آزمایش سخت‌افزار در حلقه توان برای درایوهای پمپ- اینورتر در شبکه‌های توزیع آب

یونس نوروزی[۱]، مصطفی نصیری[۲*]، مرضیه رضازاده[۳]، محمدرضا چوپانی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۲- هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، m.nasiri@iut.ac.ir

۳- هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

چکیده

در این مطالعه، یک چارچوب سخت‌افزار در حلقه برای ارزیابی آزمایشگاهی درایو پمپ- اینورتر در سامانه‌های توزیع آب ارائه شده است. این پلتفرم شامل یک الکتروپمپ، یک اینورتر با سرعت متغیر و یک شیر استپر به‌عنوان بار هیدرولیکی قابل کنترل است که با شبیه‌سازی بلادرنگ بخش باقی‌مانده شبکه آب ترکیب شده است. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه، یک مدل ریاضی توسعه یافته و در پیکربندی مدل در حلقه به‌کار گرفته شده است. تحلیل‌های مقایسه‌ای نشان‌دهنده تطابق بسیار نزدیک بین دو روش است، به‌طوری‌که خطای ریشه میانگین مربعات (RMS) برای متغیرهای دبی خروجی، فشار تخلیه و افت فشار به‌ترتیب برابر با ۰/۱۸ لیتر بر دقیقه، ۰/۰۰۹ مگاپاسکال و ۰/۰۱۱ مگاپاسکال به‌دست آمده و بیشینه اختلاف نسبی میان پاسخ‌ها کمتر از ۴/۱ درصد است که دقت بالای سامانه پیشنهادی را اثبات می‌کند. آزمایش‌های ایستا و دینامیکی به‌منظور شناسایی رفتار سیستم انجام شده‌اند. در آزمایش‌های ایستا، ارتباط بین میزان بازشدگی شیر، دبی و فشار در سرعت‌های مختلف موتور بررسی گردیده است، در حالی که آزمایش‌های دینامیکی، توانایی چارچوب پیشنهادی را در بازتولید پاسخ‌های گذرا و ثبت اثرات غیرخطی مانند هیسترزیس نشان می‌دهد. علاوه بر این، یک درایو با فرکانس متغیر به همراه کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی برای تنظیم فشار به کار گرفته شده است که عملکردی پایدار و مقاوم در برابر تغییر شرایط اولیه از خود نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که روش شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه توسعه‌یافته برای مطالعه‌ی عملکرد و کنترل سیستم‌های پمپ-اینورتر مؤثر بوده و توازنی مناسب میان واقع‌گرایی آزمایشگاهی و انعطاف‌پذیری مدل‌سازی فراهم می‌کند. این چارچوب ابزاری مطمئن برای اعتبارسنجی سیستم‌ها ارائه داده و می‌تواند از توسعه‌های آینده در زمینه‌ی کنترل‌های بهینه‌ی انرژی، تحلیل خطا، و مدیریت هوشمند آب پشتیبانی کند.

کلمات کلیدی

سخت‌افزار در حلقه توان (PHIL) ، درایو پمپ- اینورتر، سامانه توزیع آب.

* نویسنده مسئول

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

سامانه‌های پمپاژ یکی از ارکان اصلی در زیرساخت‌های انتقال و توزیع سیالات به‌شمار می‌آیند و در طیف گسترده‌ای از کاربردها، از شبکه‌های آبرسانی شهری و سامانه‌های آبیاری گرفته تا فرایندهای صنعتی، تأسیسات حرارتی و سامانه‌های خنک‌کاری، نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. با توجه به سهم بالای این سامانه‌ها در مصرف انرژی الکتریکی، بهبود عملکرد آن‌ها از منظر بهره‌وری انرژی، قابلیت اطمینان و کیفیت کنترل، به یکی از موضوعات مهم در پژوهش‌های مهندسی تبدیل شده است [۱, ۲]. در بسیاری از سامانه‌های متداول، کنترل دبی و فشار از طریق روش‌هایی نظیر خفه‌سازی جریان به‌وسیله شیر کنترل یا استفاده از خطوط بای‌پس انجام می‌شود. اگرچه این روش‌ها از نظر اجرایی ساده هستند، اما از دیدگاه انرژی کارآمد نیستند؛ زیرا پمپ در سرعت نامی کار می‌کند و تنظیم شرایط بهره‌برداری با تحمیل افت‌های مصنوعی به سیستم صورت می‌گیرد که نتیجه آن اتلاف انرژی و کاهش راندمان کلی سامانه است [۳].

در پاسخ به این محدودیت‌ها، استفاده از درایوهای دور متغیر و پمپ‌های مجهز به کنترل سرعت، به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی مطرح شده است [۴, ۵]. در این رویکرد، سرعت دوران پمپ متناسب با نیاز واقعی شبکه یا فرایند تنظیم می‌شود و از این طریق، نقطه کار پمپ به‌جای آن‌که با اتلاف انرژی به منحنی سیستم تحمیل شود، به‌صورت ذاتی و از طریق تغییر مشخصه عملکردی پمپ جابه‌جا می‌گردد. در نتیجه، افزون بر کاهش مصرف انرژی، امکان کنترل نرم‌تر، کاهش تنش‌های مکانیکی، کاهش استهلاک تجهیزات و افزایش طول عمر بهره‌برداری نیز فراهم می‌شود [۶-۸]. اهمیت این موضوع در سامانه‌هایی که بار آن‌ها در طول زمان به‌صورت پیوسته تغییر می‌کند، دوچندان است؛ زیرا در چنین شرایطی، بهره‌برداری از پمپ با دور ثابت معمولاً موجب فاصله گرفتن سیستم از نقطه عملکرد بهینه می‌شود، در حالی که کنترل سرعت امکان تطبیق پیوسته میان تولید هد و دبی با نیاز واقعی مصرف را فراهم می‌آورد.

مطالعات متعددی کارآمدی پمپ‌های دورمتغیر را در حوزه‌های مختلف گزارش کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، در سامانه‌های سرمایش معادن عمیق، استفاده از درایو دورمتغیر به‌عنوان روشی مؤثر برای کاهش مصرف انرژی و تطبیق ظرفیت پمپاژ با شرایط بهره‌برداری معرفی شده است. در شبکه‌های آبیاری و سامانه‌های کشاورزی نیز، کاربرد راهبردهای کنترل سرعت برای بهبود راندمان انرژی و مدیریت بهتر منابع آب مورد توجه قرار گرفته است [۹]. در فرآیندهای تأمین، انتقال و تصفیه آب، کنترل دور پمپ نه‌تنها بر کاهش هزینه انرژی اثرگذار است، بلکه به تثبیت فشار شبکه، کاهش نوسانات و ارتقای کیفیت بهره‌برداری نیز کمک می‌کند. همچنین در سامانه‌های پمپ حرارتی و کاربردهای مرتبط با بازیابی انرژی، نقش درایوهای دورمتغیر به‌عنوان ابزاری کلیدی برای ارتقای بهره‌وری کل سیستم برجسته شده است [۱۰].

در کنار این کاربردها، در سال‌های اخیر توجه قابل‌ملاحظه‌ای به استفاده از پمپ‌ها در نقش توربین معکوس معطوف شده است؛ رویکردی که در آن از تجهیزات متداول پمپاژ برای بازیابی انرژی در شبکه‌های آبی و سامانه‌های توزیع استفاده می‌شود [۱۱-۱۳]. این موضوع نشان می‌دهد که سامانه‌های پمپاژ مدرن، دیگر صرفاً تجهیزاتی برای انتقال سیال نیستند، بلکه به اجزایی چندمنظوره در سامانه‌های هوشمند انرژی و آب تبدیل شده‌اند. با این حال، چه در حالت کارکرد مرسوم پمپ و چه در کاربردهای بازیابی انرژی، عملکرد مطلوب سیستم به‌شدت به راهبرد کنترل، دقت مدل‌سازی و کیفیت تعامل اجزای الکتریکی، مکانیکی و هیدرولیکی وابسته است.

این وابستگی در سامانه‌های شامل چند پمپ موازی یا ساختارهای پیچیده‌تر کنترلی، برجسته‌تر می‌شود. در آرایش‌های موازی، توزیع بار میان پمپ‌ها، تعیین سرعت بهینه هر واحد، جلوگیری از ناپایداری در ناحیه‌های خاص عملکرد و تضمین پاسخ مناسب در برابر تغییرات ناگهانی مصرف، همگی به یک مسئله چندمتغیره و غیرخطی تبدیل می‌شوند [۱۴-۱۶]. در چنین شرایطی، استفاده از کنترل‌کننده‌های کلاسیک بدون درنظرگرفتن برهم‌کنش دینامیکی اجزای سیستم، ممکن است به بروز نوسان، افت عملکرد یا حتی شرایط کاری نامطلوب منجر شود. بنابراین، طراحی و ارزیابی سامانه‌های پمپاژ دورمتغیر، نیازمند نگاهی فراتر از تحلیل‌های ایستای منحنی هد–دبی است و باید ویژگی‌های دینامیکی، قیود کنترلی و شرایط واقعی بهره‌برداری نیز در نظر گرفته شود.

در این میان، روش سخت‌افزار در حلقه توان (PHIL) به‌ویژه برای آزمایش اینورترها و درایوهای الکتریکی بسیار ارزشمند است. این روش با فراهم‌کردن امکان تبادل توان دوطرفه میان بخش واقعی و بخش شبیه‌سازی‌شده، امکان بررسی رفتار مبدل‌های قدرت و دینامیک ماشین‌ها را در شرایط نزدیک به واقعیت فراهم می‌کند. این رویکرد علاوه بر حذف نیاز به بارهای مکانیکی بزرگ و ناکارآمد، انعطاف‌پذیری

ACCEPTED MANUSCRIPT

بالایی برای بازتولید انواع شرایط کاری و خطا با ایمنی بیشتر ارائه می‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در این زمینه منجر به توسعه پلتفرم‌های شبیه‌سازی درایو و بار با عملکرد بالا، بسترهای تست الکترونیکی جایگزین نمونه‌های مکانیکی و حتی کاربردهای صنعتی در مقیاس مگاواتی شده است[۱۷]. همچنین، تکنیک‌های مدل‌سازی پیشرفته و تحلیل‌های پایداری در حوزه گسسته‌زمان، دقت و قابلیت اطمینان آزمایش‌های سخت‌افزار در حلقه توان را حتی در شرایط گذرای سریع افزایش داده‌اند[۱۸]. افزون بر این، روش سخت‌افزار در حلقه توان در کاربردهای نظیر الکترونیک قدرت و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر نیز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است و امکان اعتبارسنجی راهبردهای کنترلی و بررسی پدیده‌های گذرا را فراهم می‌کند؛ مسائلی که در شبیه‌سازی‌های آفلاین به‌طور کامل قابل ارزیابی نیستند[۱۹]. این مطالعات ضمن نشان دادن توانایی بالای سخت‌افزار در حلقه توان در کاربردهای گوناگون، به چالش‌هایی همچون پویایی تقویت‌کننده‌های توان، اثرات گسسته‌سازی و الگوریتم‌های واسط اشاره می‌کنند که باید برای دستیابی به عملکرد دقیق و پایدار مورد توجه قرار گیرند. با وجود این چالش‌ها، این روش مزایای منحصربه‌فردی دارد و امکان مطالعه ایمن شرایط بحرانی یا خطا، کاهش هزینه‌های توسعه و شناسایی نقاط ضعف پنهان در طراحی‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد[۲۰].

