بر آن

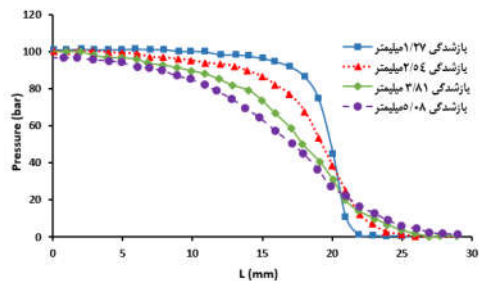
در شکل ۱۰، تأثیر زاویه‌ی رأس پاپت مخروطی سوپاپ با نشیمنگاه لبه تیز بر ضرایب نیرو و تخلیه نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰، با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، ضرایب نیرو و تخلیه، به ترتیب اندکی افزایش و کاهش می‌یابند. با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت و در پی آن افزایش سطح مقطع عبور جریان روغن در تنگنای ایجاد شده در سوپاپ، ضریب نیرو، به دلیل تغییر در الگوی جریان و فشار روغن عبوری از سوپاپ، با افزایش همراه می‌گردد. افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، ضمن تغییر در اندازه و موقعیت قرارگیری گردابه‌ها، موجب می‌گردد سطح بیشتری از پاپت در معرض فشار روغن در مجرای ورودی قرار گیرد. با توجه به تأثیرپذیری نیروی محوری وارد بر پاپت از الگوی جریان روغن عبوری، ضریب نیرو نیز به طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌گیرد.



شکل ۱۰- تأثیر زاویه‌ی رأس پاپت مخروطی بر ضرایب نیرو و تخلیه سوپاپ هیدرولیکی با نشیمنگاه لبه تیز

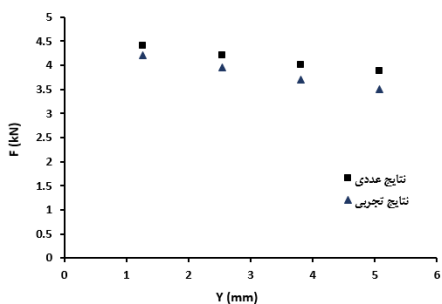
از سوی دیگر، مطابق شکل ۱۰، با افزایش زاویه رأس پاپت در یک موقعیت معین پاپت، دبی روغن عبوری از سوپاپ و ضریب تخلیه با کاهش روبه‌رو می‌گردند. همچنین، در شکل ۱۰، نتایج حاصل از حل عددی، با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به دلیل نشت محدود و جزئی روغن، نتایج حاصل از حل عددی در سطح

نزدیکی گردابه دیگر، به مجرای خروجی می‌گردد. در شکل ۱۲، تأثیر جابجایی پاپت بر تغییرات فشار روغن در سوپاپ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- تأثیر موقعیت پاپت بر فشار روغن عبوری در سوپاپ

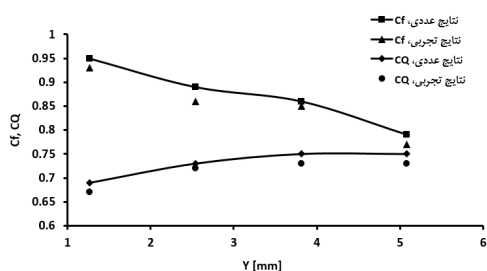
مطابق شکل ۱۲، در هر موقعیت (جابجایی) پاپت، فشار روغن در حین عبور از تنگنای ایجاد شده در سوپاپ، به طور پیوسته از مقدار بیشینه در مجرای ورودی، به مقدار کمینه در مجرای خروجی، کاهش می‌یابد. بررسی توزیع فشار روغن عبوری از سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز نشان می‌دهد که بیشینه تغییرات فشار روغن در مجاورت تنگنای ایجاد شده بین نشیمنگاه لبه تیز و پاپت مخروطی به وجود می‌آید. این در حالی است که فشار روغن عبوری از محافظه‌ی سوپاپ، قبل و بعد از تنگنا، به صورت یکنواختی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش میزان جابجایی پاپت، روند کاهشی فشار روغن عبوری از سوپاپ در قبل و بعد از تنگنا، با شیب ملایم‌تری ادامه می‌یابد. مطابق شکل ۱۲، با افزایش جابجایی پاپت، شدت تغییرات فشار روغن در تنگنای سوپاپ، به طور قابل توجهی بیشتر می‌شود (تغییرات آنی فشار روغن در تنگنا). در شکل ۱۳، تأثیر جابجایی پاپت بر نیروی محوری وارد بر آن در سوپاپ کنترل هیدرولیکی با نشیمنگاه لبه تیز نشان داده شده است.



