



تحلیل حساسیت یک نمونه شیر سرو هیدرولیک کنترل دبی

محمود سعادت فومنی^{۱*}، محمد صالح صدوقی^۲

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، m_saadat@sharif.edu

چکیده- در این مقاله تحلیل حساسیت یک نمونه شیر سرو هیدرولیک کنترل دبی ارائه شده است. در این تحلیل، حساسیت منحنی دبی- جریان نسبت به تغییرات پارامترهای هندسی و عملکردی اجزای آن ارزیابی شده است. این تحلیل به کمک مدلی که رفتار شیر را بر حسب پارامترهای هندسی و مشخصات اجزای آن شبیه‌سازی می‌کند انجام شده است. با توجه به تعدد پارامترهای اجزای شیر و پیچیدگی‌های مجموعه، کمیت‌های تأثیرگذارتر در عملکرد شیر مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفته‌اند. میزان انحراف بهره دبی و جریان اشباع -که مشخصه‌های اصلی رفتار شیر هستند- از مقادیر نامی آنها در منحنی دبی- جریان، به عنوان معیاری برای سنجش حساسیت شیر انتخاب شده است. منحنی تغییرات مشخصه‌های فوق بر حسب تغییرات پارامترهای مورد نظر به دست آمده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کلیه منحنی‌های حساسیت به دست آمده در بازه‌های محدود خطی هستند. همچنین از بین پارامترهای بررسی شده فاصله تعادلی نازل- فلپر، قطر اریفیس و ضریب سختی فنر اسپول به ترتیب در عملکرد شیر حساسیت بیشتری داشتند.

کلیدواژه‌گان: شیر سرو هیدرولیک، تحلیل حساسیت، مجموعه نازل- فلپر، مشخصه عملکردی، منحنی دبی- جریان.

Sensitivity analysis of a sample flow control hydraulic servo valve

M. Saadat Foumani^{1*}, M.S. Sadooghi²

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran

2- MSc., Mech. Eng., Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran

* P. O. B. 9567-11155 Tehran, Iran. m_saadat@sharif.edu

Abstract- This paper presents the sensitivity analysis of a sample hydraulic servo valve. The sensitivity of the flow-current curve with respect to variations of geometrical and functional parameters is evaluated. This analysis is done by use of a model which simulates the valve behavior in terms of geometrical parameters and properties of components. With attention to multiplicity of the valve components and the complexity of the system, the more effective parameters have been studied more precisely. Deviation of flow gain and saturation current -which are the main characteristics of the valve behavior- from their nominal values in the flow-current curve, is the criterion for the valve sensitivity assessment. The curve of characteristic variations versus parameter variations has been plotted. The evaluations indicated that all of the sensitivity curves are linear in the limited intervals. Also between the evaluated parameters, nozzle-flapper equilibrium distance, orifice diameter and stiffness of spool spring have more sensitivity effect on the valve performance, respectively.

Keywords: Servo Hydraulic Valve, Sensitivity Analysis, Nozzle-Flapper Set, Characteristic Performance, Flow-Current Curve.

۱- مقدمه

تحلیل دینامیک یکی از مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی شیرهای سرو هیدرولیک است. این نوع تحلیل به منظور استخراج معادلات دینامیک حاکم بر عملکرد شیر که خود توصیف ریاضی رفتار شیر است انجام می‌شود. یکی از دستاوردهای مهم این تحلیل آن است که کدام یک از پارامترهای هندسی یا فیزیکی شیر در عملکرد آن تأثیر بیشتری دارد. روشن است که حساسیت عملکرد شیر نسبت به تغییرات یک پارامتر نشانگر میزان اثرگذاری آن پارامتر در عملکرد شیر است. لذا تحلیل حساسیت می‌تواند منجر به یافتن پارامترهای مؤثر در عملکرد شیر گردد. از سوی دیگر انتخاب تولرانس مناسب برای قطعات و پارامترهای هندسی به عواملی نظیر جنس، بزرگی ابعاد، تجهیزات ساخت در دسترس و میزان حساسیت مجموعه یا قطعه به پارامتر مورد بحث، بستگی دارد. می‌توان گفت قطعات یا پارامترهای حساس‌تر نیاز به تولرانس‌های بسته‌تر و دقیق‌تری دارند. این موضوع اهمیت تحلیل حساسیت را به خوبی نشان می‌دهد. به‌ویژه در فرآیند تولید انبوه قطعه یا مجموعه که کاهش بازه تولرانس‌ها تأثیر قابل توجهی در بالا رفتن هزینه‌های تمام‌شده دارد. با توجه به مطالب ذکر شده، به منظور یافتن میزان حساسیت قطعات و پارامترها در عملکرد شیر تحلیل حساسیت ضروری به نظر می‌رسد.

تا کنون نویسندگان مختلفی مدل‌سازی و تحلیل حساسیت شیرهای هیدرولیک را بررسی کرده‌اند. توفیق [۱] به کمک استخراج معادلات دینامیکی و سیالاتی حاکم بر مرحله (طبقه) اول یک نمونه شیر هیدرولیک سرو دو مرحله‌ای، مدلی از مرتبه ۶ ارائه کرده است. شای و همکاران [۲] معادلات حاکم بر عملکرد شیر را که شامل معادله شار مغناطیسی موتور گشتاوری، معادله حرکت فلپر و معادلات سیالاتی است، ارائه کرده‌اند. در نهایت یک مدل پیچیده غیرخطی از شیر استخراج شده است که ساده‌سازی و خطی‌سازی بر روی آن انجام شده است. کیم و تسائو [۳] مدل خطی‌شده‌ای از شیر ارائه دادند که ضرایب آن به‌طور مستقیم از پارامترهای فیزیکی و مشخصات سیالاتی شیر به دست آمده است. از این رو مدل آنها برای آنالیز حساسیت قابل استفاده است. موخاراجی [۴] یک مدل غیرخطی برای یک شیر سرو تک مرحله‌ای ارائه کرده است. وی در این مدل جریان سیال را در اطراف اسپول و همچنین شار

