مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1393، دوره 14، شماره 9، ص‌ص 125-132

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شناسایی رفتار هیسترزیس شیر کنترل فشار تناسبی با استفاده از مدل اصلاح شده پرنتل-ایشلینسکی

سحر توراندار[1]، علیرضا فتحی[2]، حمید باصری[3*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

* بابل، کد پستی 47148-71167، h.baseri@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 آذر 1392

پذیرش: 15 بهمن 1392

ارائه در سایت: 02 مهر 1393

کلید واژگان:

مدل پرنتل- ایشلینسکی

هیسترزیس

شیر کنترل فشار تناسبی

چکیده

مدل پرنتل- ایشلینسکی یکی از مدل‌های قدرتمند در شناسایی رفتار غیرخطی هیسترزیس در سیستم‌ها می‌باشد. شکل ابتدایی این مدل که مدل کلاسیک پرنتل- ایشلینسکی نامیده می‌شود، قابلیت شناسایی سیستم‌ها با خروجی اشباع شده را ندارد و همچنین هنگامی که حلقه‌های هیسترزیس نامتقارن باشد، نتایج شامل خطاهای قابل ملاحظه‌ای می‌شود. به منظور از بین بردن این نقاط ضعف، اصلاحاتی بر روی مدل کلاسیک انجام شده است که آن را مدل اصلاح شده پرنتل- ایشلینسکی می‌نامند. این مدل عمولا برای شناسایی رفتار هیسترزیس در موادی مانند پیزوالکتریک، پیزوسرامیک، آلیاژهای حافظه دار و ... استفاده می شود؛ اما در این پژوهش از این مدل، جهت شناسائی رفتار هیسترزیس یک شیر کنترل فشار تناسبی هیدرولیکی که شامل حلقه‌های هیسترزیس نامتقارن می‌باشد، استفاده شده است. این مدل با استفاده از داده های تجربی بدست آمده از شیر کنترل فشار تناسبی، آموزش داده شده و پارامترهای آن به منظور سازگاری هر چه بیشتر آن با رفتار هیسترزیس واقعی، شناسایی شده است. این داده-های تجربی شامل منحنی‌های بازگشتی کاهشی از حلقه‌ی اصلی می‌باشند. سپس دقت مدل بدست آمده در پیش‌بینی رفتار هیسترزیس شیر با استفاده از داده‌های تجربی متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که این مدل از دقت بالایی برخوردار بوده و توانایی زیادی در پیش‌بینی رفتار هیسترزیس شیر کنترل فشار تناسبی دارد..

Identification hysteresis behavior of hydraulic proportional relief valve by the generalized prandtl-ishlinskii mode

Sahar Toorandaz, Alireza Fathi, Hamid Baseri*

Department of Mechanical Engineering, Babol University, Babol, Iran
* P.O.B. 47148-71167 Babol, Iran, h.baseri@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 8 December 2013
Accepted 4 February 2014
Available Online 24 September 2014

Keywords:
Prandtl–Ishlinskii Model
Hysteresis
Proportional Relief Valve

ABSTRACT

The Prandtl-Ishlinskii (P-I) model is one of the powerful models which is used in modeling complex hysteretic nonlinear behavior in systems. The initial form of this model, called the Classical Prandtl-Ishlinskii model, cannot describe systems with output saturation and also results have considerable error when there is an asymmetric in hysteresis loops. In order to eliminate these defects, some modifications are applied to the Classical Prandtl-Ishlinskii model and these models are called the generalized or modified Prandtl-Ishlinskii models. This model is usually utilized in modeling complex hysteresis nonlinear behavior in piezoceramic, piezoelectric, magnetostrictive and shape memory alloy actuators, but in this work, the model is used for identification hysteresis behavior of hydraulic proportional relief valve consist of asymmetric hysteresis loops. This model is trained by the experimental data which are obtained of hydraulic proportional relief valve and then the parameters of the model are identified in order to adapt the model response to the real hysteretic behavior. The data consist of the descending reversal curves of major loop. Then the accuracy of the obtained model in predicting nonlinear hysteresis behavior of the valve is validated with some different experimental data. The results show this model has well accurate and good ability in behavior prediction of proportional relief valve.

1- مقدمه

هیسترزیس پدیده‌ای چالش برانگیز است که در بعضی مواد مانند پیزوالکتریک، پیزوسرامیک، آلیاژهای حافظه‌دار دیده می‌شود. در واقع هیسترزیس، ارتباط بین دو مقدار عددی است که نمی‌تواند به صورت یک تابع تک مقداری بیان شود و شکل یک حلقه را به خود می‌گیرد [1]. از آنجایی که عدم توجه به اثرات هیسترزیس باعث کاهش دقت و عملکرد

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. Toorandaz, A. Fathi, H. Baseri, Identification hysteresis behavior of hydraulic proportional relief valve by the generalized prandtl-ishlinskii mode, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 125-132, 2014 (In Persian)