شکل ۱۳- تأثیر جابجایی پاپت بر نیروی محوری وارد بر آن

مطابق شکل ۱۳، با افزایش جابجایی پاپت، نیروی محوری وارد بر پاپت با کاهش روبه‌رو می‌گردد. لازم به ذکر است که فشار و سرعت جریان روغن در بالادست تنگنای ایجاد شده در سوپاپ پاپتی، تأثیر قابل توجهی بر نیروی محوری وارد بر عضو متحرک پاپتی دارند. بر اساس آنچه که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌گردد، جابجایی بیشتر پاپت مخروطی، موجب افزایش سرعت جریان روغن و کاهش فشار روغن وارد بر سطح موثر پاپت در بالادست تنگنا می‌گردد. از سوی دیگر، به دلیل تأثیر قابل توجه فشار روغن بر نیروی محوری پاپت

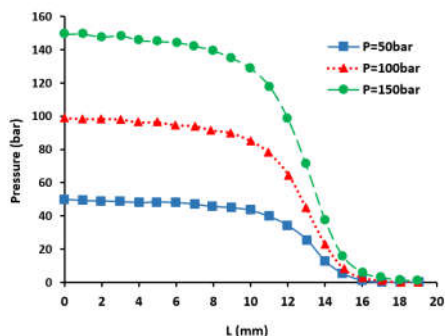
نسبت به سرعت جریان روغن، با افزایش جابجایی پاپت مخروطی، نیروی محوری وارد بر آن کاهش می‌یابد. در شکل ۱۳، نیروی محوری وارد بر عضو متحرک پاپتی، حاصل از تحلیل عددی، با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان از انطباق قابل قبول نتایج تجربی و عددی دارد. نتایج حاصل از حل عددی، به دلیل نشت اندک روغن در سوپاپ، در سطح بالاتری نسبت به نتایج تجربی قرار دارند. در شکل ۱۴، تأثیر جابجایی پاپت مخروطی سوپاپ با نشیمنگاه لبه تیز بر ضرایب نیرو و تخلیه نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۴، با افزایش جابجایی پاپت، ضریب نیرو، کاهش و ضریب تخلیه افزایش می‌یابند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضریب نیروی سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز، نسبت به ضریب تخلیه، به مقدار بیشتری تحت تأثیر جابجایی پاپت قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، نزدیکی نتایج تجربی به نتایج عددی نشان از دقت عمل تحلیل عددی در این پژوهش دارد.



شکل ۱۴- تأثیر جابجایی پاپت مخروطی بر ضرایب نیرو و تخلیه

۳-۳- تأثیر فشار روغن بر عملکرد سوپاپ پاپت مخروطی

در شکل ۱۵ تأثیر فشار روغن بر الگوهای توزیع فشار در سراسر مسیر جریان روغن در سوپاپ پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، بر اساس شرایط مندرج در جدول ۳ نشان داده شده است.

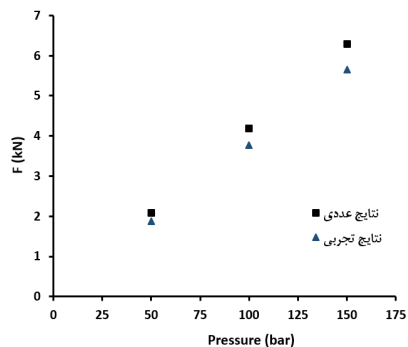


شکل ۱۵- تأثیر فشار روغن در مجرای ورودی بر روند تغییرات فشار در محافظه‌ی سوپاپ

در زیر به برخی نتایج حاصل از شکل ۱۵، اشاره می‌شود:
- روند تغییرات فشار روغن در تنگنای ایجاد شده توسط پاپت مخروطی سوپاپ، تحت تأثیر فشار روغن در مجرای ورودی قرار نمی‌گیرد.