مغناطیسی را در موتور نیرویی شیر در نظر گرفته است. او حساسیت عملکرد شیر نسبت به تغییرات را در لقی شعاعی، شرایط مختلف هم‌پوشانی دریچه‌های اسپول و هندسه دریچه‌های کنترلی اسپول مورد تحلیل قرار داده است. فراهت [۵] در یک پایان‌نامه کارشناسی ارشد تحلیل حساسیت را بر روی یک شیر سرو هیدرولیک به کار برده است. وی چهار روش مجزای تحلیل حساسیت را با مطالعه بر روی تغییرات سرعت پیستون اکچویتور شیر نسبت به تغییرات در هشت پارامتر مختلف، با یکدیگر مقایسه کرده است. در هر صورت نتیجه‌گیری فراهت چنین است که بیشتر قسمت‌های منحنی حساسیت شیر نسبت به تغییر در پارامترهای اصلی خطی است. مانیتام و همکار [۶] مدلی غیرخطی از یک سیستم هیدرولیک سرو ارائه داده‌اند. سپس پاسخ‌های سیستم را نسبت به ورودی‌های مختلف در حالت حلقه باز بررسی کرده و از مدل خطی‌سازی شده در حالت حلقه بسته و با به کارگیری یک کنترلر PD استفاده کرده‌اند. مدل و کنترلر طراحی‌شده در نرم‌افزار سیمولینک شبیه‌سازی شده و دقت آن به وسیله تست‌های تجربی تأیید شده است. نی و پنگ [۷] یک مدل غیرخطی از یک سیستم هیدرولیک سرو با رویکرد به کارگیری یک کنترلر غیرخطی PI ارائه کرده‌اند. آنها شبیه‌سازی خود را با عملکرد تجربی سیستم که در آن از یک کنترلر PID خطی استفاده شده، مقایسه کرده و بهبود نتایج را در مدل خود نشان داده‌اند. لیو و همکاران [۸] با رویکردی آماری از داده‌های تجربی، مدلی را به منظور بررسی جریان نشتی در یک شیر هیدرولیک سرو ارائه داده‌اند. آنها مدل تجربی خود را با یک مدل نیمه تجربی دیگر مقایسه کرده‌اند.

بررسی مقالات فوق نشان می‌دهد که تحلیل حساسیت بر روی شیرهای نازل-فلپر با رویکرد اهمیت دادن به منحنی دبی-جریان که مشخصه اصلی عملکرد این گونه شیرها است انجام نشده است.

در این مقاله حساسیت مشخصه دبی-جریان از یک شیر سرو هیدرولیک نازل-فلپر نمونه بررسی شده است. این بررسی به کمک مدلی که در مرجع [۹] ارائه شده و توسط آزمایش‌های تجربی تأیید شده، انجام شده است. در ابتدا یک روش عام تحلیل حساسیت برای این شیر توضیح داده خواهد شد. سپس با بهبود این روش، تحلیل حساسیت به صورت

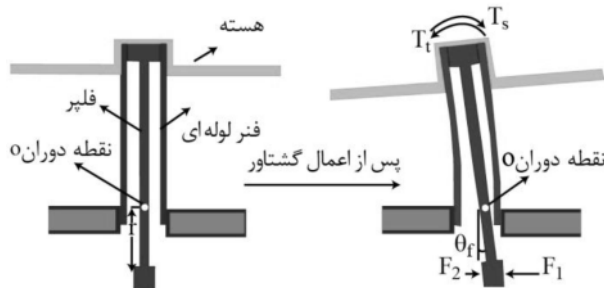
در مدل ارائه شده، ابتدا عملکرد موتور گشتاوری که جریان الکتریکی را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و در شکل ۱ دیده می‌شود مدل‌سازی شده است.

خروجی این مدل، گشتاور T_t است که بر روی هسته موجود در شکل ۲ ایجاد می‌شود. با توجه به دیاگرام آزاد شکل ۲ می‌توان معادله حرکت مجموعه متشکل از هسته، فلپر و فنر لوله‌ای را به دست آورد که به صورت معادله (۱) ظاهر می‌شود:

$$T_t - T_s - (F_1 - F_2)r = J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} \quad (1)$$

در این رابطه نیروهای F_1 و F_2 نیروهای سیالاتی وارد بر فلپر از سمت دو نازل است که در مرجع [۱۰] ذکر شده است؛ T_s گشتاور مقاوم فنر لوله‌ای، r فاصله محل اعمال نیروهای F تا نقطه دوران فلپر، J ممان اینرسی قطبی مجموعه و θ زاویه دوران است. بر اثر جابجایی فلپر، تقارن موجود در مدار فرمان شکل ۱ بر هم خورده و اختلاف فشار دو سمت اسپول باعث جابجایی آن می‌شود. در نتیجه می‌توان منحنی بازشدگی درجه نسبت به جریان الکتریکی ورودی را مانند شکل ۳ رسم کرد.

شبیه‌سازی مرحله دوم شیر که شامل تغییرات دبی بر حسب میزان بازشدگی درجه است، به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام شده است. نمونه‌ای از مدل استفاده شده در این تحلیل در شکل ۴ دیده می‌شود. در این شکل فشار ورودی و خروجی و محور تقارن به عنوان شرایط مرزی مسأله است. منحنی دبی خروجی بر حسب جریان الکتریکی ورودی با ترکیب دو مرحله مدل‌سازی به دست می‌آید. این منحنی و برخی منحنی‌های میانی توسط یک دستگاه تست به صورت تجربی تأیید شده است [۹].