نامناسب سیستم‌های کنترلی می‌شود، مدل‌سازی دقیق رفتار هیسترزیس و شناسایی و ارزیابی آن و همچنین طراحی یک کنترلر مناسب ضروری می‌باشد. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که با استفاده از معکوس مدل هیسترزیس، میتوان اثرات نامطلوب آن را جبران کرد. همچنین در فرایند طراحی کنترلر، مسأله بررسی حلقه‌های داخلی یک موضوع قابل توجه و مهم می‌باشد. در واقع سیستم‌هایی که رفتار هیسترزیس از خود نشان می‌دهند به هنگام دریافت ورودی بازگشتی نزولی یا صعودی، حلقه‌های داخلی ایجاد کرده و در نتیجه باعث به وجود آمدن هیسترزیس غیرخطی بیشتری می‌شوند. این دلایل باعث شد که محققان به سمت ارائه روشی برای شناسایی رفتار غیرخطی هیسترزیس سیستم‌ها هدایت شوند. به طور کلی دو دسته مدل هیسترزیس پیشنهاد شده است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود [2].

در دسته اول از این مدل‌ها از اصل و اساس فیزیک هیسترزیس استفاده شده و برای توصیف ویژگی‌های مشاهده شده با فاکتورهای تجربی ترکیب شده است [3-5]. از آنجایی که اصل فیزیک بعضی از هیسترزیس‌ها به طور واضح قابل درک نیست، این مدل‌ها قابلیت اجرایی محدودی دارند [6]. همچنین این مدل‌های فیزیکی، مخصوص یک سیستم خاص بوده و برای هر سیستم باید یک کنترلر جداگانه‌ای طراحی شود. از مشکلات دیگر این مدل‌ها این است که برای رسیدن به دقت قابل قبول در شناسایی و تنظیم پارامترهای مدل, نیاز به سعی و خطای زیادی می‌باشد [7].

در دسته دوم از این مدل‌ها، پدیده مشاهده شده به صورت ریاضی و بر پایه‌ی طبیعت پدیده شناسی توصیف می‌شود و نیازی به دید فیزیکی مسأله نیست. مهمترین مدل‌های این دسته شامل مدل‌های هیسترزیس پایه اپراتور و مدل‌های هیسترزیس پایه معادله تفاضلی می‌باشند. مدل پرنتل-ایشلینسکی[1]، مدل کراسنوسلاسکی-پوکروفسکی[2] [1] و مدل پریسچ[3] از مهمترین مدل‌های هیسترزیس پایه اپراتور و مدل دوهم[4] و مدل بوک- ون[5] ازمهم‌ترین مدل‌های هیسترزیس پایه تفاضلی می‌باشند. به دلیل پیچیدگی رفتار هیسترزیس و مسأله معکوس‌پذیری، انتخاب یک روش مناسب و کارآمد برای مدل‌سازی از اهمیت بسزایی برخوردار است.

تحقیقات نشان می‌دهد که در میان مدل‌های ارائه شده، مدل اصلاح شده پرنتل- ایشلینسکی نتایج دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه می‌دهد. این مدل معمولاً برای شناسایی رفتار هیسترزیس موادی مانند پیزوالکتریک، پیزوسرامیک، آلیاژهای حافظه‌دار استفاده شده و تاکنون در زمینه شناسایی رفتار هیسترزیس شیر کنترل فشار تناسبی هیدرولیکی به کار گرفته نشده است، اما در این پژوهش از مدل اصلاح شده پرنتل- ایشلینسکی برای شناسایی رفتار هیسترزیس این نوع شیر استفاده می‌شود. وجود پدیده هیسترزیس در شیر کنترل فشار تناسبی به دلیل وجود نیروهای اصطکاکی بین اسپول و بدنه شیر، عدم توزیع متناسب این نیروها طی حرکت اسپول و همچنین درایور شیر می‌باشد. وجود هیسترزیس در این نوع شیر باعث عدم دست‌یابی به کنترل دقیق فشار در سیستم‌های هیدرولیکی می‌شود.

تحقیقات متنوعی بر روی مدل‌سازی شیرهای هیدرولیکی انجام شده است. چالوپا و همکاران [8] با اندازه‌گیری خصوصیات شیرها، یک مدل ریاضی برای شیرهای کنترلی هیدرولیکی تعریف کرده و ویژگی‌های غیرخطی شیرها مانند هیسترزیس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مطابقت خوبی بین مدل ریاضی پیشنهاد شده و داده‌های تجربی وجود دارد. داسگوپتا و همکاران [9] یک مدل دینامیکی از شیر کنترل فشار تناسبی پیشنهاد کردند. آن‌ها با استفاده از معادلات حاکم بر شیر و تکنیک شبیه‌سازی گراف‌بندی، مدل دینامیکی شیر را شناسایی کردند. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی به صورت تجربی ارزیابی شده و موافقت خوبی بین مدل و داده‌های تجربی به دست آمد.

یکی از کاربردهای ویژه این نوع شیرها در فرآیند هیدروفرمینگ ورق بوده که در آن تغییرات فشار اعمالی به قطعه (ورق) عامل موثری در کیفیت قطعه تولید شده می‌باشد. لذا وجود یک سیستم کنترلی جهت کنترل دقیق فشار فرایند، بسیار ضروری می‌باشد. شناسایی مدل هیسترزیس سیستم و سپس دستیابی به معکوس آن و استفاده از این معکوس به عنوان کنترل کننده جلوسو[6]، می‌تواند اثرات رفتار هیسترزیسی سیستم را جبران کند و باعث کنترل دقیق‌تر فشار در سیستم هیدرولیکی شود.