- فشار روغن، در مجرای ورودی، دارای مقدار بیشینه است.
- در حد فاصل مجرای ورودی سوپاپ و تنگنای ایجاد شده توسط

است. از سوی دیگر، نتایج تجربی انطباق مناسبی با نتایج حاصل از حل عددی دارند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، نیروی محوری وارد بر عضو متحرک پاپتی، حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی، در هر سه فشار روغن ورودی (۵۰ bar، ۱۰۰ bar و ۱۵۰ bar)، در سطح پایین‌تری نسبت به نتایج عددی قرار دارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود نشت جزئی روغن از مجاری و اتصالات، دلیل اختلاف اندک نتایج تجربی با نتایج عددی می‌باشد. مطابق شکل ۱۷، با افزایش فشار روغن، اختلاف بین نتایج نیروی وارد بر عضو متحرک پاپتی حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی با نتایج حاصل از تحلیل عددی، بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ، نشت بیشتر روغن را به همراه دارد.



شکل ۱۷- تأثیر فشار روغن در مجرای ورودی بر نیروی وارد بر عضو متحرک پاپتی در سوپاپ با نشیمنگاه لبه تیز

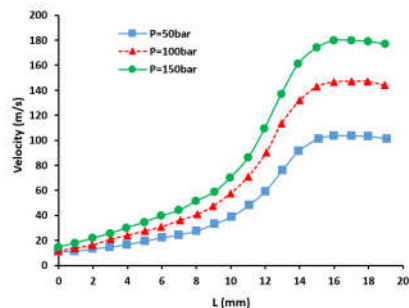
۴- نتیجه‌گیری

از سوپاپ‌های پاپتی شامل عضو متحرک مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز به طور وسیعی در صنعت به منظور کنترل فشار و گاهی به منظور کنترل جهت جریان روغن استفاده می‌شود. به منظور بهینه‌سازی این سوپاپ‌ها و دستیابی به مشخصات پاسخ‌گذا و پایایی مطلوب در این سوپاپ‌ها، آگاهی از ویژگی‌های جریان روغن عبوری از آنها، ضرورت دارد. به همین منظور در این پژوهش، تأثیر زاویه‌ی راس پاپت مخروطی، جابجایی عضو متحرک پاپتی و فشار روغن ورودی به سوپاپ، بر توزیع فشار و سرعت جریان روغن در محفظه‌ی سوپاپ و در نهایت نیروی محوری وارد بر پاپت مخروطی، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در ضمن، مقایسه‌ی نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی وارد بر عضو متحرک پاپتی با نتایج عددی، به منظور حصول اطمینان از دقت عمل حل عددی، در دستور کار قرار گرفت. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که در محفظه‌ی سوپاپ مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، دو گردابه متفاوت یکی در قسمت پایین محفظه، در مجاورت تنگنای ایجاد شده در سوپاپ و دیگری در قسمت بالای محفظه و در نزدیکی مجرای خروجی روغن ایجاد می‌گردد. در همه شرایط مورد بررسی در این پژوهش، گردابه‌ی بالایی دارای ابعاد بزرگتری نسبت به گردابه‌ی پایینی است. در زیر به برخی دیگر از نتایج حاصل از این پژوهش اشاره شده است:

- تغییر زاویه راس و جابجایی پاپت بر خلاف تغییر فشار روغن، تأثیر قابل توجهی بر سرعت جریان روغن عبوری در محفظه سوپاپ ندارد. با این حال، با افزایش زاویه‌ی راس پاپت و جابجایی پاپت در

پاپت مخروطی، فشار روغن با شیب اندکی کاهش می‌یابد.
- در حین عبور روغن از تنگنای ایجاد شده در سوپاپ مخروطی، فشار روغن با شیب قابل توجهی کاهش یافته تا در مجاورت مجرای خروجی، فشار روغن به مقدار کمینه نزدیک می‌شود. این روند کاهش فشار روغن در حین عبور از محفظه‌ی سوپاپ، تحت تأثیر فشارهای مختلف روغن در مجرای ورودی مشابه است.
- با افزایش فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ، روند تغییرات فشار روغن در خط سیر جریان در محفظه‌ی سوپاپ به نسبت مشابه افزایش می‌یابد.