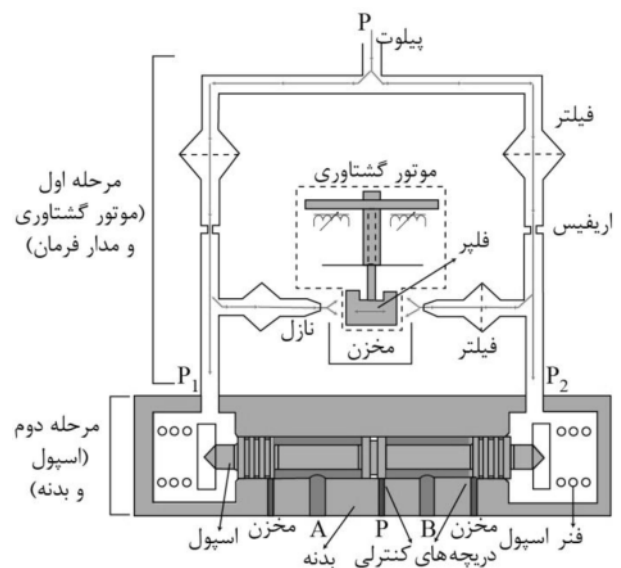


شکل ۲ مجموعه فلپر، هسته و فنر لوله‌ای قبل و بعد از اعمال گشتاور

سریعتر و مؤثرتری انجام خواهد شد. به وسیله این روش تحلیل حساسیت رفتار شیر نسبت به تغییر در پارامترهای مهم ارائه می‌شود. در انتها میزان اثر پارامترهای مختلف مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. مقایسه کمی حساسیت اجزای مختلف این نوع از شیرهای هیدرولیک و تحلیل حساسیت با رویکرد کاهش در هزینه‌های ساخت، از ویژگی‌های این مقاله است که در سایر مقاله‌ها بررسی نشده است.

۲- مدل مورد استفاده

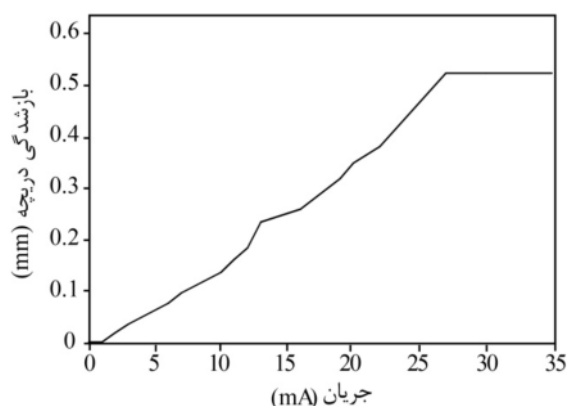
در مرجع [۹] یک شیر سرو هیدرولیک نازل- فلپر مدل‌سازی شده است (شکل ۱). شیر مورد بحث از نظر عملکرد دارای دو مرحله است. در مرحله اول سیم‌پیچ مغناطیسی به وسیله جریان الکتریکی ورودی تحریک شده و فلپر را به سوی یکی از دو نازل می‌راند. در این حالت تقارن مدار فرمان از بین رفته و باعث ایجاد اختلاف فشار ($\Delta p = p_2 - p_1$) بین دو سمت اسپول و جابجایی آن می‌شود. جابجایی اسپول با این اختلاف فشار و سختی فنرهای دو طرف آن تناسب دارد. مرحله دوم عملکرد شیر شامل بازشدگی درجه‌های کنترلی و عبور دبی است که خود تابعی از جابجایی اسپول و فشار کاری سیال هیدرولیک است [۹]. از آنجا که فشار کاری سیال تقریباً ثابت است با تغییر جریان الکتریکی می‌توان دبی عبوری از شیر را کنترل نمود.



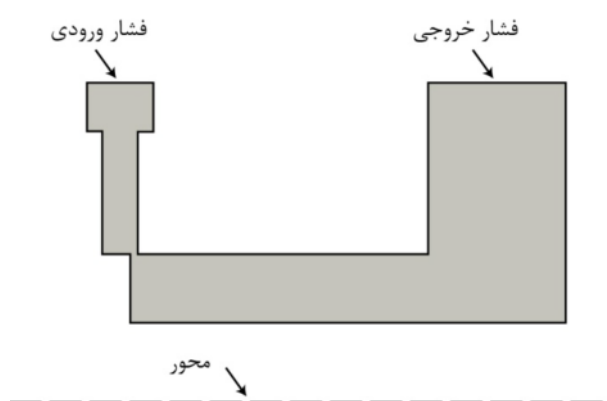
شکل ۱ نمای شماتیک از شیر شامل اریفیس، فلپر و فنر اسپول [۹]

اریفیس، فاصله تعادلی نازل- فلپر و ضریب سختی فنر اسپول است حداکثر به مقدار $\pm 15\%$ نسبت به مقادیر نامی (نرمال) تغییر می‌کند و اثر این تغییرات در منحنی دبی- جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در ابتدا چنین به نظر می‌رسد که به منظور تحلیل حساسیت ذکر شده در بالا باید به ازای هر تغییر در یک پارامتر تمامی مراحل شبیه‌سازی که در مرجع [۹] انجام شده است تکرار شود. به عبارت دیگر در ابتدا مقدار جدید پارامتر مورد نظر جایگزین مقدار نامی در الگوریتم کامپیوتری که شبیه‌سازی مرحله اول است می‌شود؛ این جایگزینی منحنی جدید بازشدگی دریچه- جریان الکتریکی را در پی دارد. سپس روش CFD برای شبیه‌سازی مرحله دوم به کار می‌رود که نتیجه آن منحنی جدید دبی- جریان الکتریکی است. اگر قرار باشد تمامی مراحل بالا برای هر یک از پارامترهای مذکور اجرا شود نیاز به صرف وقت و هزینه زیادی است. به ویژه در مورد شبیه‌سازی مرحله دوم که نیاز به حل مدل CFD است. از این رو استفاده از روش بالا اجرایی نیست.