لذا در این پژوهش مدل اصلاح شده پرنتل- ایشلینسکی با استفاده از داده‌های تجربی بدست آمده از شیر کنترل فشار تناسبی، آموزش داده شده و پارامترهای آن شناسایی می‌شوند تا در مطالعات بعدی جهت طراحی یک کنترل کننده فشار بکار گرفته شوند.

2- مدل پرنتل- ایشلینسکی

مدل پرنتل- ایشلینسکی یکی از مدل های قدرتمند برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی هیسترزیس پیچیده می باشد. از ویژگی های برجسته آن برخلاف مدل‌های پریسچ و کراسنوسلاسکی که به صورت عددی معکوس‌پذیر می‌باشند، این است که این مدل به صورت تحلیلی معکوس‌پذیر است، بنابراین به آسانی می‌تواند به عنوان یک کنترلر پیشرو برای جبران رفتار غیرخطی هیسترزیس استفاده شود. مدل پرنتل- ایشلینسکی همانند مدل پریسچ بر پایه عملگر راه‌انداز[7] و یک تابع چگالی[8] تعریف می‌شود [1].

شکل ابتدایی مدل پرنتل- ایشلینسکی که مدل کلاسیک پرنتل-ایشلینسکی نامیده می‌شود، نمی‌تواند سیستم‌هایی با خروجی اشباع را شناسایی کند، همچنین به دلیل طبیعت متقارن عملگر راه‌اندازها، در هنگام استفاده از این مدل در حلقه‌های هیسترزیس نامتقارن، خطاهای قابل ملاحظه ای به دست می‌آید. به همین دلیل محققان برای رفع این نواقص، اصلاحاتی را بر روی این مدل انجام دادند.

کوهنن [10] از طریق ترکیب عملگر مدل کلاسیک پرنتل- ایشلینسکی و یک تابع نامتقارن، اپراتور اصلاح شده‌ای معرفی کرد که برای توصیف رفتار غیرخطی نامتقارن اشباع شده مناسب می‌باشد. بروکیت [1] و ویزینتین [11] یک عملگر راه‌انداز غیرخطی برای مدل کلاسیک پرنتل- ایشلینسکی پیشنهاد کردند که حلقه‌های هیسترزیس نامتقارن و خروجی اشباع را توصیف می‌کند. الجنیده و همکاران [12] از یک عملگر راه‌انداز اصلاح شده نامتقارن در مدل کلاسیک پرنتل- ایشلینسکی و یک تابع چگالی، برای تشریح رفتار هیسترزیس نامتقارن در سیستم‌های محرک هوشمند استفاده کردند. همچنین از این مدل می‌توان به طور مستقیم برای هیسترزیس متقارن نیز استفاده کرد.

نتایج نشان می‌دهد با وجود اینکه مدل کلاسیک پرنتل- ایشلینسکی توانایی شناسایی خصوصیات هیسترزیس متقارن را دارد، مدل اصلاح شده پیشنهادی خطاهای به نسبت کمتری در پیش‌بینی رفتار هیسترزیس متقارن

1- Prandtl-Ishlinskii
2- Krasnoselskii – Pokrovskii
3- Preisach
4- Duhem
5- Bouc-Wen

6- Feed-Forward
7- Play Operator
8- Density Function

از خود نشان می‌دهد. از آنجایی که خروجی مدل پیشنهادی به نوع تابع چگالی و تابع پوشش[1] وابسته است، این توابع با توجه به رفتار هیسترزیس سیستم مانند خروجی اشباع و حلقه‌های نامتقارن انتخاب می‌شوند. سپس پارامترهای این توابع از طریق روش بهینه سازی برای حداقل کردن خطا با توجه به داده‌های تجربی، به دست می‌آید.

2-1- مدل اصلاح شده پرنتل - ایشلینسکی

مدل پرنتل- ایشلینسکی از یک عملگر راه‌انداز و یک تابع چگالی برای تشریح رفتار هیسترزیس مواد استفاده می‌کند. عملگر راه‌انداز نشان داده شده در شکل 1- الف یک عملگر هیسترزیس کلاسیک و مستقل از نرخ تغییرات بوده که جزئیات آن در [13] یافت می‌شود.

این عملگر توسط ورودی v و آستانه[2] r توصیف می‌شود. آستانه r عرض عملگر هیسترزیس را مشخص کرده و دارای یک مقدار ثابت مثبت به صورت $r_0=0< r_1<...<r_i< r_{i+1}<...<r_n= R$ می‌باشد.