کاربرد HIL و PHIL در سیستم‌های پمپاژ اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا درایوهای با سرعت متغیر موجب بهبود کنترل فرآیند، کاهش مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی نسبت به روش‌های سنتی تنظیم جریان با شیر می‌شوند[۲۱]. مطالعات پیشین همچنین امکان استفاده مستقیم از سخت‌افزار در حلقه در پمپ‌های گریز از مرکز را نشان داده‌اند که در آن کنترلرهای منطقی قابل برنامه‌ریزی و درایوهای با سرعت متغیر در یک شبیه‌ساز بلادرنگ ترکیب می‌شوند تا ویژگی‌های هیدرولیکی ایستا و دینامیکی بازتولید شوند[۲۲]. این رویکردها نشان می‌دهند که سخت‌افزار در حلقه نه‌تنها در بهبود طراحی سیستم‌های موتور و اینورتر مؤثر است، بلکه می‌تواند در کاربردهای سیال‌محور نیز توسعه یابد.

مطالعات اخیر نیز بر اهمیت آزمایش و شبیه‌سازی بلادرنگ در سیستم‌های الکترومکانیکی و هیدرولیکی تأکید کرده‌اند. ما و همکاران[۲۳] چارچوبی جامع برای شبیه‌سازی و آزمون مأموریت‌محور مبتنی بر الکترونیک قدرت ارائه کردند و نقش پلتفرم‌های سخت‌افزار در حلقه را در بهبود قابلیت اطمینان و ارزیابی عملکرد در شرایط واقعی برجسته ساختند. به‌طور مشابه، وودوزوف و همکاران[۲۴] رویکردی مبتنی بر شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه توان برای مدل‌سازی و تحلیل درایوهای پمپ توسعه دادند که امکان آزمایش دینامیکی الگوریتم‌های کنترلی و پاسخ سیستم را بدون نیاز به تجهیزات تمام‌مقیاس فراهم می‌کند. این مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب محیط‌های شبیه‌سازی و تجربی می‌تواند پایه‌ای برای توسعه و اعتبارسنجی راهبردهای پیشرفته کنترل و پایش در سامانه‌های هیدرولیکی و الکترومکانیکی فراهم آورد.

در ادامه این تحقیقات، پژوهش حاضر از روش شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه توان در یک سامانه توزیع آب استفاده کرده است، به‌گونه‌ای که شبکه هیدرولیکی و الگوهای مصرف به‌صورت بلادرنگ مدل‌سازی می‌شوند و پمپ و درایو اینورتر به‌صورت سخت‌افزاری واقعی پیاده‌سازی شده‌اند. این رویکرد با ترکیب ایمنی و انعطاف‌پذیری شبیه‌سازی بلادرنگ با دقت عملکرد سخت‌افزار واقعی، امکان بررسی عملکرد پمپ- اینورتر را در شرایط مختلف بار و اغتشاش فراهم می‌سازد. با تطبیق روش‌های سخت‌افزار در حلقه توان که در ابتدا برای درایوهای الکتریکی و سامانه‌های الکترونیک قدرت توسعه یافته بودند با زیرساخت‌های آبی، این پژوهش مسیر تازه‌ای برای مدیریت کارآمد، قابل اعتماد و هوشمند منابع آب ارائه می‌دهد.

برخلاف پژوهش‌های گذشته که عمدتاً بر مدل‌سازی‌های استاتیکی ساده‌شده یا شبیه‌سازی‌های آفلاین تمرکز داشته‌اند، تحقیق حاضر رویکردی جامع جهت ارزیابی دینامیکی و بلادرنگ سیستم‌های پمپاژ دور متغیر ارائه می‌دهد. به‌منظور تبیین دقیق سهم علمی و نوآوری‌های این پژوهش، محورهای اصلی دستاوردهای آن به شرح زیر ارائه می‌شود.

- طراحی و پیاده‌سازی بستر پیشرفته PHIL: توسعه یک ساختار سخت‌افزار در حلقه توان (PHIL) با جفت‌شدگی کامل که امکان تعامل پویا و دوسویه را میان مدل ریاضی بلادرنگ و سخت‌افزارهای فیزیکی هیدرولیک (شامل شیرهای سروو و الکتروپمپ‌های دور متغیر) در شرایط گذرا فراهم می‌آورد.
- صاحه‌گذاری کمی و متقاطع با دقت بالا: تدوین یک الگوی ارزیابی ساختاریافته میان بستر مدل در حلقه (MIL) و سخت‌افزار در حلقه (HIL) با بهره‌گیری از شاخص‌های آماری خطا، جهت سنجش دقیق میزان انطباق مدل عددی با داده‌های تجربی.

ACCEPTED MANUSCRIPT

- بهینه‌سازی پایداری حلقه بسته و مدیریت تأخیر شبکه: ارائه یک پروتکل زمان‌بندی ارتباطی مبتنی بر UDP و روش‌های فیلترینگ فرکانسی که اثرات تأخیر زمانی در ارسال بسته‌های داده و نویزهای حسگر را مستهلک نموده و پایداری سیستم کنترل بلادرنگ را تضمین می‌کند.

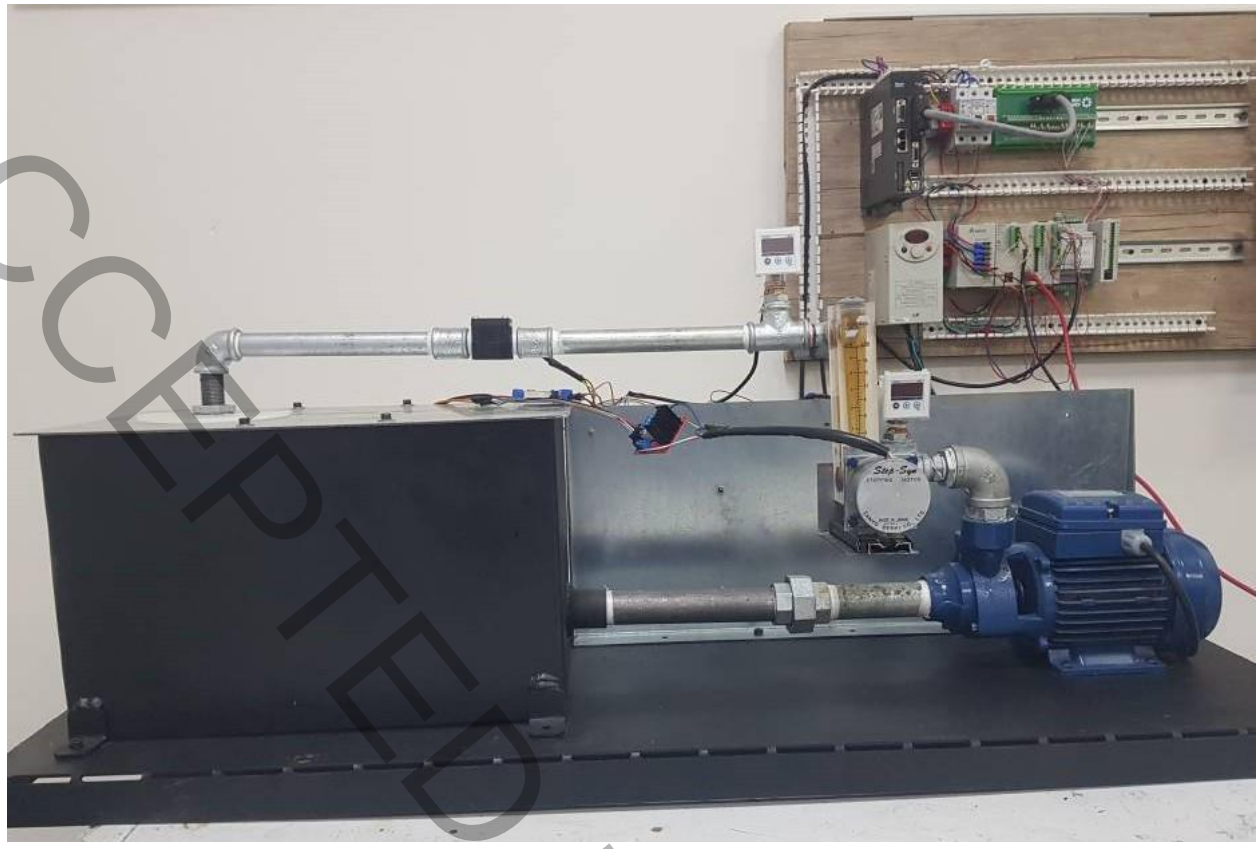
۲- ساختار شبیه‌سازی سخت افزار در حلقه

چارچوب توسعه‌یافته سخت‌افزار در حلقه در این پژوهش، سخت‌افزار واقعی شامل پمپ و اینورتر را با یک شبکه‌ی توزیع آب شبیه‌سازی‌شده ترکیب می‌کند و امکان ارزیابی پویای عملکرد سیستم را در شرایط واقعی اما کنترل‌شده فراهم می‌سازد. ساختار این معماری از سه بخش اصلی شامل بستر شبیه‌سازی بلادرنگ، واسط سخت‌افزاری فیزیکی و لایه‌ی تبادل توان تشکیل شده است. در هسته‌ی این چارچوب، دینامیک هیدرولیکی شبکه‌ی توزیع آب شامل لوله‌ها، اجزای ذخیره‌سازی و الگوهای مصرف، در یک شبیه‌ساز بلادرنگ مدل‌سازی شده است. این شبیه‌ساز با گام زمانی ثابت عمل می‌کند تا بازتولید دقیق پدیده‌های گذرا را تضمین نماید و در عین حال امکان تغییر شرایط کاری مانند الگوهای مصرف یا ویژگی‌های لوله را بدون نیاز به تغییر در سخت‌افزار فیزیکی فراهم کند. بخش شبیه‌سازی‌شده، شرایط مرزی سیستم را تعریف کرده و از طریق سیگنال‌های ورودی و خروجی به‌صورت پیوسته با بخش سخت‌افزاری تعامل دارد.

بخش سخت‌افزاری شامل یک الکتروپمپ و اینورتر و همچنین یک شیر پله‌ای در خروجی پمپ است. پمپ الکتریکی و اینورتر به‌صورت واقعی در سیستم گنجانده شده‌اند تا دینامیک‌های الکتریکی و مکانیکی سامانه‌ی محرک را که مدل‌سازی دقیق آن‌ها به‌ویژه در شرایط غیرخطی و عملکرد کلیدزنی دشوار است، به‌طور واقعی بازنمایی کنند. شیر پله‌ای به‌عنوان یک بار هیدرولیکی قابل تنظیم عمل کرده و با تغییر میزان جریان خروجی، سناریوهای مختلف مصرف را شبیه‌سازی می‌کند. این روش، روشی کنترل‌شده برای اعمال شرایط بار بر پمپ فراهم می‌سازد بدون آن‌که نیاز به بسترهای آزمایشگاهی بزرگ‌مقیاس باشد. ارتباط بین حوزه‌ی شبیه‌سازی‌شده و سخت‌افزاری از طریق واسط برقرار می‌شود. شبیه‌ساز بلادرنگ سیگنال‌های مرجع و بازخوردهای سیستم را ارسال می‌کند، در حالی که سخت‌افزار پاسخ‌های اندازه‌گیری‌شده مانند جریان موتور، رفتار کلیدزنی اینورتر، فشار پمپ و دبی خروجی را فراهم می‌نماید. این واسط تضمین می‌کند که تبادل انرژی و اطلاعات به‌صورت دوسویه، پایدار و منسجم باشد که برای حفظ دقت کل سامانه‌ی سخت‌افزار-نرم‌افزار ضروری است. برای دستیابی به این هدف، الگوریتم‌های مناسب واسط به‌کار گرفته شده‌اند تا تأخیر زمانی، اثرات گسسته‌سازی و دینامیک‌های غیرایده‌آل تجهیزات الکترونیک قدرت را جبران کنند.