شکل ۳ منحنی بازشدگی دریچه بر حسب جریان الکتریکی ورودی [۹]



شکل ۴ مدل CFD راهگاه‌های شیر به همراه شرایط مرزی

۳-۱- ساده‌سازی روش تحلیل حساسیت
با کمی دقت در مراحل تحلیل حساسیت می‌توان دریافت که شبیه‌سازی مرحله دوم شیر که امری وقت‌گیر و پرهزینه است نیاز به تکرار ندارد. از آنجا که پارامترهای مورد نظر برای تحلیل حساسیت همگی مربوط به مرحله اول شیر هستند، می‌توان به راحتی تغییرات آنها را در الگوریتم کامپیوتری مورد بحث اعمال کرده و منحنی جدید بازشدگی دریچه- جریان الکتریکی را به دست آورد. به وسیله این منحنی جدید و منحنی دبی- بازشدگی دریچه شکل ۵ که حاصل از شبیه‌سازی مرحله دوم شیر است، منحنی جدید دبی- جریان الکتریکی به صورت زیر به دست می‌آید:

دبی- بازشدگی دریچه- جریان الکتریکی ← دبی- جریان الکتریکی

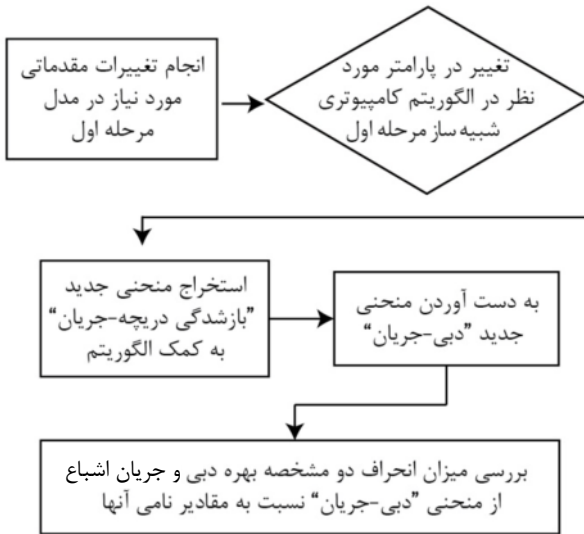
منحنی دبی- جریان الکتریکی در شکل ۶ دیده می‌شود. بهره دبی و جریان اشباع دو مورد از مشخصه‌های مهم منحنی دبی- جریان الکتریکی هستند [۹]. این دو مشخصه به عنوان معیاری برای تعیین حساسیت منحنی دبی- جریان الکتریکی استفاده می‌شوند.

از مهم‌ترین ویژگی‌های مدل ارائه شده آن است که رفتار مرحله اول آن در قالب یک الگوریتم کامپیوتری شبیه‌سازی شده است. ورودی این الگوریتم جریان الکتریکی و خروجی آن بازشدگی دریچه است. همچنین مدل ارائه شده برای این بخش تمامی ویژگی‌های هندسی و پارامترهای فیزیکی با اهمیت شیر را به صورت مستقیم در بر دارد که خود از جنبه‌های جدید مدل محسوب می‌شود. این دو ویژگی تحلیل حساسیت هر یک از پارامترهای مورد دلخواه را در این بخش از مجموعه ممکن می‌سازد.

۳- تحلیل حساسیت

در ادامه رفتار شیر مذکور به کمک مدل فوق مورد تحلیل حساسیت نسبت به تغییر در برخی پارامترهای آن قرار گرفته است. مقادیر هر یک از پارامترهای مورد نظر که شامل قطر

است. از این رو یک مدل جدید CFD با توجه به قطر جدید اریفیس ایجاد می‌شود که هندسه آن در شکل ۸ دیده می‌شود. جریان سیال به صورت آشفته در نظر گرفته می‌شود و از مدل K-ε برای حل استفاده می‌شود. با اعمال شرایط مرزی که در شکل ۸ دیده می‌شود، منحنی جدید دبی-اختلاف فشار حاصل می‌شود.



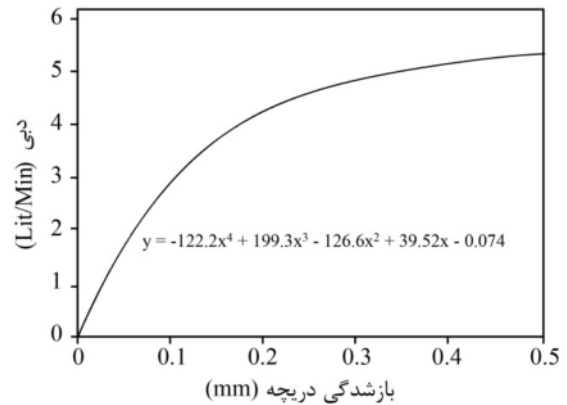
شکل ۷ نمودار مراحل متوالی تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف شیر

جدول ۱ تغییرات قطر اریفیس

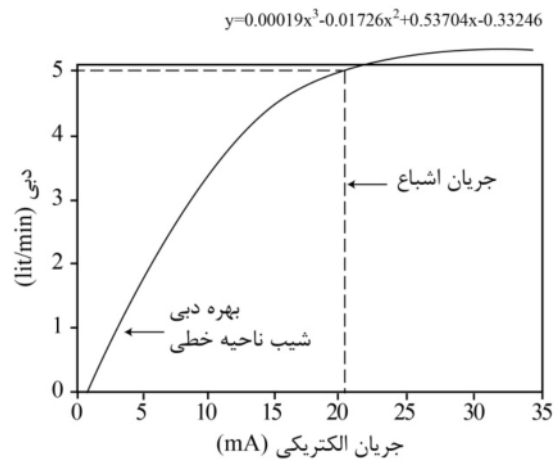
تغییرات (%)	قطر اریفیس (mm)
-۱۵	۰/۲۲۹
-۱۰	۰/۲۴۳
-۵	۰/۲۵۶
۰	۰/۲۷۰
۵	۰/۲۸۳
۱۰	۰/۲۹۷
۱۵	۰/۳۱۰



شکل ۸ مدل اریفیس به همراه شرایط مرزی به منظور استفاده در تحلیل CFD [۹]



شکل ۵ منحنی دبی بر حسب بازشدگی دریچه [۹]



شکل ۶ منحنی دبی بر حسب جریان الکتریکی ورودی که با استفاده از نمودارهای شکل ۳ و ۵ رسم شده است.