$C_m[0,T]$ فضای تکه‌ای یکنواخت از توابع پیوسته فرض شده است به طوری که در هر زیرفاصله $[t_i\ ,\ t_{i+1}]$ که $t_0=0< t_1<...<t_i< t_{i+1}<...<t_N=t_E$ ، ورودی $v(t)\in C_m[t_0,t_E]$ یکنواخت می‌باشد. به ازای هر ورودی $v(t)$، عملگر هیسترزیس به صورت تحلیلی تعریف می‌شود [1]. طبق رابطه (1) و (2) داریم:

$$\begin{cases} F_r[v](0)=f_r\left(v(0),0\right)=w(0) \\ F_r[v](t)=f_r\left(v(t),F_r[v](t_i)\right) \end{cases}, 0<i<n-1, t_i<t<t_{i+1} \tag{1}$$

$$f_r(v,w)=\max\left(v-r,\min\left(v+r,w\right)\right) \tag{2}$$

مدل کلاسیک پرنتل- ایشلینسکی با استفاده از عملگر راه‌انداز $Fr[v](t)$ رابطه بین خروجی $y_{classical}$ و ورودی v را به صورت رابطه (3) [1]:

$$y_{classical}(t)=\int_0^R p(r)F_r[v](t)dr \tag{3}$$

توصیف می‌کند که $p(r)$ یک تابع چگالی با مقدار مثبت می‌باشد.

از آنجا که در کاربردهای عملی از تعداد محدودی عملگر راه‌انداز استفاده می‌شود، می‌توان خروجی مدل کلاسیک پرنتل–ایشلینسکی را به صورت رابطه (4):

$$y_{classical(t)}=\sum_{j=0}^{n} p_j F_{r_j}[v](t) \tag{4}$$

شکل 1 ارتباط بین ورودی و خروجی در عملگر راه انداز الف- کلاسیک و ب- اصلاح شده [14]

1- Envelope Function
2- Threshold

نیز بیان نمود که n تعداد عملگر راه‌انداز کلاسیک می‌باشد و p_j عموماً با استفاده از داده‌های تجربی و از طریق حداقل‌کردن خطای بین مقدار واقعی و پاسخ مدل، شناسایی می‌شود.

با توجه به اینکه عملگر راه‌انداز کلاسیک، طبیعت متقارن و بیکرانی دارد، از مدل کلاسیک پرنتل- ایشلینسکی نمی‌توان برای سیستم‌هایی با حلقه‌های نامتقارن و خروجی اشباع استفاده کرد. به منظور جبران این نواقص، بروکیت [1] و ویزینتین [11] یک عملگر راه‌انداز اصلاح‌شده پیشنهاد کردند.

عملگر راه‌انداز اصلاح‌شده، یک عملگر غیرخطی است که با افزایش و کاهش ورودی v، خروجی w نیز در طول منحنی های γ_l و γ_r که در شکل 1- ب نشان داده شده، افزایش یا کاهش می‌یابد. منحنی های γ_l و γ_r ($\gamma_l < \gamma_r$) ، توابع پوشش پیوسته، کراندار و معکوس پذیر در بازه‌ی ورودی می‌باشند [1]. خروجی عملگر راه‌انداز اصلاح شده برای هر ورودی و آستانه r به صورت روابط (5) و (6) تعریف می‌شود [13]:

$$\begin{cases} G_r[v](0)=g_r\left(v(0),0\right)=w(0) \\ G_r[v](t)=g_r\left(v(t),G_r[v](t_i)\right) \end{cases}, 0<i<n-1, t_i<t<t_{i+1} \tag{5}$$

$$g_r(v,w)=\max\left(\gamma_l(v)-r,\min\left(\gamma_r(v)+r,w\right)\right) \tag{6}$$

وخروجی مدل اصلاح‌شده پرنتل- ایشلینسکی، $y_{generalized}$، نیز به صورت رابطه (7) [13]:

$$y_{generalized}(t)=\int_0^R p(r)G_r[v](t)dr \tag{7}$$

بیان می‌شود. همچنین در مواردی که از تعداد محدودی عملگر راه‌انداز استفاده می‌شود طبق رابطه (8) داریم:

$$y_{generalized(t)}=\sum_{j=0}^{n} p_j G_{r_j}[v](t) \tag{8}$$

که n تعداد عملگر راه‌انداز اصلاح شده می‌باشد.

در واقع مدل کلاسیک پرنتل– ایشلینسکی نوع ویژه‌ای از مدل اصلاح- شده آن با تابع پوشش‌های $\gamma_l(v)=\gamma_r(v)=v$ می‌باشد.

2-2- فرمول بندی توابع پوشش، چگالی و آستانه

خروجی مدل اصلاح‌شده پرنتل- ایشلینسکی به شدت به نوع تابع چگالی و تابع پوشش وابسته است. در نتیجه این توابع باید بر پایه خصوصیات شناخته- شده از سیستم تعریف شوند و همچنین خروجی اشباع‌شدهٔ سیستم و حلقه- های نامتقارن هیسترزیس در نظر گرفته شوند. برای سیستم هایی با حلقه- های ورودی - خروجی متقارن، بهتر است توابع پوشش یکسانی ($\gamma_l(v)=\gamma_r(v)$) استفاده شود. گذشته از این، پارامترهای این توابع بر روی خروجی آن‌ها بسیار مؤثر می‌باشند، بنابراین این پارامترها با توجه به داده‌های تجربی سیستم و به منظور توانایی پیش‌بینی صحیح رفتار سیستم، نیاز به شناسایی می‌باشند.