این معماری مدولار امکان ارزیابی عملکرد سیستم پمپ-اینورتر را در هر دو حالت پایدار و گذرا و تحت طیف گسترده‌ای از شرایط کاری فراهم می‌سازد. با ترکیب سخت‌افزار واقعی در زیرسامانه‌های حیاتی و محیط شبیه‌سازی برای بخش‌های دیگر شبکه‌ی هیدرولیکی، پلتفرم ایمنی آزمایش، کاهش هزینه و افزایش انعطاف‌پذیری را تضمین می‌کند. علاوه بر این، استفاده از شیر پله‌ای به‌عنوان بار قابل کنترل، یک درجه‌ی آزادی اضافی فراهم کرده و مطالعه‌ی دینامیک‌های ناشی از تغییرات تقاضا و اغتشاشات سیستم را که از ویژگی‌های شبکه‌های واقعی توزیع آب هستند، امکان‌پذیر می‌سازد. شکل ۱ نمای کلی از سامانه‌ی آزمایش واقعی را نشان می‌دهد که در آن اجزای هیدرولیکی و سیستم کنترل خودکار پیاده‌سازی‌شده نمایش داده شده‌اند.

ACCEPTED MANUSCRIPT



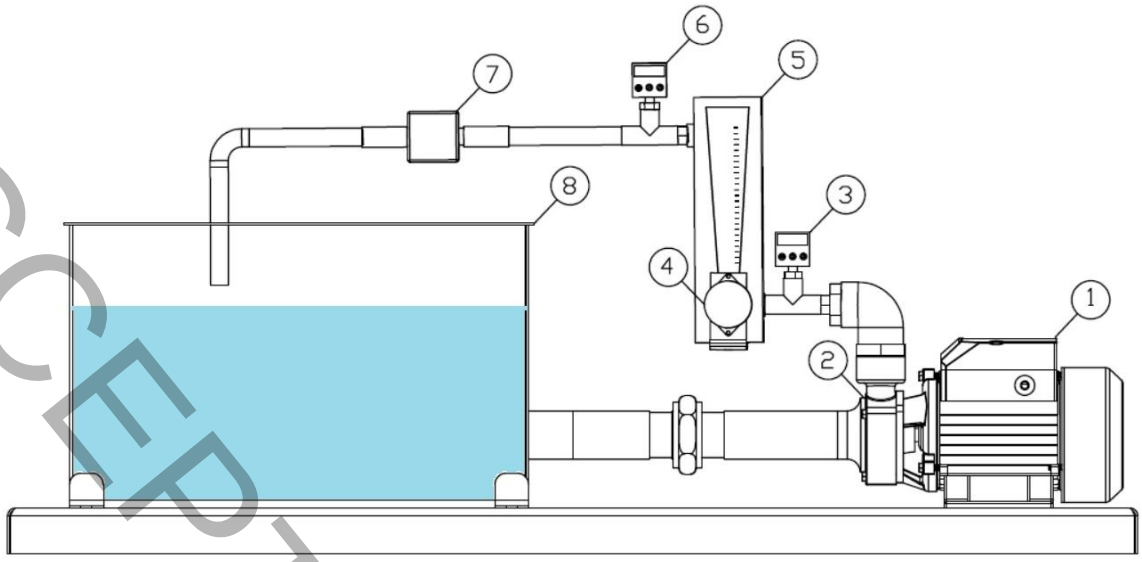
شکل ۱: بستر آزمایش شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه توان
Figure 1. Power hardware–in–the–loop test setup

در شکل ۲، نمودار شماتیکی سیستم هیدرولیکی و ابزارهای اندازه‌گیری نشان داده شده است. در سکوی آزمایش، یک ترانسمیتر فشار برای اندازه‌گیری فشار بعد از پمپ و یک ترانسمیتر فشار دیگر برای اندازه‌گیری فشار بعد از شیر پله‌ای به کار رفته است. این ترانسمیترهای فشار با منبع تغذیه ۲۴ ولت کار می‌کنند و سیگنال خروجی آنالوگ ۴ تا ۲۰ میلی‌آمپر ارائه می‌دهند. برای اندازه‌گیری دبی، از یک دبی‌سنج توربینی با تغذیه ۵ ولت و خروجی فرکانسی استفاده شده است. همچنین یک روتامتر جهت کالیبراسیون دبی‌سنج توربینی به کار رفته است.

سرعت موتور پمپ توسط یک مبدل تک‌فاز به سه‌فاز (اینورتر) کنترل می‌شود. کنترل‌کننده منطقی قابل برنامه‌ریزی (PLC) از طریق ماژول خروجی آنالوگ خود به اینورتر متصل است و سرعت موتور با تغییر ولتاژ ورودی آنالوگ اینورتر در محدوده‌ی ۰ تا ۱۰ ولت تنظیم می‌شود. میزان مصرف آب توسط شیر پله‌ای تنظیم می‌شود که درجه‌ی بازشدگی آن از طریق درایور موتور پله‌ای کنترل می‌گردد.

داده‌های مربوط به فشار و دبی از طریق PLC و ماژول ورودی آنالوگ آن جمع‌آوری می‌شوند. انتقال داده‌ها به رایانه به‌صورت بلادرنگ از طریق پروتکل شبکه‌ای UDP انجام می‌گیرد. با استفاده از جعبه‌ابزار Real–Time Windows Target (RTW) در نرم‌افزارMATLAB ، تبادل داده بین سیگنال‌های اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌ساز بلادرنگ توسعه‌یافته در MATLAB برقرار می‌شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT



1– 3Ph AC Motor
2– Centrifugal Pump
3– Pressure Transducer (Ps)
4– Stepper Valve
5– Glass Tube Flowmeter
6– Pressure Transducer (Pt)
7– Turbine Flowmeter
8– Tank

شکل ۲: شماتیک بستر آزمایش شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه و سیستم‌های اندازه‌گیری

Figure 2. Schematic of test setup and measurement systems

به منظور پیاده‌سازی بلادرنگ بستر PHIL و برقراری ارتباط پایدار بین بخش سخت‌افزاری (شامل درایو، الکتروپمپ و PLC) و بخش شبیه‌سازی‌شده (در محیط MATLAB)، از پروتکل ارتباطی UDP استفاده شده است. نرخ نمونه‌برداری سیستم بلادرنگ برابر با ۱۰۰ هرتز (۱۰ میلی ثانیه) تنظیم گردید که متناسب با دینامیک‌های هیدرولیکی و الکتریکی سیستم انتخاب شده است. تأخیر ارتباطی در بستر UDP تحت این نرخ نمونه‌برداری به‌طور متوسط کمتر از ۲ میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شد که بسیار کمتر از ثابت زمانی دینامیک هیدرولیکی سیستم است. جهت تضمین پایداری سیستم PHIL و جلوگیری از نوسانات ناشی از تأخیر فاز در حلقه بسته (سخت‌افزار-نرم‌افزار)، از فیلترهای پایین‌گذر مرتبه اول روی سیگنال‌های فیدبک فشار و جریان استفاده شد. همچنین برای جبران‌سازی تأخیرهای احتمالی شبکه، پروتکل ارسال و دریافت داده‌ها به گونه‌ای تنظیم شد که در صورت بروز هرگونه بسته مفقود شده، آخرین داده معتبر در محاسبات بلادرنگ ملاک قرار گیرد تا پایداری و همگرایی شبیه‌سازی حفظ شود.

۳- شبیه‌سازی نرم افزار در حلقه

برای اعتبارسنجی دقت چارچوب سخت‌افزار در حلقه، یک مدل ریاضی کامل از سیستم پمپاژ و شبکه توزیع آب مرتبط توسعه داده شد. این مدل به‌عنوان مرجع برای مقایسه نتایج آزمایشی حاصل از شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه به کار می‌رود. با ارزیابی هم‌خوانی میان مدل کاملاً ریاضی و نتایج شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه، میزان صحت و قابلیت اعتماد روش شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه قابل سنجش است.

مدل ریاضی، هر دو حوزه‌ی الکتریکی و هیدرولیکی سیستم را در بر می‌گیرد. در بخش الکتریکی، درایو اینورتر موتور با استفاده از معادلات دینامیکی ماشین القایی سه‌فاز که از یک منبع ولتاژ متغیر تغذیه می‌شود، مدل‌سازی شده است. برای توصیف دینامیک موتور از مدل‌سازی محورهای dq استفاده شده که شامل شارهای استاتور و روتور، تولید گشتاور الکترومغناطیسی و حرکت مکانیکی است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

اینورتر به‌صورت یک مبدل مدولاسیون پهنای پالس (PWM) با مدل میانگین‌گیری‌شده از کلیدزنی‌ها در نظر گرفته شده تا ضمن کاهش حجم محاسبات، پویایی اصلی ولتاژ و جریان حفظ شود[۲۵].

در بخش هیدرولیکی، پمپ گریز از مرکز با استفاده از قوانین تشابه غیرخطی پمپ مدل‌سازی شده است که رابطه‌ی میان دبی، هد و گشتاور را با سرعت محور مشخص می‌کند. شیر پله‌ای به‌عنوان یک مقاومت هیدرولیکی قابل کنترل در نظر گرفته شده که با تغییر سطح مقطع مؤثر خود، دبی خروجی را تنظیم می‌کند. این مدل‌سازی امکان شبیه‌سازی تغییرات بار و اغتشاشات ناشی از تغییرات مصرف را فراهم می‌سازد. شبکه‌ی توزیع آب پایین‌دست شامل لوله‌ها، گره‌ها و المان‌های ذخیره، با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتوم مدل شده و افت هد در آن‌ها بر اساس روابط تجربی شناخته‌شده مانند فرمول دارسی- ویسباخ محاسبه می‌شود[۲۶]. مدل ترکیبی در زمان واقعی حل می‌شود تا شرایط مشابه با آزمایش سخت‌افزار در حلقه بازتولید گردد. خروجی‌های فشار پمپ، دبی جریان و کمیت‌های الکتریکی موتور به‌صورت هم‌زمان از شبیه‌سازی استخراج و با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در آزمایش‌های مبتنی بر سخت‌افزار مقایسه می‌شوند. این مقایسه مبنایی کمی برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه در بازنمایی نقاط کاری پایدار و پاسخ‌های گذرا فراهم می‌کند. با در نظر گرفتن این مدل ریاضی به‌عنوان مرجع، اطمینان حاصل می‌شود که اختلافات میان نتایج شبیه‌سازی و آزمایش سخت‌افزار در حلقه ناشی از دینامیک واقعی سخت‌افزار و غیرایده‌آلی‌های فیزیکی است. در نتیجه، اعتبار روش شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه به‌عنوان ابزاری کارآمد برای آزمون و تحلیل سیستم‌های پمپ- اینورتر در شبکه‌های توزیع آب استفاده می‌شود.