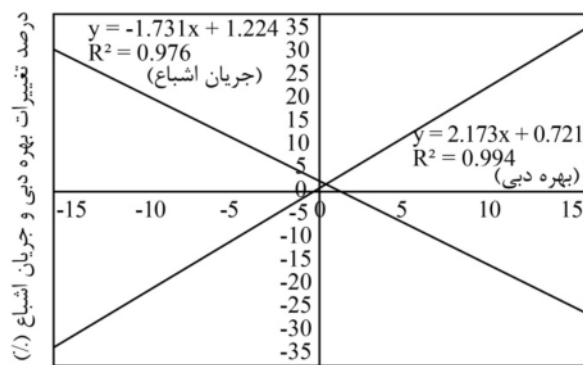
بدین ترتیب که میزان انحراف این دو مشخصه از مقادیر نامی (نرمال) به ازای تغییر در هر پارامتر از شیر در فرآیند تحلیل حساسیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش تحلیل حساسیت مورد استفاده در این مقاله به صورت خلاصه در نمودار شکل ۷ نمایش داده می‌شود. در ادامه نتایج انجام نمودار فوق بر روی برخی پارامترهای مجموعه ارائه می‌شود.

۴- حساسیت مجموعه به قطر اریفیس

در این بخش حساسیت منحنی دبی-جریان الکتریکی نسبت به تغییر در قطر اریفیس بررسی می‌شود. تغییرات قطر در جدول ۱ آمده است.

در ابتدا نیاز به انجام تغییراتی مقدماتی در مدل مرحله اول

از این رو میزان حساسیت این مشخصه نسبت به تغییر در پارامترهای مختلف شیر با اهمیت محسوب می‌شود. با استفاده از شکل ۱۰ تمامی بهره‌های دبی به ازای قطرهای مختلف اریفیس قابل محاسبه است. در شرایط نامی بهره دبی شیر مورد مطالعه 0.352 Lit/Min.ma به دست آمده است. منحنی درصد تغییرات بهره دبی نسبت به درصد انحراف قطر اریفیس از مقدار نامی در شکل ۱۱ دیده می‌شود. چنانچه مشاهده می‌شود این نمودار بیان کننده یک منحنی خطی است. در ادامه از این منحنی و سایر منحنی‌های مشابه در این مقاله به نام منحنی حساسیت یاد می‌شود. جریان اشباع جریانی است که به ازای آن دبی خروجی شیر به حالت اشباع رسیده و با افزایش جریان، دبی تغییر نمی‌کند. مقدار نامی این جریان در شیر مورد نظر حدود 20 mA است [۹]. در شکل ۱۱ منحنی حساسیت جریان اشباع دیده می‌شود که یک منحنی خطی است. مطابق شکل ۱۱ منحنی حساسیت بهره دبی صعودی است که نشان می‌دهد با افزایش قطر اریفیس، بهره دبی افزایش می‌یابد. در مقابل منحنی حساسیت جریان اشباع نزولی است که نشان می‌دهد با افزایش قطر اریفیس، جریان اشباع کاهش یافته و یا به عبارتی دبی شیر هیدرولیک سریعتر به حالت اشباع یا بیشینه مقدار خود می‌رسد. این موضوع که با افزایش بهره دبی جریان اشباع کاهش می‌یابد و بالعکس، با دقت در شکل ۶ و شکل ۱۰ نیز قابل استنباط است.



درصد تغییرات قطر اریفیس (%)