الجنیده و همکاران [13] توابع تانژانت هیپربولیک را با توجه به خصوصیات پیوستگی، کرانداری و معکوس‌پذیری آن، برای توابع پوشش پیشنهاد کرده‌اند. در این پایان‌نامه نیز با توجه به خصوصیات ذکر شده، توابع تانژانت هیپربولیک به عنوان توابع پوشش انتخاب شده‌اند. در این پژوهش، به دلیل وجود حلقه‌های نامتقارن بین ورودی و خروجی شیر کنترل فشار تناسبی، از توابع پوشش مختلف تانژانت هیپربولیک $\gamma_l(v)\neq \gamma_r(v)$ به صورت روابط (9) و (10) استفاده شده است:

$$\gamma_r(v)=a_1\tanh(a_2v+a_3)+a_4,\quad a_1,a_2>0 \tag{9}$$

$$\gamma_l(v)=a_5\tanh(a_6v+a_7)+a_8,\quad a_5,a_6>0 \tag{10}$$

و توابع چگالی و آستانه نیز به صورت روابط (11) و (12) بیان می‌شوند:

$$p_j=a_9e^{-a_{10}r_j},\quad a_9>0 \tag{11}$$

$$r_j=a_{11}j,\quad (j=0,...,n) \tag{12}$$

شایان ذکر است که توابع پوشش و چگالی پیشنهاد شده برای عملگر راه‌انداز اصلاح‌شده، توابع منحصر به فردی نمی‌باشند و وابسته به طبیعت هیسترزیس یک سسیستم خاص می‌باشند.

در ابتدا، به منظور مدل‌سازی سیستم و دستیابی به رفتار هیسترزیس شیر کنترل فشار تناسبی، 11 پارامتر ذکر شده ($a_1, a_2, ..., a_{11}$) نیاز به شناسایی می‌باشند. به منظور دست‌یابی به توانایی پیش بینی صحیح رفتار هیسترزیس سیستم، این پارامترها با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شدهٔ تجربی و از طریق روش بهینه‌سازی، برای حداقل کردن خطا، شناسایی شده‌اند. مسأله حداقل کردن خطا با در نظر گرفتن قیود زیر انجام شده است:

$a_1, a_2, a_5, a_6, a_9 > 0$

3- تجهیزات آزمایشگاهی

برای تعیین مقادیر پارامترهای موجود در مدل اصلاح شده پرانتل - ایشلینسکی، به داده‌های تجربی نیاز می‌باشد. از این رو ولتاژهایی با فرکانس‌های متفاوت، به عنوان ورودی به شیر هیدرولیکی اعمال شده و مقادیر فشار، بعنوان خروجی اندازه‌گیری می‌شود. در ادمه مختصری از آزمایش‌های انجام شده و تجهیزات مورد استفاده بیان خواهد شد.

در شکل 2 تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مربوطه نشان داده شده است. مطابق شکل، این تجهیزات عبارتند از: 1) منبع تغذیه هیدرولیکی 2) منبع تغذیه الکتریکی 3) شیر کنترل فشار تناسبی 4) سنسور فشار 5) راه انداز شیر 6) کارت جمع آوری داده 7) سیستم پردازشگر جهت اجرای برنامه لب ویو[1]

در شکل 3 نحوه اتصال آن‌ها نشان داده شده است. . همچنین شکل 4 مدار هیدرولیکی سیستم را نشان می دهد. منبع تغذیه هیدرولیکی مورد استفاده دارای حداکثر فشار کاری 60 بار و دبی 4 لیتر بر دقیقه می‌باشد. جدول 1 نیز مشخصات تجهیزات مورد استفاده را نشان می‌دهد.

3-1- مراحل انجام آزمایش

به منظور جمع آوری داده‌های تجربی برای شناسایی مدل هیسترزیس مراحل زیر انجام می‌شود:

شکل 2 تجهیزات سخت‌افزاری مورد استفاده و نحوه ارتباط آنها با یکدیگر

1- Labview

شکل 3 نحوه اتصال تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها

شکل 4 مدار هیدرولیکی مورد استفاده در انجام آزمایش

جدول 1 لیست تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها

نام وسیله	نوع	شرکت سازنده
شیر کنترل فشار تناسبی	PDV700	بیری[2]
راه‌انداز شیر	SD6	واندفلو[3]
کارت اخذ داده	µDAQ-Lite	ایگل[4]
سنسور فشار	ATM.ECO	اس تی اس[5]

مرحله 1- با استفاده از نرم افزار لب ویو برنامه‌ای تهیه شد تا تغییرات ولتاژ را ایجاد نماید. در واقع ولتاژ به عنوان ورودی سیستم می‌باشد. در شکل 2 نمائی از این برنامه در سیستم پردازشگر دیده می‌شود.

مرحله 2- تغییرات ولتاژ از طریق درگاه USB سیستم پردازشگر به کارت جمع آوری داده و سپس به راه انداز شیر و بعد از آن به شیر کنترل فشار تناسبی ارسال می‌شود.