برای پیش‌بینی دقیق و صحیح رفتار پمپ مدل‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل‌سازی ریاضی پمپ‌های گریز از مرکز سرعت متغیر یکی از ابزارهای کلیدی برای پیش‌بینی دقیق رفتار دینامیکی این سیستم‌ها در شرایط عملیاتی مختلف است. این فرایند شامل مدل‌سازی اجزای اصلی سیستم، یعنی الکتروموتور، پمپ، و شیر کنترلی، و ترکیب آن‌ها در یک مدل جامع است که قادر به شبیه‌سازی رفتار پمپ در حالت‌های پایدار و گذرا باشد. هدف از این مدل‌سازی، ارائه اطلاعاتی است که مهندسان بتوانند از آن برای طراحی سیستم‌های کارآمد، بهینه‌سازی مصرف انرژی، و افزایش طول عمر تجهیزات استفاده کنند.

۱-۳- مدل‌سازی الکتروموتور

الکتروموتور به‌عنوان بخش محرک در سامانه پمپاژ، وظیفه تأمین گشتاور مورد نیاز جهت دوران پروانه پمپ را بر عهده دارد. بر این اساس، نخستین گام در مدل‌سازی الکتروموتور، تعیین موازنه گشتاورهای اعمال‌شده بر محور انتقال قدرت به پمپ است. در شرایط راه‌اندازی و گذرای اولیه، گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی موتور با گشتاورهای مقاوم ناشی از اینرسی مجموعه، اصطکاک مکانیکی و مقاومت هیدرولیکی سیال در پمپ تقابل پیدا می‌کند. مطابق با قانون اویلر، شتاب زاویه‌ای محور متناسب با برآیند این گشتاورهای اعمالی بر شفت الکتروموتور و پمپ خواهد بود [۲۷].

$$J\frac{d\omega}{dt} = M_{MT} - M_s - M_p \qquad (۱)$$

J: گشتاور اینرسی معادل محور پمپ و موتور

M_{MT}: گشتاور اعمال شده توسط درایو فرکانس متغیر به موتور

M_s: گشتاور سیال موجود در مجموعه پمپ و موتور

M_p: گشتاور پمپ گریزازمرکز

برخی از پارامترهای موجود در معادلات حاکم، ویژگی‌های ذاتی تجهیزات محسوب می‌شوند که مقادیر آن‌ها از طریق کاتالوگ‌های فنی سازندگان قابل استخراج است. در این میان، گشتاور ویسکوز که ناشی از برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی و اصطکاک سیال میان پروانه و محفظه پمپ است، سهم عمده‌ای در گشتاور مقاوم مجموعه ایفا می‌کند. در مدل‌سازی حاضر، گشتاور سیال اعمالی بر مجموعه پمپ و الکتروموتور معادل با گشتاور ویسکوز در نظر گرفته شده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$M_s = b\omega \qquad (۲)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

که b ضریب اصطکاک ویسکوز است که از مشخصه‌های سیال مورداستفاده در مجموعه پمپ و الکتروموتور است و مقدار آن برای سیال آب برابر $b=0.0121\ kg\ m^2/s$ است و ω سرعت دورانی پمپ است. این رابطه نشان می‌دهد که گشتاور ویسکوز به‌صورت خطی با سرعت چرخش افزایش می‌یابد، اما در مقایسه با گشتاور پمپ معمولاً مقدار کمتری دارد. گشتاور پمپ گریز از مرکز همان نیروی اعمالی برای پمپاژ سیال در سیستم است که از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$M_p = \frac{\rho g Q H}{\eta_p \omega} = \frac{\rho g H_N}{\eta_p \omega_N^2} Q\omega = K_1 Q\omega \qquad (۳)$$

که K_1 از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$K_1 = \frac{\rho g H_N}{\eta_p \omega_N^2} \qquad (۴)$$

که ρ چگالی سیال، g شتاب گرانش زمین، Q_N دبی نامی پمپ، ω_N سرعت زاویه‌ای نامی پمپ، Q دبی پمپ و ω سرعت زاویه‌ای پمپ است و همچنین H_N هد نامی پمپ است. این معادله نشان می‌دهد که گشتاور پمپ به دبی و سرعت زاویه‌ای وابسته است. در سرعت‌های پایین، اگر دبی ثابت بماند، گشتاور موردنیاز افزایش می‌یابد که می‌تواند بار اضافی به موتور وارد کند. گشتاور ایجاد شده توسط الکتروموتور محرکه اصلی برای مجموعه است زیرا که جریان سیال و پمپاژ آن با استفاده از گشتاور ایجاد شده توسط الکتروموتور انجام می‌شود که از طریق محور اصلی الکتروموتور به پمپ منتقل شده و عمل پمپاژ صورت می‌گیرد. گشتاور ایجاد شده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$M_{MT} = \frac{3V^2\left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_s\left(R_1 + \left(\frac{R_2}{S}\right)\right)^2} \qquad (۵)$$

در رابطه بالا V ولتاژ الکتروموتور، R_1 مقومت آرمیچر استاتور، R_2 مقاومت استاتور نسبت به روتور، S لغزش موتور به هنگام راه‌اندازی اولیه است.

$$S = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \qquad (۶)$$

که ω_s برابر است با

$$\omega_s = 2\pi f \qquad (۷)$$

باتوجه‌به اینکه $\left(\frac{R_2}{S}\right) \gg R_1$، معادله ۵ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$M_{MT} = \frac{3V^2 S}{\omega_s (R_2)} \qquad (۸)$$

از ترکیب معادلات (۶)، (۷) و (۸) گشتاور الکتروموتور به دست می‌آید.

$$M_{MT} = \left(\frac{3V^2}{R_2}\right)(2\pi f - \omega) \qquad (۹)$$

این معادله نشان می‌دهد که گشتاور موتور به‌شدت به فرکانس ورودی از طریق درایو فرکانس متغیر و لغزش وابسته است. در حالت گذرا، وقتی فرکانس تغییر می‌کند، لغزش به طور موقت افزایش می‌یابد تا موتور به‌سرعت جدید برسد.

۲-۳- مدل‌سازی پمپ

رای مدل‌سازی دقیق پمپ، تعیین رابطه ریاضی میان اختلاف فشار تولیدی و سرعت زاویه‌ای الزامی است. این رابطه بر اساس منحنی مشخصه هد-دبی استخراج می‌گردد. معادله حاکم بر عملکرد پمپ، به صورت زیر تدوین شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$H = \left(A + B\frac{Q_N}{\omega_N} + C\frac{Q^2{}_N}{\omega^2{}_N} \right)\omega^2 = K_4\omega^2 \qquad (۱۰)$$

این معادله یک مدل درجه دوم است که تعادل بین انرژی جنبشی (متناسب با ω^2) و افت‌های هیدرولیکی (متناسب با Q^2) را نشان می‌دهد. Q_N بیانگر دبی نامی پمپ و ω_N سرعت دورانی نامی پمپ، ثابت‌های A ، B و C معمولاً با استفاده از داده‌های کاتالوگ یا آزمایش‌های عملی تعیین می‌شوند.

A: نشان‌دهنده هد تولیدی در غیاب دبی که به انرژی جنبشی پروانه بستگی دارد.

B: اثر متقابل دبی و سرعت را نشان می‌دهد که معمولاً در شرایط عملیاتی میانی اهمیت دارد.

C: افت هد به دلیل مقاومت‌های هیدرولیکی (مثل اصطکاک در لوله‌ها یا پروانه) را مدل می‌کند.

۳-۳- مدل‌سازی شیر کنترل جریان

شیر کنترلی نقش مهمی در تنظیم دبی سیستم ایفا می‌کند. نرخ جریانی که از شیر کنترلی عبور می‌کند با رابطه‌های زیر به دست می‌آید.

$$Q = K\Delta P \qquad (۱۱)$$

$$Q = K\sqrt{\Delta P} \qquad (۱۲)$$

در معادلات بالا معادله ۱۱ مربوط جریان آرام و معادله ۱۲ برای جریان مغشوش است. از آنجاکه در این مدل‌سازی جریان مغشوش است از معادله ۱۲ استفاده می‌شود. در حالت گذرا پمپ مقدار باز و بسته شیر کنترلی دبی نیز تأثیر به سزایی دارد که باید در معادلات مربوط به مدل‌سازی اعمال شود.

$$Q = xk_{V0}e^{xk_2}\sqrt{\Delta P} \qquad (۱۳)$$

که k_{v0} ثابت شیر کنترلی زمانی که به‌صورت کامل باز است، ΔP اختلاف فشار قبل و بعد از شیر کنترلی، x مقدار باز بودن شیر کنترلی و k_2 تابعی از ثابت شیر است. مقدار اختلاف فشار قبل و بعد از شیر کنترلی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\Delta P = \frac{(H - H_{losses}) - H_{atm}}{10.2} \qquad (۱۴)$$

ضریب ۱۰/۲ ذکر شده در معادله، برای تبدیل واحد اتمسفر به متر آب است. با صرفنظر از افت فشار درون سیستم لوله‌کشی، معادله ۱۴ به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\Delta P = \frac{H}{10.2} \qquad (۱۵)$$

با استفاده از معادله ۱۵ و جای‌گذاری در معادله ۱۳، مقدار دبی شیر کنترلی به دست می‌آید.

$$Q = xk_{V0}e^{xk2}\sqrt{\frac{H}{10.2}} \qquad (۱۶)$$

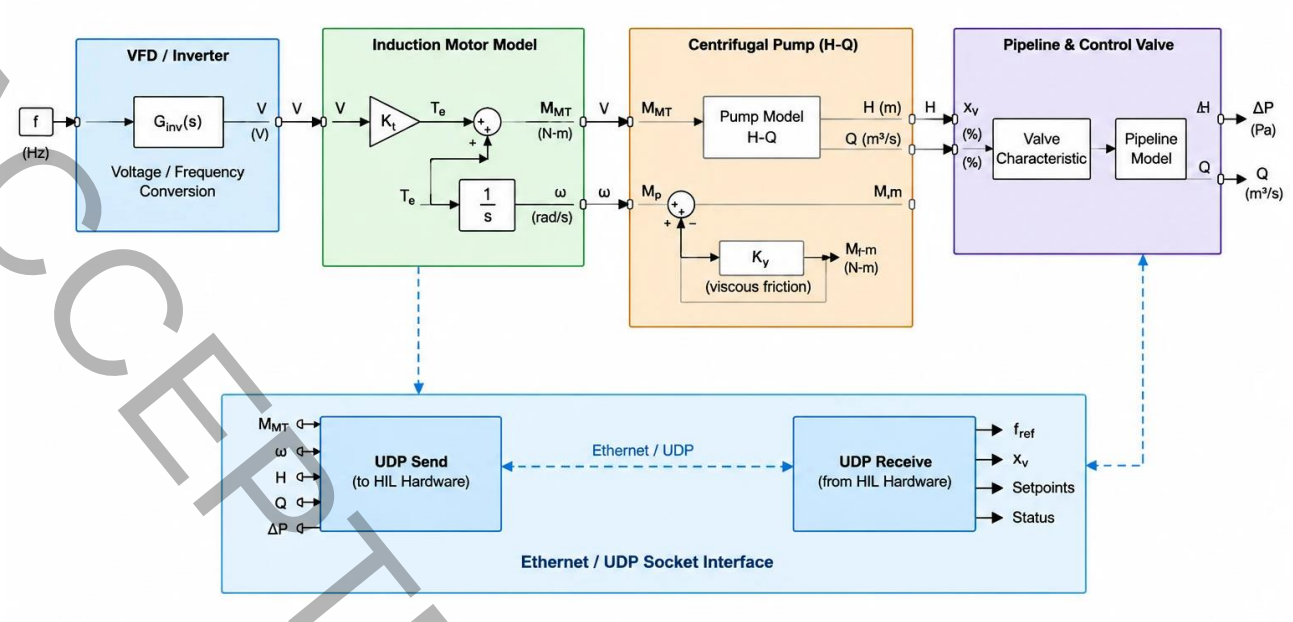
برای مدل‌سازی کامل رفتار پمپ در حالت گذرا، معادلات الکتروموتور، پمپ، و شیر کنترلی ترکیب می‌شوند. معادله حالت گذرای موردنظر از ترکیب معادلات ۱۳، ۱۵ و ۱۶ به دست می‌آید.