شکل ۱۱ منحنی‌های حساسیت بهره دبی و جریان اشباع به قطر اریفیس

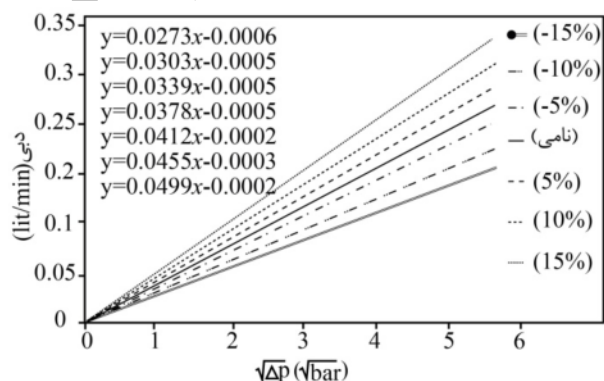
۵- تحلیل فاصله تعادلی نازل - فلپر

متغیر اصلی کنترلی در مجموعه نازل- فلپر موقعیت فلپر نسبت

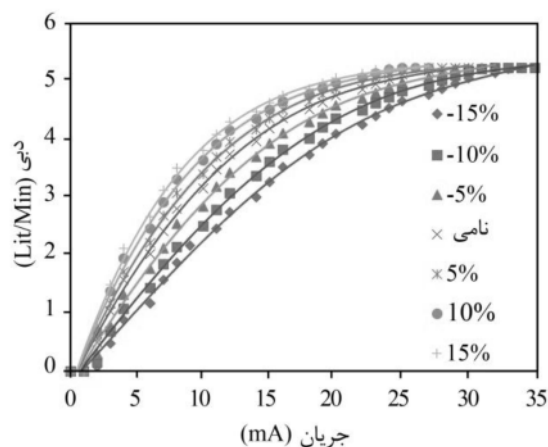
در شکل ۹ همه منحنی‌های دبی - اختلاف فشار $\sqrt{\Delta P}$ مربوط به قطرهای مختلف اریفیس نمایش داده شده است. تمامی این منحنی‌ها به صورت خط ظاهر می‌شوند. از این رو شیب این خطوط می‌تواند جایگزین مقدار نامی آن در الگوریتم شود. منحنی جدید بازشدگی دریچه - جریان الکتریکی مربوط به قطر جدید اریفیس به وسیله حل الگوریتم کامپیوتری بدست می‌آید. بر طبق نمودار شکل ۷ منحنی جدید دبی - جریان به دست می‌آید. در شکل ۱۰ همه منحنی‌های دبی - جریان مربوط به قطرهای مختلف اریفیس نمایش داده شده است.

۴-۱- حساسیت بهره دبی و جریان اشباع به قطر اریفیس

بهره دبی چنانکه در شکل ۶ دیده می‌شود، شیب ناحیه خطی از منحنی دبی - جریان است. این ناحیه از مهم‌ترین مشخصه‌های یک شیر کنترل دبی است [۹].



شکل ۹ منحنی‌های دبی - اختلاف فشار $\sqrt{\Delta P}$ در قطرهای مختلف اریفیس [۹]



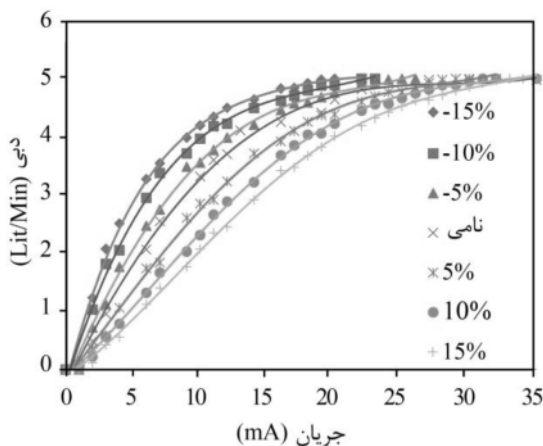
شکل ۱۰ منحنی‌های دبی - جریان در قطرهای مختلف اریفیس [۹]

است لذا قید اشاره شده در بالا در شیر مورد مطالعه رعایت شده است ($0.06 + x_f < 0.155$). این قید در مراحل تحلیل حساسیت فاصله تعادلی نازل- فلپر نیز باید در نظر گرفته شود.

۵-۱- حساسیت مجموعه به فاصله تعادلی نازل- فلپر

تغییرات فاصله تعادلی نازل- فلپر در جدول ۲ آمده است. به روش تحلیل حساسیت نیز در فصل‌های گذشته اشاره شد (ابتدا مقدار جدید فاصله تعادلی در الگوریتم کامپیوتری جایگزین مقدار اصلی می‌شود که از آن منحنی جدید بازشدگی دریچه- جریان حاصل می‌شود. سپس با استفاده از منحنی دبی- بازشدگی دریچه منحنی جدید دبی- جریان به دست می‌آید). تمام منحنی‌های دبی- جریان مربوط به هر فاصله تعادلی در شکل ۱۳ دیده می‌شود.

تغییرات (%)	فاصله تعادلی (mm)
-۱۵	۰/۰۵۱
-۱۰	۰/۰۵۴
-۵	۰/۰۵۷
۰	۰/۰۶۰
۵	۰/۰۶۳
۱۰	۰/۰۶۶
۱۵	۰/۰۶۹



شکل ۱۳ منحنی‌های دبی- جریان در فاصله‌های تعادلی مختلف [۹]

۵-۲- حساسیت بهره دبی و جریان اشباع به فاصله تعادلی

به وسیله شکل ۱۳ خطوط بهره دبی و مقدار جریان دبی اشباع

به نازل است. مطابق شکل ۱۲ جریان سیال از دو مقطع بحرانی (گلوگاهی) عبور می‌کند:

۱- دهانه نازل که یک مقطع دایروی است (مقطع A_1 در شکل ۱۲).

۲- یک مقطع حلقوی که بر دو وجه نازل و فلپر عمود است

(مقطع A_2 در شکل ۱۲). در این مقطع سیال هیدرولیک به صورت شعاعی جریان می‌یابد.

کوچک‌ترین مقطع در عبور سیال نقش یک گلوگاه را ایفا می‌کند [۱۱]. از طرفی تنها اندازه سطح مقطع A_2 متغیر و قابل کنترل است. اگر فرض شود که $A_2 < A_1$ ، برای رسیدن به یک رفتار کنترل‌پذیر، گلوگاه ماندن مقطع A_2 ضروری به نظر می‌رسد. به عبارت دیگر اگر مقطع A_2 از A_1 بزرگ‌تر شود عملاً این مقطع A_1 است که نقش گلوگاهی را ایفا می‌کند. ولی از آنجا که مقطع A_1 مقطعی متغیر و قابل کنترل نیست (حتی با وجود حرکت فلپر)؛ لذا پارامتری برای کنترل سیستم باقی نمی‌ماند. از این رو سطح مقطع A_2 نباید از مقدار مشخصی فراتر رود. بر طبق شکل ۱۲ شرایط ضروری برای عملکرد درست مجموعه نازل- فلپر به صورت رابطه (۲) است [۱۱]:

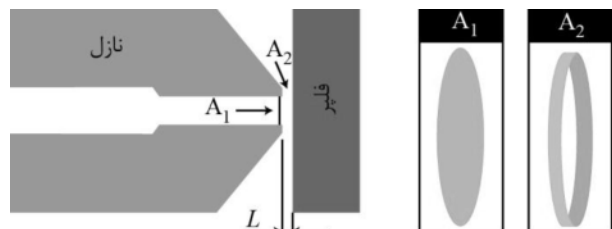
$$A_2 < A_1 \Rightarrow \pi d_n^2 (L + x_f) < \pi d_n^2 / 4 \Rightarrow (L + x_f) < d_n / 4 \quad (2)$$

که در آن d_n قطر نازل، L فاصله تعادلی مابین نازل و فلپر و x_f جابجایی فلپر است. اگر فاصله فلپر- با در نظر گرفتن جابجایی آن نسبت به نازل‌ها- از هر یک از نازل‌ها بیش از مقدار $d_n/4$ شود جریان سیال دیگر تغییر نمی‌کند (حتی با وجود حرکت فلپر) [۱۱]. بر طبق اندازه‌گیری‌های دقیق انجام شده در شیر مورد مطالعه فاصله بحرانی مابین فلپر و نازل به صورت زیر است [۹]:

$$d_n = 0.62 \text{ mm} \rightarrow d_n/4 = 0.155 \text{ mm}$$

همچنین فاصله تعادلی مابین نازل‌ها و فلپر $L = 0.06 \text{ mm}$

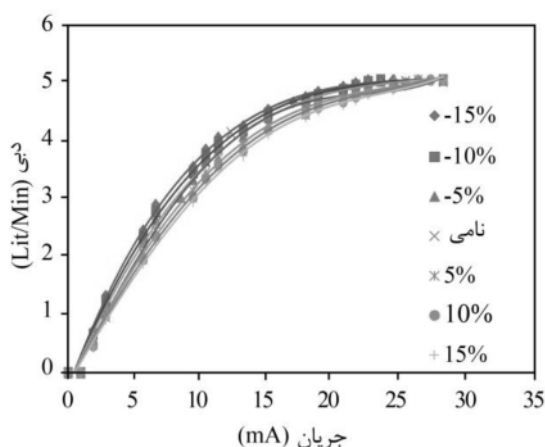
اندازه‌گیری شده است [۹].



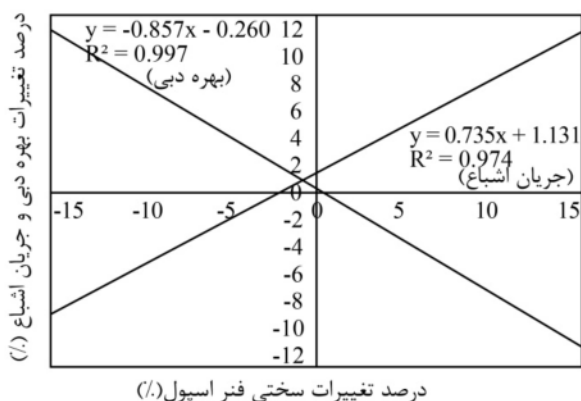
شکل ۱۲ نمای شماتیک نازل و فلپر

از آنجا که جابجایی فلپر (x_f) نیز از مرتبه صدم میلی‌متر

قابل استخراج است. در شکل ۱۶ منحنی حساسیت بهره دبی و جریان اشباع که هر دو خطی است ارائه شده است. مطابق شکل ۱۶ منحنی حساسیت بهره دبی نزولی است که نشان می‌دهد با افزایش سختی فنر اسپول، بهره دبی کاهش می‌یابد. در مقابل منحنی حساسیت جریان اشباع صعودی است که نشان می‌دهد با افزایش سختی فنر اسپول، جریان اشباع افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵ منحنی‌های دبی-جریان در ضریب‌های سختی مختلف فنر اسپول [۹]



شکل ۱۶ منحنی‌های حساسیت بهره دبی و جریان اشباع فنر اسپول

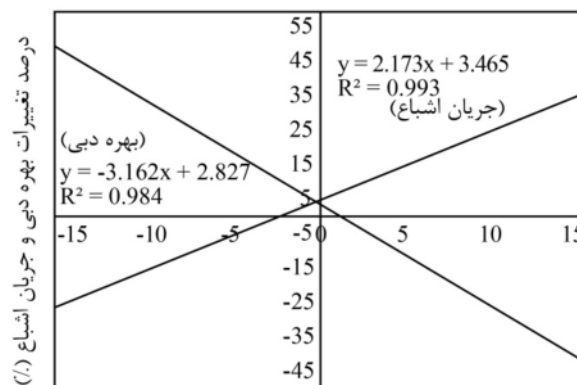
۷- مقایسه حساسیت پارامترهای مختلف شیر

در بخش‌های قبلی حساسیت سه پارامتر از شیر مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه منحنی‌های حساسیت به دست آمده می‌توان میزان حساسیت سه پارامتر مذکور را رتبه‌بندی نمود. از آنجا که همه منحنی‌های حساسیت خطی هستند، بزرگی شیب این

قابل محاسبه است. در شکل ۱۴ منحنی حساسیت بهره دبی و جریان اشباع که هر دو خطی است ارائه شده است. مطابق شکل ۱۴ منحنی حساسیت بهره دبی نزولی است که نشان می‌دهد با افزایش فاصله تعادلی، بهره دبی کاهش می‌یابد. در مقابل منحنی حساسیت جریان اشباع صعودی است که نشان می‌دهد با افزایش فاصله تعادلی، جریان اشباع افزایش می‌یابد.

۶- حساسیت مجموعه به ضریب سختی فنر اسپول

تغییرات سختی فنر اسپول در جدول ۳ ارائه شده است. روش استخراج منحنی‌های جدید دبی-جریان در بخش‌های پیشین ارائه شد. همگی این منحنی‌ها در شکل ۱۵ دیده می‌شود.