تأثیر اختلاف فشار روغن نیز بر روی سرعت جریان عبوری از سوپاپ شامل پاپت مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۶، در حین عبور روغن در امتداد سطح جانبی پاپت مخروطی، سرعت آن افزایش می‌یابد تا به مقدار بیشینه در تنگنای ایجاد شده می‌رسد. سرعت جریان روغن در حین عبور از تنگنای ایجاد شده در سوپاپ مخروطی، با کاهش روبه‌رو می‌گردد. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که سرعت جریان روغن پس از تنگنای ایجاد شده در سوپاپ به سرعت کمینه در مجرای ورودی نزدیک نمی‌شود. بررسی روند تغییرات سرعت جریان روغن عبوری از سوپاپ در شکل ۱۶ نشان می‌دهد که فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ تأثیر قابل توجهی بر سرعت جریان روغن در بالادست تنگنا ایجاد نمی‌کند. این در حالی است که سرعت جریان روغن در تنگنای ایجاد شده توسط پاپت مخروطی و نشیمنگاه لبه تیز آن، متناسب با افزایش فشار روغن، افزایش می‌یابد. بررسی بیشتر بردارهای سرعت جریان روغن عبوری از محفظه‌ی سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز نشان می‌دهد که تغییر فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ، تأثیری بر ضخامت جت روغن خروجی از تنگنا و محل برخورد آن با دیواره جانبی ندارد. بدین ترتیب، اندازه و محل ایجاد دو گردابه در محفظه سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز تحت تأثیر بزرگی فشار روغن قرار نمی‌گیرد.



شکل ۱۶- تأثیر فشار روغن در مجرای ورودی بر روند تغییرات سرعت جریان روغن در محفظه‌ی سوپاپ پاپتی

تأثیر فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ بر نیروی وارد بر عضو متحرک سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز، در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. مطابق شکل ۱۷ با افزایش فشار روغن در مجرای ورودی در سوپاپ‌های پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز، نیروی وارد بر عضو متحرک آن با افزایش روبه‌رو می‌گردد. علت افزایش نیرو متناسب با افزایش فشار روغن در مجرای ورودی در ارتباط با افزایش مولفه‌ی نیرو ناشی از فشار روغن وارد بر سطح موثر پاپت مخروطی سوپاپ با نشیمنگاه لبه تیز

سوپاپ مخروطی با نشیمنگاه لبه تیز، به دلیل افزایش سطح مقطع تنگنای ایجاد شده، بیشینه سرعت جریان روغن عبوری از سوپاپ با کاهش روبه‌رو می‌گردد. از سوی دیگر، افزایش فشار روغن در مجرای ورودی، موجب افزایش بیشینه سرعت جریان در محفظه‌ی سوپاپ می‌گردد.

- بررسی بردارهای سرعت جریان روغن نشان داد که تغییر زاویه رأس و موقعیت پاپت مخروطی، تاثیر مستقیمی بر اندازه و موقعیت تشکیل گردابه‌ها در محفظه‌ی سوپاپ دارند. این در حالی است که، تغییر فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ، تاثیری در شکل ظاهری گردابه‌ها و محل تشکیل آن‌ها ایجاد نمی‌کند.

- تاثیر موقعیت پاپت بر توزیع فشار جریان روغن عبوری در محفظه‌ی سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز، از تاثیر زاویه رأس پاپت بیشتر و از تاثیر فشار روغن در مجرای ورودی کمتر است.

- افزایش زاویه رأس پاپت و فشار روغن در مجرای ورودی سوپاپ، موجب افزایش نیروی محوری وارد بر عضو متحرک مخروطی می‌گردد. این در حالی است که با افزایش جابجایی پاپت، نیروی محوری وارد بر آن با کاهش روبه‌رو می‌گردد. بررسی‌های مختلف نشان داد که نیروی محوری وارد بر عضو متحرک پاپتی، حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی، در تمامی شرایط، ضمن انطباق مناسب، در سطح پایین‌تری نسبت به نتایج عددی قرار دارند.

- با افزایش جابجایی پاپت، ضریب نیرو، کاهش و ضریب تخلیه افزایش می‌یابند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضریب نیروی سوپاپ پاپتی با نشیمنگاه لبه تیز، نسبت به ضریب تخلیه، به مقدار بیشتری تحت تاثیر جابجایی پاپت قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، با افزایش زاویه‌ی رأس پاپت، ضرایب نیرو و تخلیه، به ترتیب اندکی افزایش و کاهش می‌یابند.