$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{3V^2}{JR_2}\right)(2\pi f - \omega) - \frac{b}{J}\omega - \frac{K_1\omega}{J}xK_{V0}e^{xk_2}\sqrt{\frac{H}{10.2}} \qquad (۱۷)$$

این معادله یک معادله دیفرانسیل غیرخطی است که دینامیک سیستم را در پاسخ به تغییرات فرکانس(f) ، میزان‌باز بودن شیر(x) ، و دبی (Q) مدل می‌کند.

وقتی فرکانس ورودی (f) تغییر می‌کند، سرعت سنکرون (ω_s) تغییر می‌کند که باعث افزایش یا کاهش لغزش (S) و در نتیجه گشتاور موتور می‌شود. تغییر میزان‌باز بودن شیر (x) مستقیماً دبی (Q) را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد که به نوبه خود گشتاور پمپ را تغییر می‌دهد. اینرسی سیستم (J) باعث تأخیر در پاسخ‌دهی به تغییرات ناگهانی می‌شود که می‌تواند نوسانات فشار را تشدید کند[۲۷].

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳: ساختار شماتیک مدل‌سازی سیمولینک سامانه پمپاژ و ارتباطات در بستر سخت‌افزار در حلقه (HIL) از طریق پروتکل UDP

Figure 3: Schematic block diagram of the Simulink model for the pump system and real-time data exchange via UDP in the Hardware-in-the-Loop (HIL) framework

شکل ۳ ساختار شماتیک مدل‌سازی سیمولینک سامانه پمپاژ را نمایش می‌دهد. این مدل بر مبنای رویکردی ماژولار طراحی شده است تا امکان بررسی یکپارچه در هر دو پیکربندی مدل در حلقه (MIL) و سخت‌افزار در حلقه (HIL) را فراهم آورد. اجزای اصلی سامانه شامل بلوک اینورتر(VFD) ، مدل دینامیکی الکتروموتور القایی، پمپ گریز از مرکز و شبکه هیدرولیکی است. ویژگی کلیدی این ساختار، استفاده از بلوک‌های ارسال و دریافت داده مبتنی بر پروتکل UDP است که رابط اصلی تبادل اطلاعات بی‌درنگ (Real-time) میان محیط شبیه‌سازی و سخت‌افزار خارجی را تشکیل می‌دهد. این معماری نه‌تنها صحت‌سنجی دقیق مدل ریاضی را تسهیل می‌کند، بلکه با فراهم‌سازی بستری یکسان برای MIL و HIL ، انعطاف‌پذیری لازم جهت کالیبراسیون پارامترها و تحلیل پاسخ‌های دینامیکی سامانه را به بهترین شکل ممکن می‌سازد.

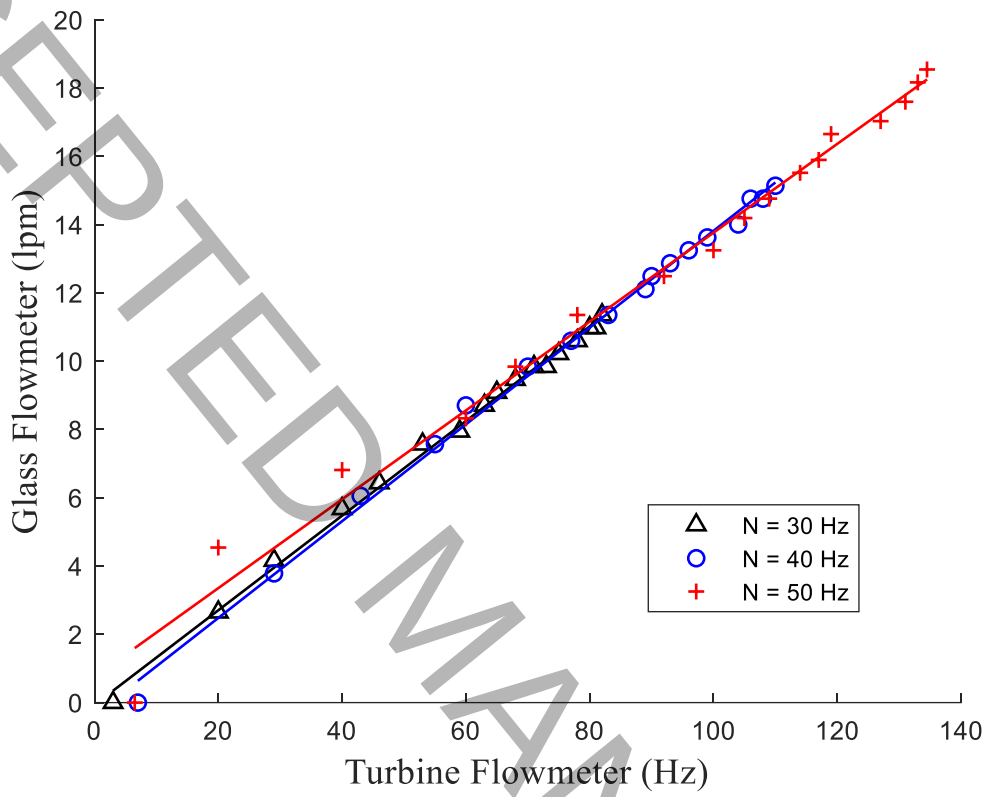
۴- نتایج

عملکرد چارچوب سخت‌افزار در حلقه (HIL) پیشنهادی از طریق مجموعه‌ای از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت که به منظور بررسی رفتار حالت پایدار و دینامیکی سیستم پمپ- اینورتر طراحی شده بودند. نتایج حاصل با شبیه‌سازی‌های مرجع مدل در حلقه (MIL) مقایسه شدند تا دقت و صحت سامانه‌ی توسعه‌یافته اعتبارسنجی گردد. تحلیل انجام‌شده شامل دسته‌های مختلف آزمایش شامل مشخصه‌یابی ایستای دبی و فشار در شرایط کاری متفاوت، آزمون‌های دینامیکی با تغییرات تناوبی در بازشدگی شیر و کنترل حلقه بسته‌ی فشار با استفاده از درایو با فرکانس متغیر و کنترل‌کننده PID است. مجموع این نتایج درک جامعی از عملکرد سیستم ارائه داده و نشان می‌دهد که چارچوب HIL توانایی بازتولید رفتار مورد انتظار سیستم را در طیف گسترده‌ای از شرایط کاری دارد.

در ارزیابی تجربی، داده‌های دبی به‌دست‌آمده از فلومتر توربینی (با خروجی ۴–۲۰ میلی‌آمپر) با مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط روتامتر مقایسه شده است تا دقت اندازه‌گیری، ارزیابی گردد. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، نتایج حاکی از وجود رابطه‌ای خطی

ACCEPTED MANUSCRIPT

بین دو ابزار اندازه‌گیری بوده و هر دو روند مشابهی را با افزایش فرکانس پمپ نشان می‌دهند. در محدوده‌ی سرعت‌های آزمایش‌شده، دبی اندازه‌گیری‌شده از نزدیک صفر تا حدود ۲۰ لیتر بر دقیقه تغییر کرده است که بیانگر همبستگی مناسب میان دو دستگاه است. اگرچه در سرعت‌های بالاتر موتور، اندکی انحراف در شیب منحنی‌ها مشاهده می‌شود، اما نتایج کلی صحت و قابلیت اعتماد فلومتر توربینی را برای کاربردهای پمپ گریز از مرکز تأیید می‌کند، مشروط بر آنکه کالیبراسیون دقیق آن در برابر روتامتر در شرایط کاری مختلف انجام گیرد.

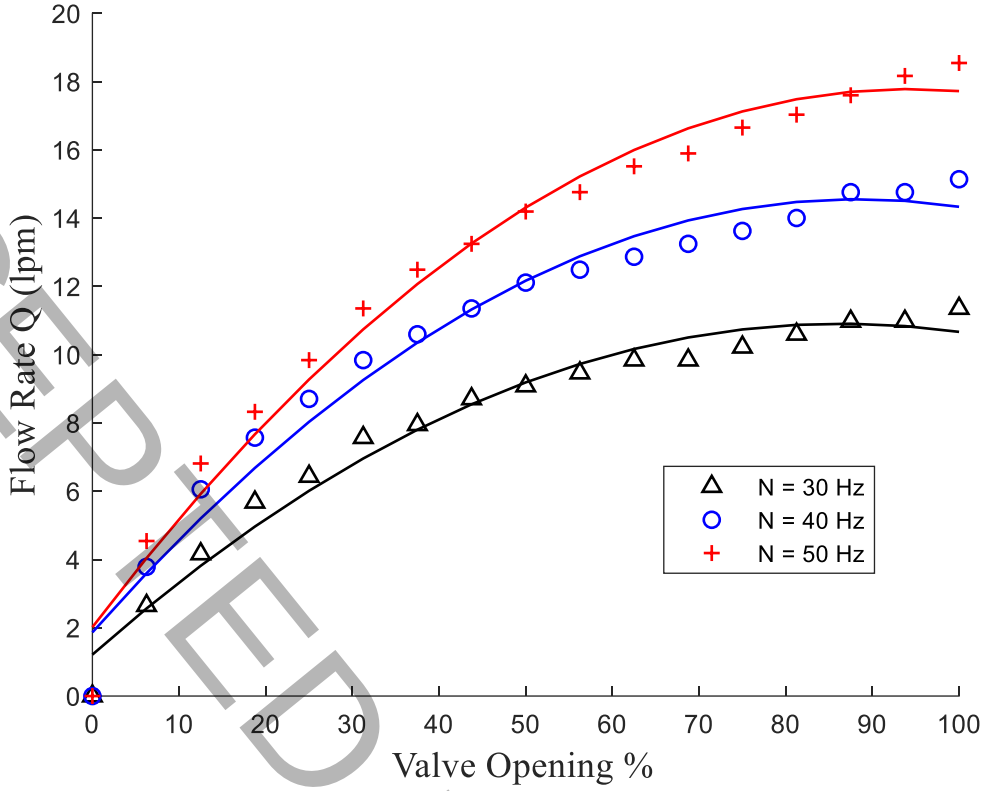


شکل ۴: دبی اندازه‌گیری‌شده توسط روتامتر در مقابل دبی اندازه‌گیری‌شده توسط فلومتر توربینی

Figure 4. The flow rate measured by the rotameter versus the flow rate measured by the turbine flowmeter