درصد تغییرات فاصله تعادلی (%)

شکل ۱۴ منحنی‌های حساسیت بهره دبی و جریان اشباع فاصله تعادلی

جدول ۳ تغییرات ضریب سختی فنر اسپول

تغییرات (%)	ضریب سختی فنر اسپول (N/m)
-۱۵	۳۱۰۲۵
-۱۰	۳۲۸۵۰
-۵	۳۴۶۷۵
۰	۳۶۵۰۰
۵	۳۸۳۲۵
۱۰	۴۰۱۵۰
۱۵	۴۱۹۷۵

۶-۱- حساسیت بهره دبی و جریان اشباع به ضریب سختی فنر اسپول

به کمک شکل ۱۵ خطوط بهره دبی و مقدار جریان دبی اشباع

۹- مراجع

- [1] Tawfic M.N., *Model Based Control of an Electro-Hydraulic Servo Valve*, Ph.D Thesis, Akron-Ohio, University of Akron, 1999.
- [2] Shi Z. Gu F., Lennox B., Ball A.D., "The Development of an Adaptive Threshold for Model-based Fault Detection of a Nonlinear Electro-Hydraulic System", *Control Engineering Practice*, Vol. 13, No.11, 2005, pp. 1357-1367.
- [3] Kim D.H., Tsao T.C., "A Linearized Electro-Hydraulic Servo Valve Model for Valve Dynamics Sensitivity Analysis and Control System", *ASME DSCM*, Vol. 122, Issue.1, 2000, pp. 179-187.
- [4] Mookherjee S., "Design and Sensitivity Analysis of a Single-Stage Electro-Hydraulic Servo Valve", *Proc. of 1st FPNI-PhD Symp.*, Hamburg, 2000, pp. 71-88.
- [5] Farahat S., *Application of Sensitivity Analysis to Parameter Changes in Nonlinear Hydraulic Control Systems*, MS. Thesis, Montreal, Quebec, Concordia University, 1987.
- [6] Maneetham D., Afzulpurkar N., "Modeling, Simulation and Control of High Speed Nonlinear Hydraulic Servo System", *World J. Modeling and Simulation*, Vol. 6, 2010, pp. 27-39.
- [7] Ni J., Peng L., "A Unified Modeling on Electro Hydraulic Position Servo System and Nonlinear Control", *IEEE Int'l Conf. on Intelligent System Design and Engineering Application*, 2010, pp. 268-272.
- [8] Liu J., Wu H., Handroos H., Haario H., "Study of Leakage Model Servo Valve", *Proc. IEEE Int'l Conf. on Mechatronics and Automation*, 2011, pp. 831-836.
- [9] Sadooghi, M.S., Seifi R., Saadat Foumani M., "Simulation and Experimental Validation of Flow-Current Characteristic of a Hydraulic Servo Valve", *Scintialranica*, Vol. 17, No. 5, 2010, pp. 327-336.
- [10] Walters, R.B., *Hydraulic and Electro-Hydraulic Control Systems*, ELSEVIER Science Publisher LTD, 1991.
- [11] Morse A.C., *Electro hydraulic servo mechanism*, Mc Grow-Hill Inc, 1963.
- [12] Watton J., *Modelling, Monitoring and Diagnostic Techniques for Fluid Power Systems*, UK, Springer, 2007, pp.32-70.

خطوط می‌تواند به عنوان معیاری برای مقایسه حساسیت پارامترها در نظر گرفته شود. بزرگی شیب منحنی‌های حساسیت بهره دبی و جریان اشباع مرتبط با هر پارامتر در جدول ۴ ثبت شده است. با مقایسه این مقادیر در جدول ۴ می‌توان به عبارت زیر در مورد حساسیت پارامترها رسید:

فاصله تعادلی < قطر اریفیس > ضریب سختی فنر اسپول

جدول ۴ مقایسه حساسیت پارامترهای مختلف شیر

قطر اریفیس	فاصله تعادلی	ضریب سختی فنر اسپول	
۲/۱۷۳	۳/۱۶۲	۰/۸۵۷	بزرگی شیب بهره دبی در منحنی حساسیت
۱/۷۳۱	۲/۱۳۵	۰/۷۳۵	بزرگی شیب جریان اشباع در منحنی حساسیت

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله حساسیت سه پارامتر از یک نمونه شیر سرو هیدرولیک مورد تحلیل قرار گرفت و منحنی‌های حساسیت مرتبط با هر پارامتر استخراج شد. از آنجا که همه منحنی‌های حساسیت به صورت خطی (مرتبه اول) ظاهر شدند می‌توان چنین برداشت کرد که منحنی‌های رفتاری شیر نسبت به هر پارامتر از مرتبه دوم هستند [۱۲]. همچنین بر طبق جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که رفتار شیر به ترتیب نسبت به فاصله تعادلی نازل- فلپر، قطر اریفیس و ضریب سختی فنر اسپول حساسیت بیشتری دارد. از این نتیجه می‌توان دریافت که در فرآیند طراحی و ساخت شیر و قطعات مربوطه بایستی دقت بیشتر و تolerانس بسته‌تری به ترتیب برای پارامترهای حساس‌تر به کار بست. با توجه به شکل‌های ۱۱، ۱۴ و ۱۶ می‌توان چنین نتیجه گرفت که سه عامل افزایش قطر اریفیس، کاهش فاصله تعادلی نازل- فلپر و کاهش ضریب سختی فنر اسپول موجب افزایش بهره دبی می‌شود و بالعکس. همچنین کاهش قطر اریفیس، افزایش فاصله تعادلی نازل- فلپر و افزایش ضریب سختی فنر اسپول موجب افزایش جریان اشباع می‌شود (و بالعکس). این موارد می‌تواند در فرآیند بهینه‌سازی طراحی شیر و یا تغییر منحنی مشخصه عملکردی به صورت مورد نظر، به کار گرفته شود.