مرحله 3- با ارسال تغییرات ولتاژ به شیر، تغییرات فشار در سیستم رخ می‌دهد. در اینجا، خروجی پمپ منبع تغذیه هیدرولیکی به دهانه فشار (P) شیر متصل شده است. دهانه تخلیه (T) شیر نیز به تانک ارتباط دارد.

مرحله 4- مقادیر فشار به عنوان خروجی سیستم، توسط سنسور فشار به کارت جمع آوری داده ارسال و سپس به سیستم پردازشگر منتقل و ثبت می‌شود.

2- BIERI
3- Wandfluh
4- Eagle
5- STS

لازم به ذکر است که مطابق شکل 4، در انجام آزمایش‌ها فشار شیر اطمینان اصلی مدار روی 60 بار تنظیم شده است تا فشار شکست بالاتری نسبت به فشارهای مورد نظر در شیر کنترل فشار تناسبی داشته باشد تا در مدل‌سازی ها فقط شیر کنترل فشار تناسبی مدل شود.

فرضیات بکار رفته در این پژوهش عبارتند از:

- دما، شرایط اصطکاکی و پسماندهای مغناطیسی ثابت در نظر گرفته شده و در تمام آزمایش‌ها یکسان هستند.
- نوسانات فشار پمپ و نشتی پمپ ناچیز بوده و قابل صرف نظر می‌باشد.

4- فرایند شناسایی پارامترهای مدل

در این پژوهش، با استفاده از داده های تجربی بدست آمده و مدل اصلاح شده‌ی پرنتل- ایشلینسکی، مدل هیسترزیس شیر هیدرولیکی شناسایی می‌شود. این فرایند که "آموزش" نامیده شده، با استفاده از جعبه ابزار بهینه سازی نرم افزار متلب[1] و روش بهینه سازی گرادیان توام با شرط اولیه، به منظور حداقل‌کردن خطای بین مقادیر موردنظر و مقادیر پیش‌بینی شده، انجام می‌شود. در این پژوهش از 10 اپراتور راه‌انداز اصلاح شده (n) استفاده شده است. ولتاژ ورودی فرایند آموزش نیز به صورت منحنی بازگشتی کاهشی می‌باشد که در شکل 5 نشان داده شده است. نکته بسیار مهم در انتخاب این نوع ورودی آن است که آهنگ تغییرات ولتاژ بسیار کوچکتر از سرعت پاسخ سیستم می‌باشد، به طوری که می‌توان اطمینان حاصل نمود که خروجی سیستم در هر لحظه، خروجی حالت ماندگار و پایای سیستم می‌باشد. در این فرایند از 7998 داده شامل یک حلقه اصلی و سه حلقه داخلی استفاده شده است.

از آنجایی که داده‌های اندازه‌گیری شده از چند حلقه داخلی تشکیل شده است، اگر در همان ابتدا از همه‌ی داده‌ها به یک باره استفاده شود، نمی‌توان به راحتی پارامترهای بهینه‌ای برای مدل شناسایی کرد به گونه‌ای که کمترین خطا را داشته باشد. از این رو فرایند شناسایی ابتدا برای حلقه اصلی انجام می‌شود. سپس حلقه دوم اضافه شده و پارامترهای بدست آمده از شناسایی اول، به عنوان مقدار اولیه برای شناسایی دوم در نظر گرفته می‌شود. این فرایند تا حلقه‌ی آخر تکرار می‌شود.

در مرحله آخر پارامترهای بهینه نهایی به دست آمده و میانگین مربعات خطا برابر 0/3935 بار شده است. همچنین در شکل 6 کل داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های پیش‌بینی شده مدل، با یکدیگر مقایسه و در جدول 2 پارامترهای بهینه نیز بیان شده است.

11 پارامتر شناسایی شده در فرایند شناسایی، پارامترهای بهینه نهایی می‌باشند که به منظور حداقل کردن خطا و سازگاری هر چه بیشتر خروجی مدل و داده‌های تجربی، به دست آمده است. شکل 6 نشان می دهد که مدل اصلاح شده پرنتل – ایشلینسکی با توابع پوشش و چگالی انتخاب شده و پارامترهای شناسایی شده، برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی هیسترزیس شیر کنترل فشار تناسبی با حلقه نامتقارن و خروجی اشباع، بسیار مناسب می باشد. به منظور نشان دادن این خصوصیات، مقدار میانگین، ماکزیمم و میانگین مربعات خطای مطلق در جدول 3 آمده است. از آنجایی که مقدار میانگین فشار برابر 26/0639 بار بوده، میانگین خطا حدود 1/03% از خروجی متوسط می باشد.