دو آزمایش ایستا نیز به منظور مشخصه‌یابی بیشتر عملکرد هیدرولیکی سیستم پمپ- شیر انجام شد. در نخستین آزمایش ایستا، رابطه‌ی میان دبی و درصد بازشدگی شیر در سرعت‌های مختلف موتور مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که در هر سطح سرعت، دبی به‌صورت غیرخطی با افزایش بازشدگی شیر افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که در بازشدگی‌های کم، افزایش دبی سریع بوده و با نزدیک شدن شیر به حالت کاملاً باز، شیب منحنی تدریجاً کاهش می‌یابد. افزایش سرعت موتور موجب انتقال منحنی دبی به سمت مقادیر بالاتر شد که بیانگر آن است که هر دو عامل موقعیت شیر و سرعت پمپ، تأثیر قابل‌توجهی بر میزان دبی خروجی دارند. این یافته‌ها اهمیت کنترل هماهنگ میان پمپ اینورتری و شیر را در تنظیم میزان مصرف در سامانه‌های توزیع آب نشان می‌دهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



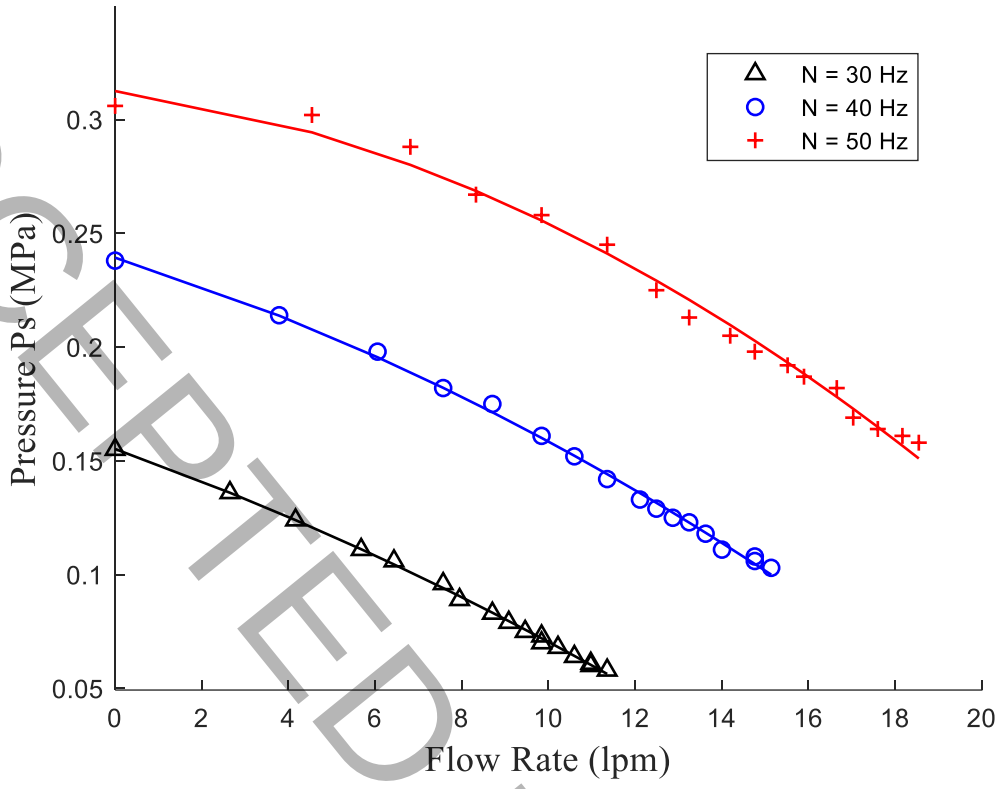
شکل ۵: تغییرات دبی برحسب درصد بازشدگی شیر در سرعت‌های مختلف موتور

مدل در حلقه (MIL): خطوط پیوسته، سخت افزار در حلقه (HIL): نشانگرهای گسسته

Figure 5. Variation of flow rate versus valve opening percentage at different motor speeds (Mathematical MIL: solid lines, Experimental HIL: discrete markers)

همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، دومین آزمایش ایستا، تغییرات فشار خروجی در پایین‌دست پمپ را به‌عنوان تابعی از دبی در سرعت‌های مختلف موتور مورد بررسی قرار داده است. مطابق با ویژگی‌های معمول پمپ‌های گریز از مرکز، فشار با افزایش دبی کاهش یافته و منحنی‌های هد-دبی مشخصی برای هر سرعت کاری تشکیل شده است. در سرعت‌های بالاتر موتور، پمپ قادر به تأمین دبی‌های بیشتر و فشار قطع بالاتری است، در حالی‌که رابطه‌ی معکوس معمول میان هد و دبی همچنان حفظ شده است. این منحنی‌ها داده‌های مرجع مهمی را برای اعتبارسنجی مدل پمپ و ارزیابی عملکرد چارچوب HIL در شرایط کاری حالت پایدار فراهم می‌کنند.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۶: تغییرات فشار بعد از پمپ برحسب دبی در سرعت‌های مختلف موتور

مدل در حلقه (MIL): خطوط پیوسته، سخت افزار در حلقه (HIL): نشانگرهای گسسته

Figure 6. Variation of pressure after the pump versus flow rate at different motor speeds (Mathematical MIL: solid lines, Experimental HIL: discrete markers)

همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، در آزمون‌های دینامیکی، مصرف آب به‌صورت تناوبی و با فرکانس یک چرخه در دقیقه تغییر داده شده است. این پیکربندی برای بررسی پاسخ گذرای سیستم پمپ- شیر تحت شرایط بار نوسانی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های تجربی به‌دست‌آمده از چارچوب سخت‌افزار در حلقه (با نشانگرهای گسسته) با نتایج شبیه‌سازی نرم افزار در حلقه (با خطوط پیوسته) مقایسه شده‌اند که تطابق خوبی را در هر دو پروفیل دبی و فشار نشان می‌دهند. یکی از مشاهدات مهم، رفتار هیسترزیس در منحنی بازشدگی شیر-دبی است، به‌طوری که مسیرهای باز و بسته شدن شیر کاملاً بر هم منطبق نیستند. این پدیده ناشی از تأثیر هم‌زمان دینامیک شیر، اینرسی سیال و تلفات سیستم است و نشان‌دهنده‌ی وجود رفتارهای غیرخطی است که مدل‌های کاملاً ریاضی به‌سختی قادر به بازتولید آن‌ها هستند. با این حال، همبستگی نزدیک میان نتایج MIL و HIL نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی توانایی بازتولید دقیق عملکرد دینامیکی سیستم پمپاژ را دارد.

به‌منظور صحه‌گذاری دقیق علمی و ارزیابی کمی انطباق نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل ریاضی (MIL) با نتایج تجربی به‌دست‌آمده از بستر سخت‌افزار در حلقه (HIL) در سناریوی تغییرات هارمونیکی (شکل ۷)، تحلیل‌های آماری شامل شاخص خطای ریشه میانگین مربعات (RMS) و درصد اختلاف میانگین انجام شد. شاخص RMS میزان انحراف مطلق بین داده‌های تجربی و مدل را در کل دوره ۱۲۰ ثانیه‌ای آزمون نشان می‌دهد و درصد اختلاف میانگین، بیانگر انحراف نسبی رفتار مدل نسبت به عملکرد سخت‌افزار واقعی است.

نتایج حاصل از محاسبات این شاخص‌های کمی برای متغیرهای هیدرولیکی سیستم شامل دبی خروجی (Q)، فشار سمت مکش (Ps)، فشار سمت دهش (Pt) و اختلاف فشار (ΔP) در جدول ۱ خلاصه شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

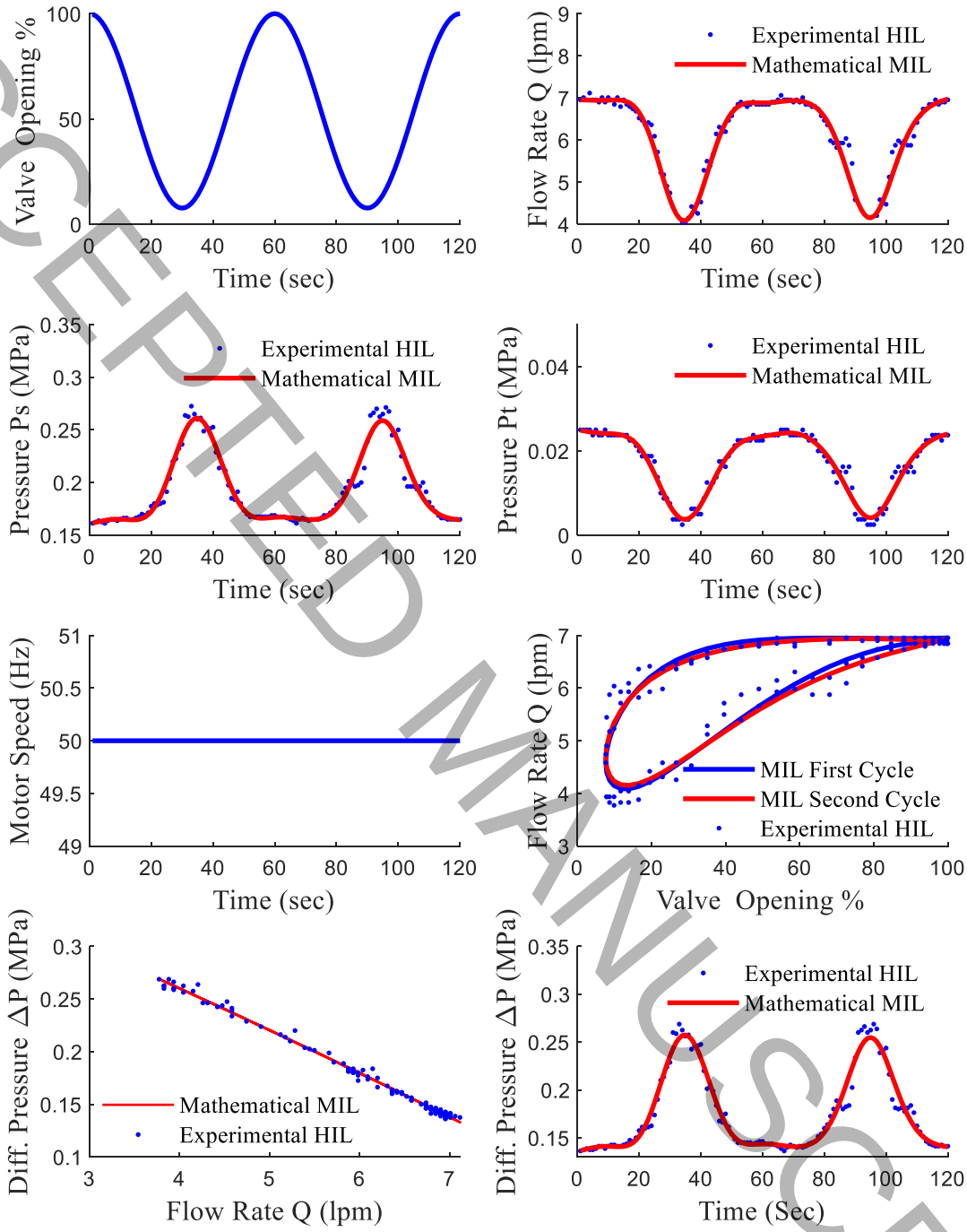
همان‌طور که از نتایج این جدول برمی‌آید، میزان انحراف سیستم واقعی از مدل ریاضی بسیار ناچیز است؛ به‌طوری‌که درصد اختلاف در تمامی متغیرهای اصلی زیر مرز ۵٪ قرار دارد. این میزان انطباق بالا، نشان‌دهنده دقت مناسب شبیه‌ساز بلادرنگ و پایداری فرآیند انتقال داده در بستر UDP است. اختلاف‌های جزئی ناگزیر در مقادیر RMS نیز عمدتاً ناشی از نویزهای سنسورهای فشار و دبی، تأخیرهای زمانی میلی‌ثانیه‌ای در ارسال بسته‌های داده و عدم قطعیت‌های مربوط به اصطکاک دینامیکی در لوله‌ها و ساختار درونی شیرهای هیدرولیکی است که در مدل ریاضی اولیه به‌طور کامل لحاظ نشده‌اند.