۵- نمادها

A_0	سطح مقطع تنگنای ایجاد شده در سوپاپ (m^2)
C_d	ضریب تخلیه (بدون واحد)
C_F	ضریب نیرو (بدون واحد)
F	نیروی محوری وارد بر پاپت مخروطی (N)
F_M	نیروی ناشی از تغییر اندازه حرکت (N)
F_P	نیروی ناشی از فشار روغن (N)
F_V	نیروی ناشی از تنش‌های ویسکوز (N)
k	انرژی آشفتگی
L	طول سطح جانبی پاپت مخروطی (mm)
\vec{n}	بردار عمود بر سطح (بدون واحد)
\bar{P}, P	فشار روغن، فشار متوسط و فشار نوسانی (Bar)
Q	دبی روغن (lit/min)
x	جابجایی (موقعیت) عضو متحرک سوپاپ (mm)
\vec{V}, V	سرعت جریان روغن، سرعت متوسط و نوسانی (m/s)
μ	لزجت (Pa.s)
μ_t	لزجت آشفتگی
ρ	جرم مخصوص روغن (kg/m^3)
$\bar{\tau}, \tau$	تنش برشی، تنش برشی متوسط و نوسانی (MPa)

۶- مراجع

- [۱] نیک اندیش پ.، هیدرولیک مهندسی. دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ۱۳۹۱.
- [۲] نیک اندیش پ.، عضوهای منطقی در هیدرولیک. دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ۱۳۹۵.
- [۳] نیک اندیش پ.، سرو هیدرولیک. انتشارات جهاد دانشگاهی، تهران، ۱۳۹۲.
- [4] Costa G. K. and Sepehri N., A Critical Review of the Existing Models for Direct Operated Hydraulic Relief Valves with the Proposal of a New Modelling Approach. *International Journal of fluid power*, Vol. 18, pp. 142-153, 2017.
- [5] Resiga R., Bernad S. and Anton I., Vortex flow modeling inside the poppet valve chamber. In *7th Scandinavian International Conference on Fluid Power*, Linköping, Sweden, 2001.
- [6] Bazso C. and Hos C. J., On the Static Instability of Liquid Poppet Valves. *Periodica Polytechnic Mechanical Engineering*, Vol. 59, No. 1, pp. 1-7, 2015.
- [7] Sandor I. and Susan-Resiga R., Vortex flow analysis in poppet valve chamber. *Journal of Modelling and Simulation in Engineering-Special Issue on Computational Fluid Dynamics and Its Applications*, Vol. 6, pp.1-10, 2012.
- [۸] نادری قمی ع.، بررسی عددی جریان داخل دستگاه ورتکس تیوپ و تاثیر شیر کنترل مخروطی بر عملکرد آن. بیست و دومین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، اهواز، ایران، ۱۳۹۳.
- [9] Bazso C. and Hos C. J., An Experimental Study on the Stability of a Direct Spring Loaded Poppet Relief Valve. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 42, pp. 456-465, 2013.
- [10] Chen Q. and Stoffel B., CFD simulation of a hydraulic conical valve with cavitation and poppet movement. In *4th International Conference on Fluid Power*, Dresden, Germany, 2004.
- [11] Juric Z., Kulenovic Z. and Kulenovic D., Influence of the hydraulic relief valve poppet geometry on valve performance. In *14th International Conference on TMT (Trends in Development of Machinery and Associated Technology)*, New York, USA, 2010.
- [12] Passandideh-Fard M. and Moin H. E., A computational study of cavitation in a hydraulic poppet valve. In *5th International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems*, Bialystok, Poland, 2008.
- [13] Yang Y., Wu J., Feng F. and Zhu Y., Flow characteristics of throttle valve with sharp edged seat. In *8th International Conference on Fluid Power Transmission and Control*, Beijing, China, 2011.
- [۱۴] نیک‌اندیش پ.، مینایی س.، قبادیان ب و شیخ‌داودی م. ج.، تعیین کمیت‌های موثر در رابطه‌ی خطی‌سازی شده‌ی جریان برای سوپاپ‌های کنترل جهت هیدرولیکی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۴، ش. ۱، ص ۲۹-۴۹، ۱۳۹۳.
- [15] Gomez I., Gonzalez-Mancera A., Newell B. and Garcia-Bravo J., Analysis of the Design of a Poppet Valve by Transitory Simulation. *Energies*, Vol. 12, 2019.