1- MATLAB

شکل 5 ولتاژ ورودی استفاده شده در فرایند شناسایی

شکل 6 مقایسه رفتار هیسترزیس داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل اصلاح شده پرنتل-ایشلینسکی در فرایند شناسایی

جدول 2 پارامترهای شناسایی شده ی مدل اصلاح شده‌ی پرنتل – ایشلینسکی با استفاده از داده های تجربی شیر کنترل فشار تناسبی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
a_1	400/7490	a_7	-2/9683
a_2	0/6199	a_8	35/2743
a_3	-3/2759	a_9	22/3160
a_4	400/4820	a_{10}	5/1907
a_5	34/6262	a_{11}	0/7584
a_6	1/4320	-	-

جدول 3 خطای مدل اصلاح شده پرنتل – ایشلینسکی در فرایند شناسایی

میانگین خطای مطلق (بار)	ماکزیمم خطای مطلق (بار)	میانگین مربعات خطا (بار)
0/2685	1/2096	0/1168

5- صحت‌سنجی مدل اصلاح شدهٔ پرنتل–ایشلینسکی

به منظور بررسی دقت و مقایسه پیش‌بینی مدل شناسایی داده شده با داده‌های تجربی، سه فرایند صحت‌سنجی با ورودی‌های متفاوت انجام شده است. این ورودی‌ها همانند ورودی فرایند آموزش به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که آهنگ تغییرات ولتاژ بسیار کوچکتر از سرعت پاسخ سیستم بوده و خروجی سیستم در هر لحظه، خروجی حالت ماندگار و پایای سیستم می‌باشد.

همچنین سه صحت‌سنجی به نحوی طراحی شده‌اند که در صحت‌سنجی اول حلقه‌های داخلی، در صحت‌سنجی دوم حلقه‌های خارجی و در صحت‌سنجی سوم حلقه‌های ترکیبی شناسایی شوند. در صحت‌سنجی اول، از سیگنال ورودی شبیه به سیگنال ورودی مربوط به فرایند آموزش، اما با دوره تناوب متفاوت استفاده شده است (شکل 7). داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی مدل در شکل 8 با یکدیگر مقایسه شده است و کارایی این مدل با توجه به خطای مطلق در بعد زمان نشان داده شده در شکل 9، دیده می‌شود. همان‌طوری که مشاهده می‌شود مدل اصلاح شده پرنتل-ایشلینسکی توانایی خوبی در پیش‌بینی رفتار سیستم تحت ورودی مشابه با ورودی فرایند آموزش دارد. به منظور وضوح بیشتر این خصوصیات، مقدار ماکزیمم، میانگین و میانگین مربعات خطای مطلق در جدول 4 داده شده است. در این صحت‌سنجی میانگین خطا حدود 2/37% از فشار متوسط می‌باشد.

در صحت‌سنجی دوم برای بررسی بهتر از پیش‌بینی مدل اصلاح‌شده پرنتل - ایشلینسکی از منحنی ولتاژ نشان داده شده در شکل 10 استفاده می‌شود. بر خلاف صحت‌سنجی اول، ولتاژ به صورت منحنی‌های بازگشتی افزایشی می‌باشد. داده‌های تجربی بدست آمده از این ولتاژ با پیش‌بینی مدل اصلاح‌شده پرنتل -ایشلینسکی در شکل 11 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقدار خطای مطلق بین پاسخ سیستم و داده‌های اندازه‌گیری شده در بعد زمان نیز در شکل 12 نشان داده شده است. همچنین مقدار ماکزیمم و میانگین و میانگین مربعات خطا در جدول آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در این مورد با وجود منحنی ولتاژی متفاوت با منحنی استفاده شده در فرایند آموزش، پیش‌بینی مدل بسیار خوب بوده است. در این قسمت، میانگین خطا حدود 1/48% از میانگین فشار می‌باشد.

شکل 7 ولتاژ ورودی استفاده شده در صحت‌سنجی اول

شکل 8 مقایسه بین پاسخ فشار مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در بعد زمان در صحت‌سنجی اول

شکل 9 خطای مطلق بین مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در بعد زمان در صحت-سنجی اول

جدول 4 خطای مدل در صحت‌سنجی اول

میانگین خطای مطلق (بار)	ماکزیمم خطای مطلق (بار)	میانگین مربعات خطا (بار)
0/6095	1/9644	0/6209

شکل 10 ولتاژ ورودی استفاده شده در صحت‌سنجی دوم

شکل 11 مقایسه بین پاسخ فشار مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در بعد زمان در صحت‌سنجی دوم

شکل 12 خطای مطلق بین مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در بعد زمان در صحت-سنجی دوم

جدول 5 خطای مدل در صحت‌سنجی دوم

میانگین خطای مطلق (بار)	ماکزیمم خطای مطلق (بار)	میانگین مربعات خطا (بار)
0/6307	2/1142	0/6357

در صحت‌سنجی سوم، منحنی ولتاژ با منحنی‌های صحت‌سنجی اول و دوم متفاوت است و به منظور تعیین دقت پیش‌بینی مدل در تغییرات پیچیده و نامنظم ورودی استفاده شده است (شکل 13). مقایسه بین پیش‌بینی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در شکل 14 آمده است. پاسخ خطای مطلق سیستم در بعد زمان در شکل 15 نشان داده شده است. همچنین مقدار خطای مطلق میانگین، ماکزیمم و میانگین مربعات در جدول بیان شده است. در این مورد مقدار میانگین خطای مطلق حدود2/73% از میانگین خروجی سیستم می‌باشد.

همان طور که مشاهده می‌شود در این مورد با وجود منحنی ورودی کاملا متفاوت با منحنی استفاده شده در فرایند آموزش، به جز در چند نقطه محدود، نتایج قابل قبول و تقریبا مشابهی با صحت‌سنجی‌های قبل به دست آمده است.

البته این نکته شایان ذکر است که تفاوت خطاها در سه صحت‌سنجی ناشی از عدم قطعیت‌های سیستم و وجود پارامترهای مدل‌سازی نشده می‌باشد.

این سه صحت‌سنجی توانایی مدل اصلاح‌شده پرنتل - ایشلینسکی را در پیش‌بینی رفتار هیسترزیس شیر کنترل فشار تناسبی اثبات می‌کنند. نتایج

شکل 13 ولتاژ ورودی استفاده شده در صحت‌سنجی سوم

شکل 14 مقایسه بین پاسخ فشار مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در بعد زمان در صحت‌سنجی سوم

شکل 15 خطای مطلق بین مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در بعد زمان در صحت-سنجی سوم

جدول 6 خطای مدل در صحت‌سنجی سوم

میانگین خطای مطلق (بار)	ماکزیمم خطای مطلق (بار)	میانگین مربعات خطا (بار)
0/8862	3/5425	1/4413

نشان می‌دهد که تغییر در سیگنالهای ورودی باعث ایجاد خطاهای ناچیزی در پیش‌بینی مدل شده که قابل صرف نظر می‌باشد.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل اصلاح شده پرنتل–ایشلینسکی، برای شناسائی رفتار هیسترزیس یک شیر کنترل فشار تناسبی استفاده شده است. نتایج نشان دادند که پس از آموزش مدل و هنگام استفاده از ورودی‌های مختلف با منحنی بازگشتی کاهشی، افزایشی و کاهشی- افزایشی، میانگین خطا در پیش‌بینی توسط مدل به ترتیب 2/37%، 1/48% و 2/73% شدند. این سازگاری نشان می‌دهد که مدل‌سازی هیسترزیس پیشنهاد شده، برای شیر بسیار مناسب است. لذا در ادامه پژوهش، استفاده از معکوس مدل به عنوان کنترل کننده جلوسو، بسیار کارآمد خواهد بود و می‌تواند اثرات نامناسب هیسترزیس در شیر کنترل فشار را جبران نموده و باعث کنترل دقیق‌تر فشار شود. همچنین می‌توان مدل هیسترزیس را در یک فرایند حلقه بسته و به صورت آنلاین شناسایی نمود. در واقع می‌توان به صورت بازگشتی و با استفاده

از تکنیک‌های کالمن فیلتر یا روش حداقل میانگین مربعات، ضرایب شناسایی شده را به مرور تطبیق داد.

7- مراجع

[1] M. Brokate, *Hysteresis and phase transitions*: Springer, 1996.

[2] X. Tan, R. V. Iyer, Modeling and control of hysteresis, *Control Systems, IEEE*, Vol. 29, No. 1, pp. 26-28, 2009.

[3] V. Basso, C. P. Sasso, M. LoBue, Thermodynamic aspects of first-order phase transformations with hysteresis in magnetic materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 316, No. 2, pp. 262-268, 2007.

[4] S. Cao, B. Wang, R. Yan, W. Huang, Q. Yang, Optimization of hysteresis parameters for the Jiles-Atherton model using a genetic algorithm, *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, Vol. 14, No. 2, pp. 1157-1160, 2004.

[5] J. Leite, S. L. Avila, N. Batistela, W. Carpes Jr, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, J. P. A. Bastos, Real coded genetic algorithm for Jiles-Atherton model parameters identification, *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol. 40, No. 2, pp. 888-891, 2004.

[6] K. K. Ahn, N. B. Kha, Modeling and control of shape memory alloy actuators using Preisach model, genetic algorithm and fuzzy logic, *Mechatronics*, Vol. 18, No. 3, pp. 141-152, 2008.

[7] R. B. Gorbet, *Control of hysteretic systems with Preisach representations*: Citeseer, 1998.

[8] P. Chalupa, J. Novak, V. Bobal, Modeling of hydraulic control valves, *sign*, Vol. 1, No. 1, pp. 1, 2011.

[9] K. Dasgupta, J. Watton, Dynamic analysis of proportional solenoid controlled piloted relief valve by bondgraph, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 13, No. 1, pp. 21-38, 2005.

[10] K. Kuhnen, Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities: A modified Prandtl-Ishlinskii approach, *European Journal of Control*, Vol. 9, No. 4, pp. 407-418, 2003.

[11] A. Visintin, *Differential models of hysteresis*: Springer Berlin, 1994.

[12] M. Al Janaideh, S. Rakheja, C.-Y. Su, A generalized Prandtl–Ishlinskii model for characterizing the hysteresis and saturation nonlinearities of smart actuators, *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 4, pp. 045001, 2009.

[13] M. Al Janaideh, S. Rakheja, C.-Y. Su, An analytical generalized Prandtl–Ishlinskii model inversion for hysteresis compensation in micropositioning control, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 16, No. 4, pp. 734-744, 2011.

[14] H. Sayyaadi, M. R. Zakerzadeh, Position control of shape memory alloy actuator based on the generalized Prandtl–Ishlinskii inverse model, *Mechatronics*, 2012.