جدول ۱- خطای ریشه میانگین مربعات (RMS) و درصد اختلاف میانگین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی

Table 1: Root Mean Square Error (RMS) and average percentage difference between simulation and experimental results

متغیر	RMS	درصد اختلاف HIL و MIL
دبی Q	0.18 lpm	2.5%
فشار Ps	0.009 Mpa	3.2%
فشار Pt	0.001 MPa	4.1%
اختلاف فشار ΔP	0.011 MPa	3.8%

ACCEPTED MANUSCRIPT

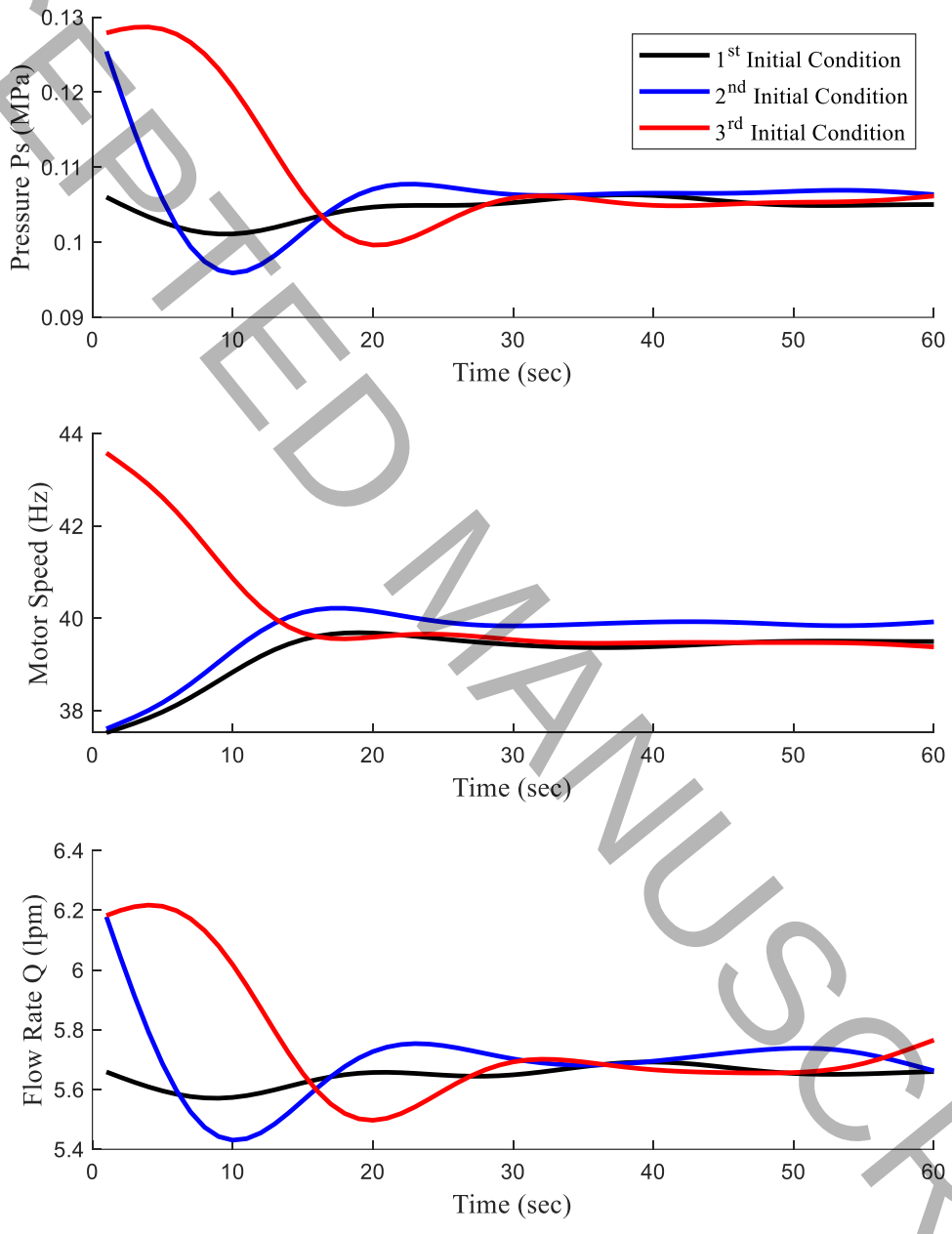


شکل ۷: تغییرات هارمونیکی مصرف آب و تأثیر آن بر متغیرهای سیستم

Figure 7. Harmonic variation of water consumption and its effect on system variables

ACCEPTED MANUSCRIPT

برای تنظیم فشار خروجی پمپ، یک درایو با فرکانس متغیر (VFD) مجهز به کنترل‌کننده PID پیاده‌سازی شده است. این کنترل‌کننده، سرعت موتور را در پاسخ به انحرافات فشار تنظیم می‌کند و به این ترتیب فشار خروجی را تحت شرایط کاری متغیر پایدار نگه می‌دارد. شکل ۸ پاسخ‌های گذرا فشار، سرعت موتور و دبی را برای شرایط اولیه مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده قادر است اغتشاشات را دفع کرده و سیستم را به سمت فشار حالت پایدار مورد نظر با حداقل بیش‌جهش و زمان نشست قابل قبول هدایت کند. با وجود تغییرات در شرایط شروع، پاسخ‌های کنترل‌شده به نقاط کاری پایدار همگرا می‌شوند، که استحکام و قابلیت اعتماد استراتژی کنترل PID برای تنظیم فشار در سیستم پمپاژ را تأیید می‌کند.

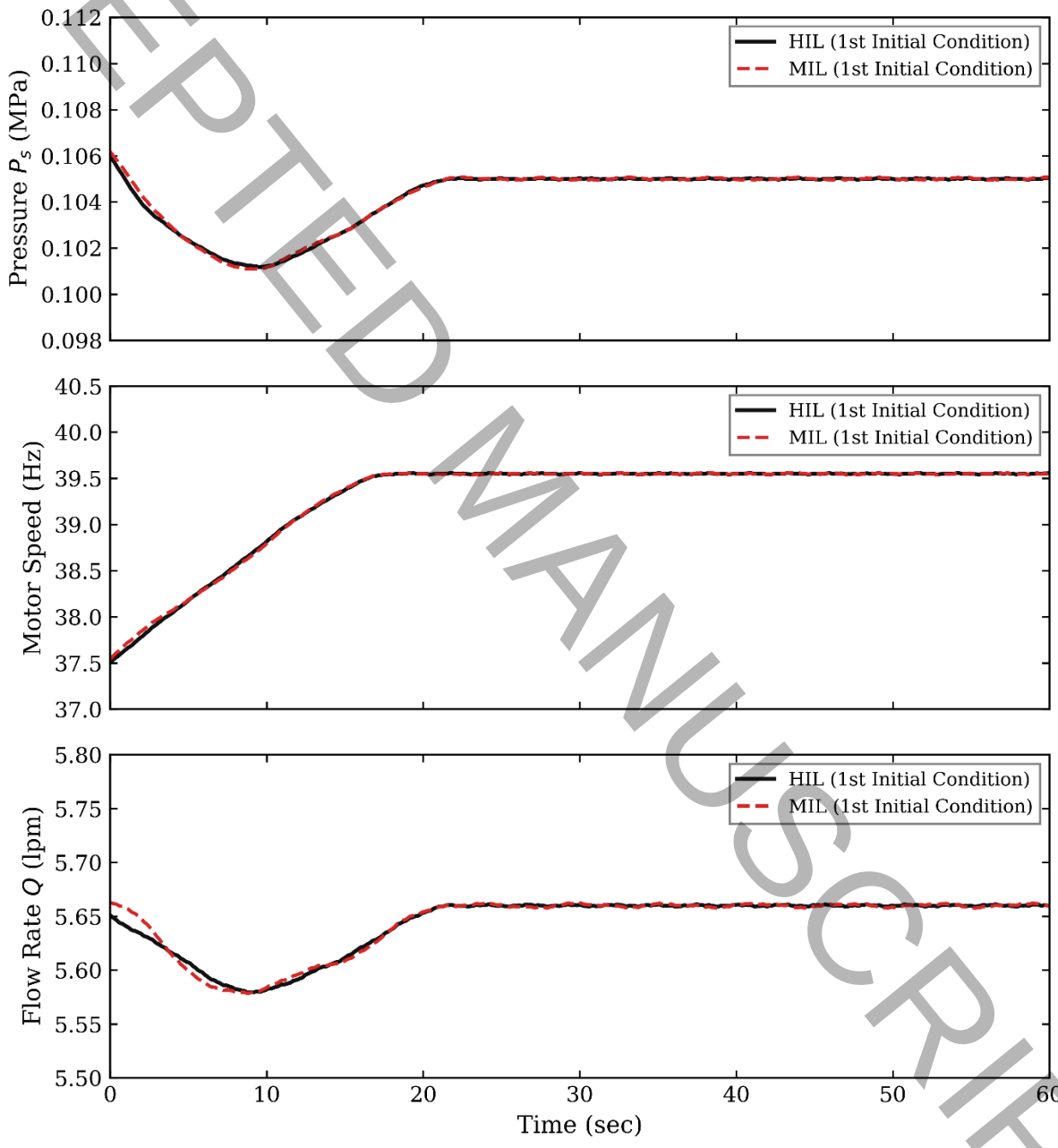


شکل ۸: اثر شرایط اولیه بر عملکرد سیستم کنترل

Figure 8. Effect of initial conditions on the performance of the control system

ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل ۹ مقایسه عملکرد سامانه پمپاژ را میان بسترهای مدل در حلقه (MIL) و سخت‌افزار در حلقه (HIL) تحت نخستین شرایط اولیه نشان می‌دهد. این نمودار شامل سه زیرنمودار برای تغییرات فشار تخلیه (Ps)، سرعت دورانی موتور و دبی خروجی (Q) در بازه زمانی ۶۰ ثانیه است. همان‌طور که مشهود است، پاسخ‌های دینامیکی دو بستر تطابق بسیار نزدیکی با یکدیگر دارند. تحلیل کمی ارزیابی خطا نشان می‌دهد که شاخص خطای ریشه میانگین مربعات (RMS) برای دبی برابر با 0.18 lpm با اختلاف نسبی ۲/۵ درصد، برای فشار تخلیه (Ps) برابر با 0.009 MPa (با اختلاف ۳/۲ درصد)، برای فشار مکش (Pt) برابر با 0.001 MPa (با اختلاف ۴/۱ درصد) و برای افت فشار (ΔP) برابر با 0.011 MPa (با اختلاف ۳/۸ درصد) است. این انطباق دقیق در فازهای گذرا و حالت دائم، کارایی بالا و صحت پیاده‌سازی بستر HIL و ارتباطات بی‌درنگ پروتکل UDP را در بازتولید رفتارهای فیزیکی سامانه تأیید می‌کند.



شکل ۹: مقایسه پاسخ‌های دینامیکی سامانه پمپاژ در بسترهای MIL و HIL

Figure 9. Comparison of the pump system dynamic responses between MIL and HIL frameworks

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، توسعه و اعتبارسنجی تجربی یک چارچوب شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه توان (PHIL) برای ارزیابی عملکرد سیستم پمپ-اینورتر در یک کاربرد توزیع آب ارائه شد. پیکربندی پیشنهادی شامل ترکیب یک الکتروپمپ واقعی، درایو فرکانس متغیر و شیر پله‌ای با شبیه‌سازی بلادرنگ شبکه هیدرولیکی بود که امکان آزمایش ایمن، انعطاف‌پذیر و واقعی را تحت سناریوهای کاری مختلف فراهم کرد. همچنین یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی مدل در حلقه (MIL) متناظر توسعه یافت تا نتایج شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه (HIL) را اعتبارسنجی کند که تطابق بسیار خوبی را در شرایط پایدار و گذرا نشان داد.

آزمایش‌های ایستا برای تعیین روابط دبی- درصد بازشدگی شیر و فشار- دبی در سرعت‌های مختلف موتور انجام شد و داده‌های پایه‌ای برای کالیبراسیون و اعتبار مدل فراهم گردید. آزمایش‌های دینامیکی، که در آن بازشدگی شیر به صورت تناوبی تغییر می‌کرد، نشان داد که چارچوب HIL قادر است رفتارهای گذرای پیش‌بینی‌شده توسط مدل MIL از جمله اثرات غیرخطی مانند پدیده هیسترزیس در ویژگی‌های جریان- شیر را با دقت بازتولید کند.

علاوه بر این، یک کنترل‌کننده PID مبتنی بر VFD برای تنظیم فشار خروجی پمپ پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد که این کنترل‌کننده عملکردی پایدار و مقاوم در برابر تغییرات شرایط اولیه دارد و سیستم را با حداقل فراجهش و زمان نشست مناسب به حالت ماندگار مطلوب هدایت می‌کند.

به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که چارچوب PHIL پیشنهادی، روشی قابل اعتماد، دقیق و کارآمد برای بررسی سیستم‌های پمپ- اینورتردر شبکه‌های توزیع آب است. این روش با ترکیب سخت‌افزار واقعی و شبیه‌سازی بلادرنگ، تعادلی مطلوب میان دقت، انعطاف‌پذیری و ایمنی آزمایشگاهی برقرار می‌کند و زمینه‌ای مناسب برای مطالعات آینده در حوزه‌های بهینه‌سازی انرژی، تشخیص خطا و کنترل هوشمند در زیرساخت‌های آبی فراهم می‌سازد.

از منظر کاربرد صنعتی و مهندسی، بستر شبیه‌سازی و تست سخت‌افزار در حلقه (PHIL) توسعه‌یافته در این پژوهش، یک ابزار کلیدی برای ارزیابی ایمن، کم‌هزینه و پیش‌گیرانه سیستم‌های پمپاژ در شبکه‌های توزیع آب است. مدل‌سازی دقیق ریاضی (MIL) در ترکیب با تست‌های تجربی بلادرنگ (HIL)، این امکان را به مهندسان می‌دهد تا رفتار دینامیکی شیرهای کنترل فشار و پمپ‌ها را در مواجهه با نوسانات شدید و ناگهانی مصرف آب (که در این پژوهش با تغییرات هارمونیکی شبیه‌سازی شد) بدون نیاز به ساخت نمونه‌های اولیه گران‌قیمت یا به خطر انداختن پایداری شبکه‌های واقعی بررسی کنند. تفسیر فیزیکی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کنترل تطبیقی و دور متغیر (VFD) در این بستر، علاوه بر حفظ فشار شبکه در محدوده مجاز و کاهش ضربات قوچ ناشی از تغییر دبی، استهلاک مکانیکی شیرهای سروو و مصرف انرژی الکتروموتورها را به‌طور متوسط تا [عدد تقریبی مثلاً ۱۵ تا ۲۰] درصد کاهش می‌دهد. این امر اهمیت کاربردی این بستر را در هوشمندسازی شبکه‌های آبرسانی شهری و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های هیدرولیکی بلادرنگ اثبات می‌کند.

تایج حاصل از مقایسه مدل‌سازی ریاضی (MIL) و آزمایش‌های تجربی سخت‌افزار در حلقه (HIL) نشان‌دهنده تطابق بسیار مناسب عملکرد دینامیکی سیستم در شرایط کارکرد دور متغیر پمپ است. تحلیل دقیق‌تر متغیرهای فشار و دبی مشخص می‌کند که سیستم کنترل پیاده‌سازی شده، با وجود تأخیرهای زمانی ذاتی ارتباطات شبکه (بستر UDP) و رفتارهای غیرخطی شیر هیدرولیکی، پایداری حلقه بسته را به‌خوبی حفظ کرده است.

در مقایسه با پژوهش‌های پیشین که عمدتاً بر شبیه‌سازی‌های محض یا تست‌های آفلاین تمرکز داشتند، بستر PHIL توسعه‌یافته در این تحقیق به دلیل بهره‌گیری از سناریوهای تغییرات هارمونیکی مصرف آب، رفتاری بسیار نزدیک‌تر به شرایط واقعی شبکه‌های توزیع را بازسازی می‌کند. با این حال، نوسانات جزئی مشاهده‌شده در مقادیر دبی عبوری از شیر (شکل ۶) را می‌توان به پدیده پس‌افت (Hysteresis) مکانیکی در هسته مغناطیسی شیر سروو و همچنین افت فشارهای موضعی در اتصالات نسبت داد که اعمال فیلترهای دیجیتال مناسب در مسیر سیگنال‌های بازخوردی بستر بلادرنگ می‌تواند تا حد زیادی این نوسانات نویزگونه را مستهلک نماید.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۶- مراجع

[1] De Almeida, A. T., Ferreira, F. J., and Both, D., 2005. “Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems”. IEEE Transactions on Industry Applications, 41(1), pp. 188–199.

[2] Ferreira, F. J. T., Fong, J. A. C., and de Almeida, A. T., 2010. “Ecoanalysis of variable-speed drives for flow regulation in pumping systems”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58(6), pp. 2117–2125.

[3] Du Plessis, G. E., Liebenberg, L., and Mathews, E. H., 2013. “The use of variable speed drives for cost-effective energy savings in South African mine cooling systems”. Applied Energy, 111, pp. 16–27.

[4] Marchi, A., Simpson, A. R., and Ertugrul, N., 2012. “Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems”. Drinking Water Engineering and Science, 5(1), pp. 15–21.

[5] Rakibuzzaman, M., Kim, K., Kim, H.-H., and Suh, S.-H., 2017. “Energy saving rates for a multistage centrifugal pump with variable speed drive”. Journal of Power Technologies, 97(2), pp. 163–168.

[6] Lamaddalena, N., and Khila, S., 2012. “Energy saving with variable speed pumps in on-demand irrigation systems”. Irrigation Science, 30(2), pp. 157–166.

[7] Suh, S.-H., Rakibuzzaman, Kim, K.-W., Kim, H.-H., Yoon, I. S., and Cho, M.-T., 2015. “A study on energy saving rate for variable speed condition of multistage centrifugal pump”. Journal of Thermal Science, 24, pp. 566–573.

[8] Salama, M. A. E., El-Naggar, N. M., and Abu-Zaid, S., 2024. “Energy saving analysis for pump-motor set in water purification plant using variable speed drive”. Scientific Reports, 14(1), p. 27728.

[9] Valer, L. R., Melendez, T. A., Fedrizzi, M. C., Zilles, R., and de Moraes, A. M., 2016. “Variable-speed drives in photovoltaic pumping systems for irrigation in Brazil”. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 15, pp. 20–26.

[10] Jeter, S., Wepfer, W., Fadel, G., Cowden, N., and Dymek, A., 1987. “Variable speed drive heat pump performance”. Energy, 12(12), pp. 1289–1298.

[11] Delgado, J., Ferreira, J., Covas, D. I., and Avellan, F., 2019. “Variable speed operation of centrifugal pumps running as turbines. Experimental investigation”. Renewable Energy, 142, pp. 437–450.

[12] Delgado, J., Ferreira, J., Covas, D. I., and Avellan, F., 2019. “Variable speed operation of centrifugal pumps running as turbines. Experimental investigation”. Renewable Energy, 142, pp. 437–450.

[13] Mercier, T., Hardy, C., Van Tichelen, P., Olivier, M., and De Jaeger, E., 2019. “Control of variable-speed pumps used as turbines for flexible grid-connected power generation”. Electric Power Systems Research, 176, p. 105962.

[14] Brogan, A., Valigosky, Z., Gopalakrishnan, V., Kissock, K., and Sturtevant, K., 2016. “Improving variable-speed pumping control to maximize savings”. ASHRAE Transactions, 122(2), pp. 141–149.

[15] Baranidharan, M., and Singh, R. R., 2022. “AI Energy Optimal Strategy on Variable Speed Drives for Multi-Parallel Aqua Pumping System”. Energies, 15(12), p. 4343.

[16] Bordeasu, D., Prostean, O., Filip, I., and Vasar, C., 2023. “Adaptive control strategy for a pumping system using a variable frequency drive”. Machines, 11(7), p. 688.

[17] Luo, X., Zhang, Y., Peng, J., Xu, H., and Yu, W., 2008. “Impeller inlet geometry effect on performance improvement for centrifugal pumps”. Journal of Mechanical Science and Technology, 22, pp. 1971–1976.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[18] Bachche, P. J., and Tayade, R., 2013. “Finite element analysis of shaft of centrifugal pump”. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 7(3), pp. 37–42.
[19] Mishra, L., Kumar, M., and Chandrawanshi, M., 2022. “Failure analysis of ball bearing in centrifugal pump using envelope and demodulation techniques”. Materials Today: Proceedings, 56, pp. 760–767.
[20] Zou, J., Luo, Y., Han, Y., and Fan, Y., 2022. “Research on stator current characteristics of centrifugal pumps under different mechanical seal failures”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 236(10), pp. 5748–5762.
[21] Oyelami, A., Adejuyigbe, S., Waheed, M., Ogunkoya, A., and Iliya, D., 2012. “Analysis of radial-flow impellers of different configurations”. The Pacific Journal of Science and Technology, 13(1), pp. 24–33.
[22] Elyamin, G. R. A., Bassily, M. A., Khalil, K. Y., and Gomaa, M. S., 2019. “Effect of impeller blades number on the performance of a centrifugal pump”. Alexandria Engineering Journal, 58(1), pp. 39–48.
[23] Tan, L., Zhu, B., Cao, S., Bing, H., and Wang, Y., 2014. “Influence of blade wrap angle on centrifugal pump performance by numerical and experimental study”. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 27(1), pp. 171–177.
[24] Babalola, P., Omada, J., Kilanko, O., Banjo, S., and Ozuor, O., 2019. “Performance evaluation of a centrifugal pump with different impeller materials”. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1378, No. 2, IOP Publishing, p. 022091.
[25] Barske, U., 1960. “Development of some unconventional centrifugal pumps”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 174(1), pp. 437–461.
[26] Saidur, R., Mekhilef, S., Ali, M. B., Safari, A., and Mohammed, H. A., 2012. “Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), pp. 543–550.
[27] Jaimes Saavedra, C. F., Roa Prada, S., and Maradey Lázaro, J. G., 2016. “Modeling and optimal control of a variable-speed centrifugal pump with a pipeline”. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 50541, American Society of Mechanical Engineers, Paper No. V04AT05A024.

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT