

## کاربرد سیستم فازی در بهینه سازی شبکه های آبرسانی

زهرا عیسی نیا

دانشجوی دکتری، گروه صنایع، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

نام نویسنده مسئول:

زهرا عیسی نیا

### چکیده

این مقاله یک سیستم فازی ارائه می دهد تا بوسیله آن بتوان فشار در یک شبکه توزیع آب را با استفاده از شیر و کنترل سرعت چرخشی سیستم های پمپاژ کنترل کرد. فرکانس متغیر سیستم پمپ را کنترل می کند، در حالی که دریچه های کنترل عملکرد لغو فشار بیش از حد در نقاط مختلف شبکه را دارند. سیستم کنترل می تواند هر مقداری از فشار مرجع را بررسی کند و برای تعداد نقاط مشاهده شده هیچ محدودیتی وجود ندارد. آزمایش هایی برای نشان دادن کارایی سیستم فازی انجام شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده در شرایط آزمایشی در یک شبکه واقعی هیدرولیک دارای نشت و بدون کنترل فشار، تلفات حجمی می تواند بیشتر از ۵۶٪ کاهش یابد. این آزمایش ها نشان داد که سیستم به اندازه کافی قوی می باشد تا بتواند شرایط آزمایشی فشار یک شبکه توزیع را کنترل کرد. علاوه بر این، سیستم پیشنهادی را می توان به راحتی در سیستم های تامین آب مشابه به کار برد که به کاهش مصرف آب و برق کمک کرده و همچنین هزینه های تعمیر و نگهداری را کاهش می دهد.

**واژگان کلیدی:** آب، راندمان برق، سیستم تامین آب، منطق فازی.

## مقدمه

انرژی و آب دو کالای ضروری و مرتبط برای زندگی هستند. هفت درصد از مصرف انرژی جهان در سال ۲۰۰۰ برای پمپاژ و سالم سازی آب برای ساکنان شهر و صنعت مورد استفاده قرار گرفت. در طول عمر شبکه تامین آب، در اکثر موارد، هزینه های انرژی پمپاژ هزینه های سرمایه گذاری را افزایش می دهد (Muranho, Ferreira, Sousa, Gomes, & Marques, 2014). مصرف انرژی اکثر سیستم های تامین آب در سراسر جهان می تواند با حداقل ۲۵ درصد استفاده از فرآیندهای بهره وری انرژی کاهش یابد. شرکت های تامین آب توانایی صرفه جویی در مصرف انرژی نسبت به کل مصرف در کشور تایلد دارند. بهینه سازی عملیات پمپاژ ممکن است صرفه جویی قابل ملاحظه ای را دربرگیرد، به ویژه در سیستم های بزرگ، جایی که این سرمایه گذاری می تواند به میلیون ها دلار در سال برسد. مطالعات متعدد در اروپا و ایالات متحده نشان می دهد که بسیاری از فرآیندهای صنعتی دارای پتانسیل سرمایه گذاری ۳۰٪ تا ۵۰٪ در سیستم های پمپاژ خود می باشند. (Tabesh & Hoomehr, 2009) انتخاب یک جایگزین کارآمد برای کاهش مصرف برق سیستم های شبکه پمپاژ توزیع آب، باعث کاهش جریان و فشار خواهد شد. موثرترین راه برای کاهش حجم آب پمپ شده، بدون سهمیه بندی، این است که می توان میزان کمبود واقعی آب را به حداقل رساند. به عنوان یک معیار متوسط یا کوتاه مدت، مدیریت فشار عملی ترین و اقتصادی ترین راه در میان روش های مختلف کنترل زیان های ناشی از نشت است. لازم به ذکر است که کنترل فشار در شبکه های هیدرولیکی مستقیماً بر روی مصرف برق و آب تاثیر می گذارد.

شایع ترین سیستم های اتوماسیون، کنترل نظارت و کسب اطلاعات - سیستم های SCADA - کنترل غیر مستقیم فشار را در نقاط شبکه امکان پذیر می سازد. با این حال، تصمیمات تا حد زیادی با تجربه اپراتورها مرتبط هستند، و از آنجایی که سیستم های کنترل نظارت و داده ها، همانند یک قاعده، تنها یک عملیات کمکی را ارائه می کنند. شما می توانید به بخش های مختلف در زمان واقعی نظارت، کنترل و مداخله کنید، اما نه با کنترل اتوماتیک و یکپارچه فرآیندها. برای یک سیستم توزیع آب بزرگتر، باید تصمیمات پیچیده تری گرفته شود. تعداد زیادی از عناصر که ممکن است وضعیت خود را تغییر دهند، شرایط را برای اتخاذ بهترین ترکیب وضعیت عملیاتی که توسط اپراتور تعریف می شود، پیچیده می کنند (Pimentel Gomes, de Tarso, & Srinivasan, 2008). با توجه به پیچیدگی های زیاد، جستجوی مناسب ترین تصمیم ها از نظر فرآیندهای عملیاتی باید با کمک ابزارهای محاسباتی مناسب انجام شود.

تجهیزات موجود برای کنترل فشار مشخصه فرکانس متغیر (VFD) در شبکه های هیدرولیکی و شیر کنترل است. معمولاً کنترل سرعت چرخشی توسط VFD همراه با موتور الکتریکی انجام می شود که بر اساس یک نقطه فشار شبکه هیدرولیکی اندازه گیری می شود. شیرهای کنترل استفاده شده برای کاهش فشار، شیرهای کاهش فشار نامیده می شوند و در نقاط ورودی شبکه قرار می گیرند. شبکه تامین آب بزرگتر می شود، تغییرات فشار در شبکه هیدرولیکی بسیار قابل توجه خواهد بود. در این موارد، برای اطمینان از کنترل فشار در نقاط مختلف سیستم، نیاز به استفاده همزمان دریاچه های کنترل و مشخصه فرکانس متغیر وجود دارد. بنابراین، هدف اصلی این مقاله توسعه سیستم های کنترل فازی اعمال شده به یک سیستم تامین آب برای به حداقل رساندن مصرف برق و حجم آب پمپ شده می باشد. مشخصه فرکانس متغیر سیستم کنترل برای حفظ ارتفاع فشار سیستم پمپ در مقدار مطلوب نگهداری می شود و سیستم کنترل سوپاپ کمک می کند تا بتوان فشار را در چند نقطه از شبکه آب کاهش داد.

## مروری بر ادبیات : سیستم های فازی

با پیشرفت های تکنولوژی دهه های اخیر، کنترل کننده های مدرن و کارآمد برای فرآیندهای پیچیده طراحی شدند. سیستم های فازی به عنوان جایگزینی برای کنترل اتوماتیک سیستم های غیر خطی با ورودی ها و خروجی های چندگانه ظهور کرده اند. این سیستم کنترل مبتنی بر منطق فازی است که تلاش برای رسمی سازی / مکانیزم سازی توانایی انسان برای تصمیم گیری منطقی است. (Zadeh, 2008)

سیستم های فازی توانایی خود را برای حل انواع مختلف مشکلات در زمینه های کاربردی مختلف نشان داده اند. با توجه به اهمیت مسائل زیست محیطی در حال حاضر، چندین مقاله پژوهشی مربوط به استفاده از کنترل کننده های فازی برای بهبود عملکرد کارخانه های تولید انرژی تجدید پذیر و افزایش بهره وری انرژی فرآیندهای صنعتی وجود دارد. مجموعه گسترده ای از مقالات در این موضوع یافت می شود. (Cirre, Berenguel, Valenzuela, & Klempous, 2009) طراحی و پیاده سازی استراتژی های کنترل ترتیبی دو لایه برای یک مجموعه توزیع کننده خورشیدی را توصیف کردند و همچنین نتایج تجربی قابل توجهی را ارائه دادند که بر اساس آن مزایای استفاده از آن رویکرد با مقادیر عملیات فعلی مقایسه شدند. لایه بالایی استراتژی ترتیبی با استفاده از دو رویکرد متفاوت، منطق فازی و بهینه سازی مبتنی بر مدل فیزیکی اجرا شد. هر دو به طور خودکار نقطه عمل بهینه کارخانه را تعیین می کنند، و با در نظر گرفتن محدودیت های عملیاتی در حالی که حداکثر سود از فروش برق تولید می شود. (Lin, Hong, Ou, & Chiu, 2011) طراحی آماده سازی آنلاین در کنترل شبکه عصبی

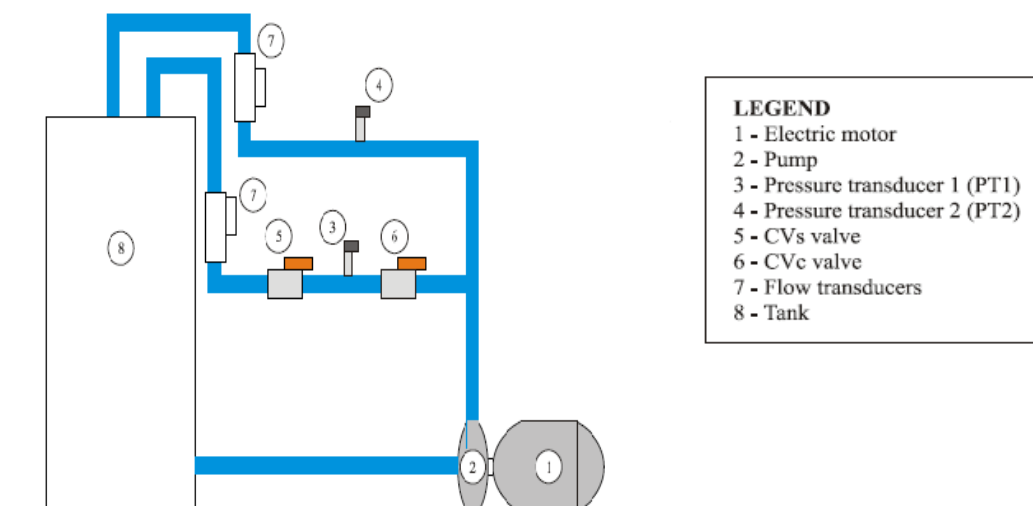
فازی تصادفی به همراه نمایشگر سیستم تطبیقی با عملکرد بالا برای کنترل حسگر یک ژنراتور القایی را ارائه کردند. کنترل حداکثر خروجی پیشنهاد شده بدون سنسورهای مکانیکی مانند سرعت باد یا سنسور مکان، به دست می آید و سیستم کنترل جدید، ایجاد حداکثر قدرت الکتریکی با وزن سبک، راندمان بالا و قابلیت اطمینان بالا را تضمین خواهد کرد. (Sung, Park, & Joo, 2011) کنترل فازی مبتنی بر مشاهدات قوی برای یک سیستم قدرت باد با سرعت متغیر را توسعه بخشیدند. در کار آنها، کنترل واکنش خروجی برای تثبیت سیستم نامشخص غیر خطی پیشنهاد شده است. برای دستیابی به ثبات قوی، آنها با عدم قطعیت پارامتری سیستم مربوطه مرتبط هستند که بر اساس مدل فازی Takagi-Sugeno است. نتایج شبیه سازی برای سیستم های قدرت با سرعت متغیر نشان می دهد که امکان سنجی روش پیشنهادی را تصور کنید.

سیستم های فازی به طور گسترده ای در کنترل سرعت چرخش متغیر، به ویژه در ماشین آلات القایی مورد استفاده در فرایندهای صنعتی استفاده می شود. سیستم فازی را برای کنترل پتانسیل ماتریس آب خاک، با هدف ایجاد یک روند آبیاری مطلوب، با تغییر سرعت چرخش سیستم پمپاژ را توسعه دادند. (de Almeida Souza, de Aragao Filho, & Sousa, 2007) یک کنترل کننده فازی تطبیقی را برای بهینه سازی بهره وری از مشخصه های قابل تنظیم سرعت، با تاکید بر روی مشخصه های موتور القایی بردار پیشنهاد دادند. این تکنیک ترکیبی از دو روش کنترل متمایز، یعنی جستجوی آنلاین از نقطه عملیاتی بهینه و کنترل کارایی مبتنی بر مدل است. (Yu, Chen, & Yu, 2010) روی مشکل کنترل ردیابی موقعیت برای موتور القایی میدان مغناطیسی با عدم قطعیت پارامتر و اختلال گشتاور بار تمرکز کردند. به طور سنتی، کنترل کننده های مورد استفاده برای موتورهای از کنترل کننده PID استفاده می کنند. در عمل، برای یک مشخصه سیستم، پارامترها ممکن است در حین عملیات متفاوت باشند، پس عملکرد سیستم ممکن است خراب شود، و به بی ثباتی در شرایط شدید منجر می شود. این مشکل در سیستم فازی به حداقل رسیده است. به عنوان مثال در بعضی از کارهای قبلی که ذکر شدند، سیستم های منطقی فازی برای کاهش غیر خطی بودن کنترل های مشخصه موتور القایی استفاده می شود. چندین روش برای کنترل این موتورها در مروری بر ادبیات پیشنهاد شده است، اما برنامه های کاربردی برای سیستم های پمپاژ موتور که با توجه به ماهیت شبکه توزیع آب برای طراحی کنترل کننده های فازی ایجاد شده اند، به ندرت یافت می شوند.

منطق فازی نیز به عنوان یک سیستم پشتیبانی تصمیم گیری DDS تقریباً در تمام مناطق وجود دارد، به عنوان مثال، در سیستم های تامین آب استفاده می شود. (DDS Sinske & Zietsman, 2004) را برای تجزیه و تحلیل حساسیت شکست لوله ایجاد کرده اند. مدیر می تواند DDS را برای مدل سازی پدیده شکست لوله های پیچیده در یک سیستم توزیع آب برای شناسایی لوله هایی که حساس هستند، اعمال کند. DDS در حال حاضر با موفقیت به سیستم توزیع آب شهر پارل در آفریقای جنوبی اعمال شده است. (El-Baroudy & Simonovic, 2011) ابزار اندازه گیری عملکرد فازی برای ارزیابی عملکرد یک سیستم تامین آب پیچیده مورد بررسی قرار گرفت، در قابلیت اطمینان-آسیب پذیری و همچنین قدرت و انعطاف پذیری ترکیب شده است.

### شرح سیستم

این مطالعه با استفاده از یک مجموعه آزمایشی توزیع آب، شامل یک مخزن، سیستم پمپاژ، مشخصه متغیر فرکانس، ۲ سوپاپ  $CV_c$ ،  $CV_s$  دو مبدل فشار و ۲ مبدل جریان، علاوه بر لوازم جانبی هیدرولیکی و الکتریکی است (عکس ۱). روش تجربی از ۲ شاخه برای شبیه سازی ۲ بخش در یک شبکه توزیع آب واقعی تشکیل شده است.  $CV_s$  ها برای تغییر شرایط عملیاتی سیستم است، و از تنوع تقاضاها پیروی می کنند.



شکل ۱: راه اندازی آزمایشی توزیع آب

هنگامی که  $CV_s$  بسته است، جریان کاهش می یابد؛ در نتیجه، فشار بالادستی درجه افزایش می یابد. قسمت باز منحنی  $CV_s$  بر اساس مشخصات مصرف آب یک بخش از منطقه متروپولیتن سائو پائولو، برزیل است. مشخصه متغیر فرکانس ( $VFD$ ) برای نگه داشتن فشار در نقطه بحرانی شبکه هیدرولیکی با فشار مطلوب (فشار مرجع) مساوی در نظر گرفته شده است، در حالی که درجه  $CV_c$  فشار اضافی نقطه اندازه گیری در شعبه ۱ را حذف می کند. سیستم جمع آوری داده ها شامل گردآوری داده های  $PC$  و  $DAQ$  می باشد. برای اندازه گیری و نظارت بر متغیرهای الکتریکی ورودی و خروجی موتور  $VFD$  + (جریان الکتریکی، ولتاژ و قدرت الکتریکی) از دو آنالیزگر انرژی استفاده شده است.

### سیستم فازی پیشنهادی

سیستم کنترل در ابعاد آزمایشگاهی توسعه داده شده است و شامل ۲ کنترل کننده فازی می باشد: اولین فرد مسئول تعیین فرکانس  $VFD$  است، در حالی که دومین نفر شیر کنترل  $CV_c$  را اداره می کند. استفاده از مجموعه های فازی اجازه می دهد تا بسط سیستم کنترل را بدون آگاهی قبلی از مدل ریاضی مطابق با دستگاه کنترل شده ایجاد کند. سیستم فازی از ۴ ورودی آنالوگ و ۳ خروجی آنالوگ  $DAQ$  استفاده می کند. ورودی های آنالوگ سیگنال های مبدل های فشار  $PT_1$  و  $PT_2$  و از شیرهای  $CV_c$  و  $CV_s$  است. خروجی های آنالوگ برای تنظیم میزان باز کردن شیر  $CV_c$  و فرکانس فعال موتور پمپ استفاده می شود. ورودی ها و خروجی های سیستم فازی و متغیرهای زبانی، و همچنین تعداد و قالب توابع عضویت به عنوان پیشنهادات بخش مرور بر ادبیات، تحلیل های ابتکاری و آزمایش های تجربی انتخاب شده است. متغیرهای شکننده می توانند عادی شوند، جهان با ساده تر کردن گفتمان و یا یک تابع کاربردی تعریف می شود. در این مطالعه، طیف وسیعی از مبحث بر اساس ارزش واقعی تعریف خواهد شد. متغیرهای زبانی به منظور ایجاد کنترل فشار در ۲ نقطه اندازه گیری در شرایط آزمایشی انتخاب شدند. متغیرهای زبانی ورودی عبارتند از:

$PRES$ : فشار در نقطه بحرانی بسیاری از شبکه های هیدرولیک

$FREQ$ : فرکانس فعال سازی سیستم موتور پمپ

$DIF$ : کسری بودجه یا فشار بیش از حد  $CV_c$

$VALVE$ : موقعیت زاویه شیر  $CV_c$

اصطلاحات زبانی خروجی سیستم فازی هستند:

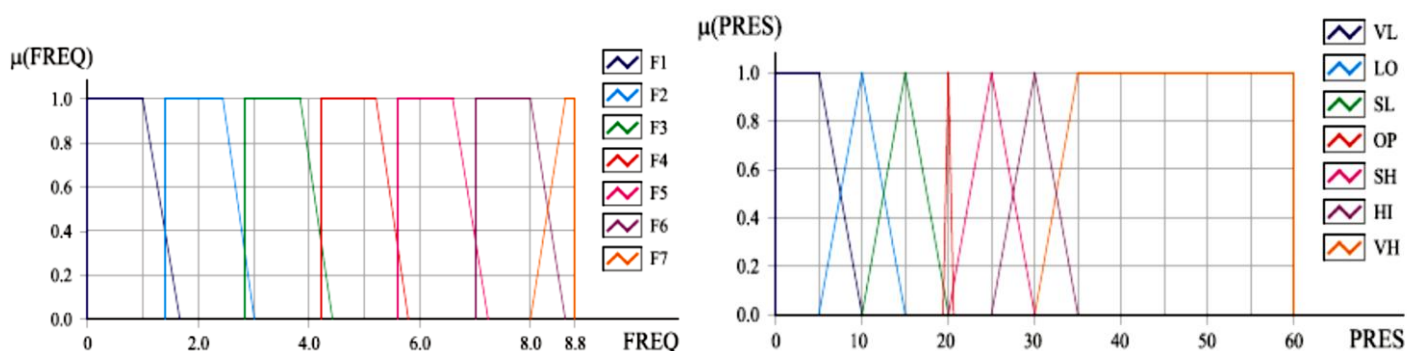
$\Delta F$ : افزایش یا کاهش سیگنال کنترل از  $VFD$

$\Delta V$ : افزایش یا کاهش در زاویه باز شدن شیر  $CV_c$

تعدادی از مجموعه تابع عضویت که در توصیه های بخش مرور ادبیات بین ۲ تا ۷ مطرح شده است. از این رو، ۷ مجموعه فازی برای هر متغیر، به جز  $\Delta F$ ، مورد استفاده قرار می گیرد، که ۹ شرط برای یکدست کردن سیگنال خروجی مورد استفاده قرار می گیرد. این یکدست کردن برای به حداقل رساندن جریان های پیک در موتور الکتریکی ناشی از  $VFD$  مهم است.

متداول ترین فرمت های توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه ای می باشد که به راحتی تولید می شوند. به منظور کاهش پیچیدگی سیستم استنتاج منطقی فازی، توابع عضویت با اشکال موجود در مروری بر ادبیات فرآیند متداول کنترل تصویب شد، در حالی که شرایط مرزی به صورت استثنایی است و باقی مانده از شرایط تابع مثلثی است. توابع عضویت بر اساس توصیه های مرور بر ادبیات و دانسته های ابتکاری از شبیه سازی ها و آزمایش های تجربی تعیین می شود.

روش استنتاج با استفاده از روش *Mamdani* بر اساس تصمیم گیری حداقل-حداکثری می باشد. دو روش معمول مورد استفاده برای فازی سازی وجود دارد، یعنی منطقه مرکزی و حداکثر میانگین. در اینجا، روش مرکزی به عنوان سطوح گفتمان برای متغیرهای متوالی خروجی انتخاب شده است. با فازی سازی، حاصل مقادیر فازی از قوانین فازی به ارزش تردید تبدیل می شوند.



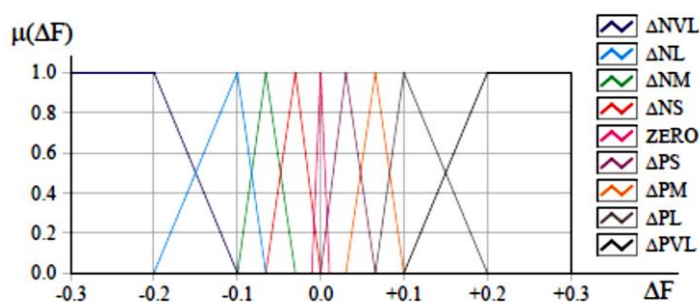
شکل ۲: مجموعه فازی برای متغیرهای ورودی بارگذاری شده -  $FREQ$  و  $PRES$  کنترل کننده فازی  $VFD$

از طریق تجزیه و تحلیل کیفی رفتار فشار، بسته به تغییر سرعت چرخش سیستم پمپ، برای کنترل کننده فازی مشخصه فرکانس متغیر -  $PRES$  و  $FREQ$  مشخص می شود. اولین مورد کسری یا فشار بیش از حد در نقطه بحرانی سیستم است، در حالی که دومین مورد نشان دهنده مقدار مشخصه فرکانس موتور است.

متغیر ورودی زبانی  $PRES$  (شکل ۲) به عنوان یک نقطه از سری ۲۰ تایی نقاط تعریف می شود، یعنی کنترل کننده با توجه به مقدار نقطه ۲۰ به عنوان یک مقدار بهینه برای متغیر در نظر گرفته شد. سطح تعاریف بر مبنای محدوده اندازه گیری مبدل های فشار تعیین می شود. شرایط زبانی و توابع عضویت کنترل کننده  $VFD$  در شکل ۲ توضیح داده شده است. برای متغیر  $FREQ$  این اصطلاحات بسیار کم ( $VL$ )، کم ( $LO$ )، کمی پایین ( $SL$ )، بهینه ( $OP$ )، کمی بالا ( $SH$ )، بالا ( $HI$ ) و بسیار بالا ( $VH$ ) وجود دارند.

اولین خروجی سیستم فازی  $\Delta F$  است که مستقیماً با اندازه گیری فشار سیستم و سرعت چرخش مرتبط است. جستجوی اکتشافی متغیر خروجی عبارتند از:

اگر فشار در بحرانی ترین نقطه سیستم کمتر از حد مطلوب باشد، کنترل کننده، سرعت چرخش سیستم پمپ را افزایش می دهد؛ اگر فشار در بحرانی ترین نقطه سیستم بیشتر از حد مطلوب باشد، کنترل کننده، سرعت چرخشی سیستم پمپ را کاهش می دهد.



شکل ۳: توابع عضویت از متغیر زبانی خروجی  $\Delta F$

سطح تعاریف متغیر  $\Delta F$  در محدوده  $[-0,30, 0,30]$  است که با مقادیر واقعی ولتاژ الکتریکی مطابقت دارد. مجموع مقدار  $\Delta F$  و  $FREQ$  (که بین ۰ و ۸,۸ متغیر است) مقدار ولتاژ فرستاده شده به مبدل را از طریق  $DAQ$  می گیرد. توابع عضویت در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای تعیین متغیر خروجی  $\Delta F$  چهارده قاعده استنتاج فازی ایجاد شده است. جدول ۱ ماتریس وابسته فازی کنترل کننده  $VFD$  را بر اساس تجربه گذشته با تنظیمات دستی ارائه می دهد. پایه قانون نشان دهنده دانش کنترل کننده است؛ از این رو فرمولاسیون باید با دقت مورد توجه قرار گیرد.

### مدل سازی کنترل کننده فازی از $CV_c$

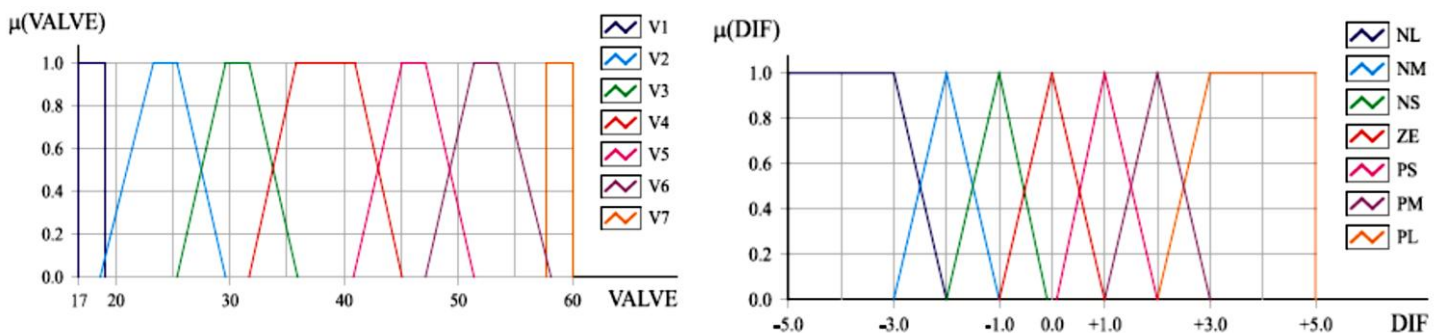
برای مدل سازی کنترل کننده فازی  $CV_c$ ، تعیین متغیر ورودی و خروجی ضروری است. از طریق یک تجزیه و تحلیل کیفی الگوهای رفتاری بسته به فشار و زاویه باز شدن شیر  $CV_c$  است، ۲ ورودی در فاز کنترل کننده شیر کنترل  $DIF$  و  $VALVE$  ایجاد شد. متغیر ورودی زبانی  $DIF$  براساس اندازه گیری فشار تعریف می شود و زاویه باز شدن شیر  $CV_c$  را ایجاد می کند. متغیر  $DIF$  با معادله (۱) محاسبه می شود و مربوط به افزایش یا کاهش فشار پایین لوله  $CV_c$  است که مقدار دلخواه آن صفر است. سطح تعاریف برای این توابع ورودی بین ۵ و ۵- محدود شده است که مربوط به دامنه ای است که در اندازه واقعی در متر اندازه گیری می شود.

$$(1) \quad DIF = (P_1 - P_{1ref}) - (P_2 - P_{2ref})$$

جایی که:

$P_i$ : در نقطه  $i$  فشار است

$P_{i ref}$ : مقدار مرجع نقطه  $i$  است



شکل ۴: مجموعه فازی برای متغیرهای ورودی  $VALVE$  و  $DIF$

دریچه کنترل مورد استفاده در مطالعه از نوع متداول است که زاویه باز آن به طور خطی با ولتاژ اعمال شده بر روی آن، از ۲ تا ۱۰ ولت متغیر است. اما مشاهده شده است که تغییر فشار تنها در محدوده  $17^0$  تا  $60^0$  بین ۰ و ۱۷ درجه است، شیر  $CV_c$  هنوز بسته است و در محدوده ۶۰ تا ۹۰ درجه کاملاً باز است (افت فشار به صفر می رسد). بنابراین، سطح تعاریف [۶۰، ۱۷] مورد قبول واقع می شود.

متغیر خروجی، به نام  $\Delta V$ ، به افزایش یا کاهش درجه زاویه باز شدن شیر  $CV_c$  مرتبط است که به جریان بالایی  $PTI$  اشاره دارد. فرم جستجو اکتشافی برای متغیر خروجی  $\Delta V$  براساس تعارف زیر عبارتند از:

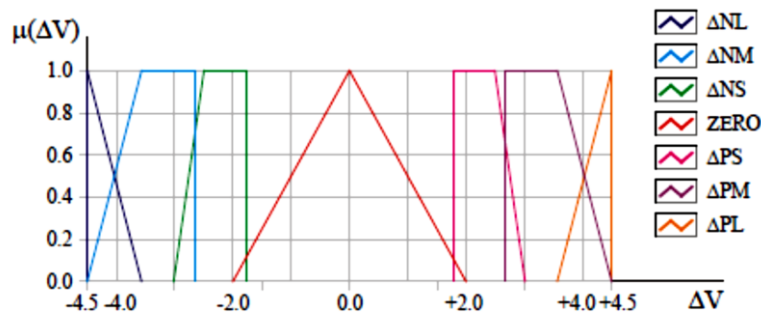
اگر فشار کمتری نسبت به شیر کنترل وجود دارد، باید زاویه باز شدن را کاهش داد. از سوی دیگر، اگر یک کسری بودجه در فشار پایین دست شیر کنترل وجود دارد، باید زاویه باز شدن را افزایش دهد.

توابع عضویت از متغیرهای ورودی و خروجی در شکل های ۴ و ۵ ارائه شده است. برای متغیر  $DIF$  این تعاریف مثبت بزرگ ( $PL$ )، مثبت میانی ( $PM$ )، مثبت کوچک ( $PS$ )، صفر ( $ZE$ )، منفی کوچک ( $NS$ )، منفی متوسط ( $NM$ )، و منفی بزرگ ( $NL$ ) وجود دارد.

چهل و سه قاعده تداخل فازی برای تعیین متغیر خروجی  $\Delta V$  که مربوط به ۷ تابع عضویت  $DIF$  با ۷ تابع  $VALVE$  متغیر است، به وجود خواهد آمد. جدول ۲ ماتریس انجمنی فازی کنترل کننده  $CV_c$  را نشان می دهد.

جدول ۱  
 ماتریس قاعده فازی کنترل کننده VFD

		PRES						
		VL	LO	SL	OP	SH	HI	VH
FREQ	F1	$\Delta PVL$	$\Delta PVL$					
	F2	$\Delta PVL$	$\Delta PL$	$\Delta PM$	0			
	F3	$\Delta PVL$	$\Delta PL$	$\Delta PM$	0	$\Delta NS$		
	F4	$\Delta PVL$	$\Delta PM$	$\Delta PS$	0	$\Delta NS$	$\Delta NM$	$\Delta NM$
	F5	$\Delta PL$	$\Delta PM$	$\Delta PS$	0	$\Delta NS$	$\Delta NL$	$\Delta NL$
	F6			$\Delta PS$	0	$\Delta NM$	$\Delta NL$	$\Delta NVL$
	F7				0	$\Delta NM$	$\Delta NVL$	$\Delta NVL$



شکل ۵: توابع عضویت از متغیر زبانشناختی خروجی  $\Delta V$

جدول ۲  
 ماتریس قاعده فازی کنترل کننده CV<sub>s</sub>

		DIF						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
VALVE	V1	$\Delta PL$	$\Delta PL$	$\Delta PM$	0			
	V2	$\Delta PL$	$\Delta PL$	$\Delta PS$	0	$\Delta NS$	$\Delta NS$	$\Delta NS$
	V3	$\Delta PL$	$\Delta PL$	$\Delta PS$	0	$\Delta NS$	$\Delta NM$	$\Delta NM$
	V4	$\Delta PL$	$\Delta PM$	$\Delta PS$	0	$\Delta NS$	$\Delta NM$	$\Delta NL$
	V5	$\Delta PM$	$\Delta PM$	$\Delta PS$	0	$\Delta NS$	$\Delta NL$	$\Delta NL$
	V6	$\Delta PS$	$\Delta PS$	$\Delta PS$	0	$\Delta NS$	$\Delta NL$	$\Delta NL$
	V7				0	$\Delta NM$	$\Delta NL$	$\Delta NL$

### نتایج و بحث

این بخش تجربیات انجام شده در کارخانه واقعی را توصیف می کند (شکل ۱). به منظور اعتبارسنجی سیستم کنترل پیشنهادی، سه آزمایش انجام شد:

**آزمایش ۱:** آزمون کنترل حلقه باز (بدون کنترل) با شیر پایینی (CV<sub>s</sub>) PTI متفاوت است و زاویه باز به منظور شبیه سازی تقاضای جریان آب سیستم است.

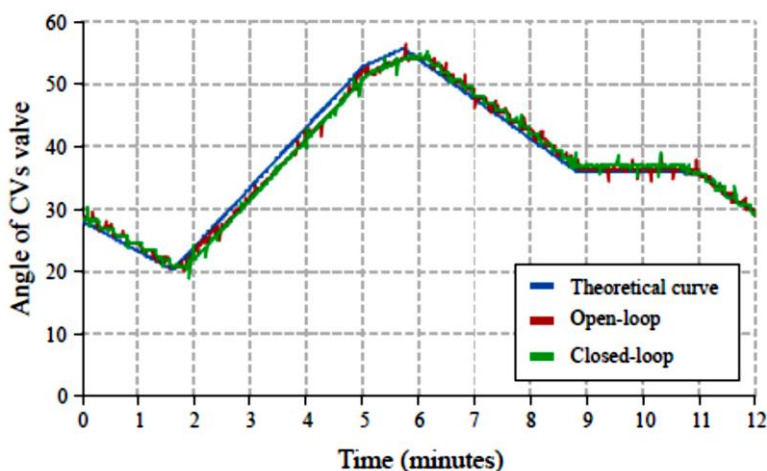
**آزمایش ۲:** آزمون کنترل حلقه بسته، با یک مرحله مرجع ورودی از ۲۰ برای متغیر PRES می باشد، و تنها با استفاده از کنترل کننده فازی VFD انجام می شود. این آزمایش تحت شرایط عملیاتی مشابه آزمایش ۱ انجام می شود. یک ابزار مجازی برای شبیه سازی

تقاضا برای یک سیستم واقعی بوسیله عملیات از راه دور  $CV_s$  در برنامه محاسباتی *LabVIEW* توسعه داده شد. شکل ۶ منحنی نظری و منحنی واقعی  $CV_s$  زاویه باز برای آزمایشات ۱ و ۲ را نشان می دهد.

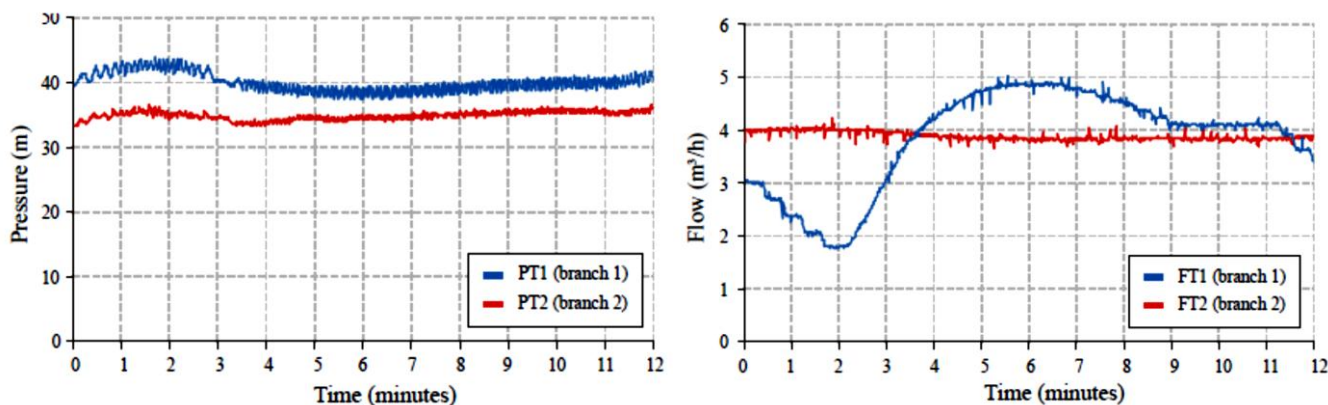
**آزمایش ۳:** تست کنترل حلقه بسته برای مرحله ورودی مرجع فاصله ۲۰ متری برای دو نقطه اندازه گیری که در آن فشار مورد ارزیابی قرار گرفت.

### آزمایش ۱

آزمایش ۱ در یک سیستم حلقه آزاد انجام شد که بعداً با آزمایش ۲ مقایسه خواهد شد. شکل ۷ فشار و جریان را در شاخه های ۱ و ۲ در آزمایش ۱ نشان می دهد. همانطور که انتظار می رود، جریان در شعبه ۱ از همان الگوی  $CV_s$  برای زاویه باز استفاده می کند. متوسط جریان ۳،۸۴ متر مکعب در ساعت در شعبه ۱ و ۳،۸۹ متر مکعب در ساعت در شعبه ۲ می باشد، جریان به طور متوسط ۷،۷۳ متر مکعب در ساعت است. با توجه به طراحی فشار ۲۰ متر می باشد، فشار متوسط در  $PT1$  (40.02 m) متر و  $PT2$  (34.94 m) به ترتیب ۱۰۰٪ و ۷۵٪ می باشد که بالاتر از حد ایده آل است.



شکل ۶: منحنی باز کردن درجه  $CV$



شکل ۷: نتایج حاصله از آزمایش ۱ - فشار و جریان

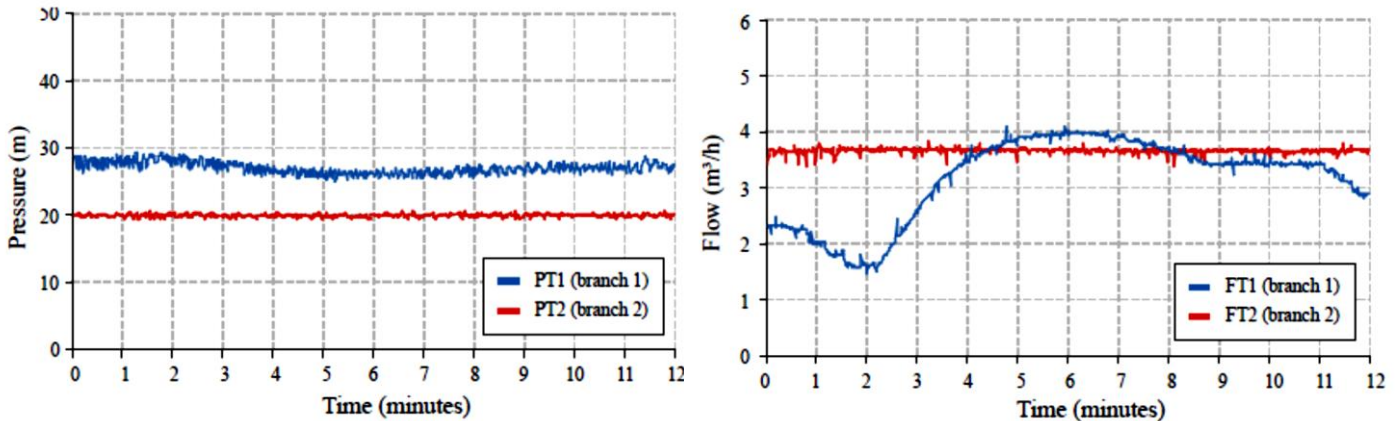
### آزمایش ۲

آزمایش ۲ تحت شرایط عملیاتی مشابه آزمایش ۱ انجام شد اما با استفاده از کنترل کننده فازی *VFD* انجام شده است. این آزمایش حلقه بسته با ورودی گام ۲۰ متر برای متغیر *PRES* است. در ابتدا، فرکانس ولتاژ موتور ۵۰ هرتز بود و *CV* به طور کامل باز بود. تنوع باز کردن زاویه  $CV_s$  همانند آزمایش ۲ بود.

شکل ۸ فشار و جریان را در شاخه های ۱ و ۲ آزمایش ۲ نشان می دهد. جریان  $FT2$  از الگوی مشابهی برای  $CV_s$  برای زاویه باز استفاده می کند، زیرا  $FT2$  برحسب متر در همان شعاع شیر قرار دارد. متوسط جریان در شعبه ۱، ۲۲/۳ متر مکعب در ساعت و شعاع ۳۷۱/۲



متر مکعب در ساعت می باشد که جریان میانگین را به ۶,۹۳ مترمکعب در ساعت می رساند. میانگین فشار در نقطه های اندازه گیری  $PT1$  و  $PT2$  به ترتیب ۲۷ و ۲۰ متر بود. سیستم کنترل پاسخ رضایت بخشی را نشان داد و خطای حالت پایدار ۱۱,۱۱٪ (۰,۶۲ متر) و خطای متوسط ۱,۰۲٪ (۰,۲۰ متر) بود.

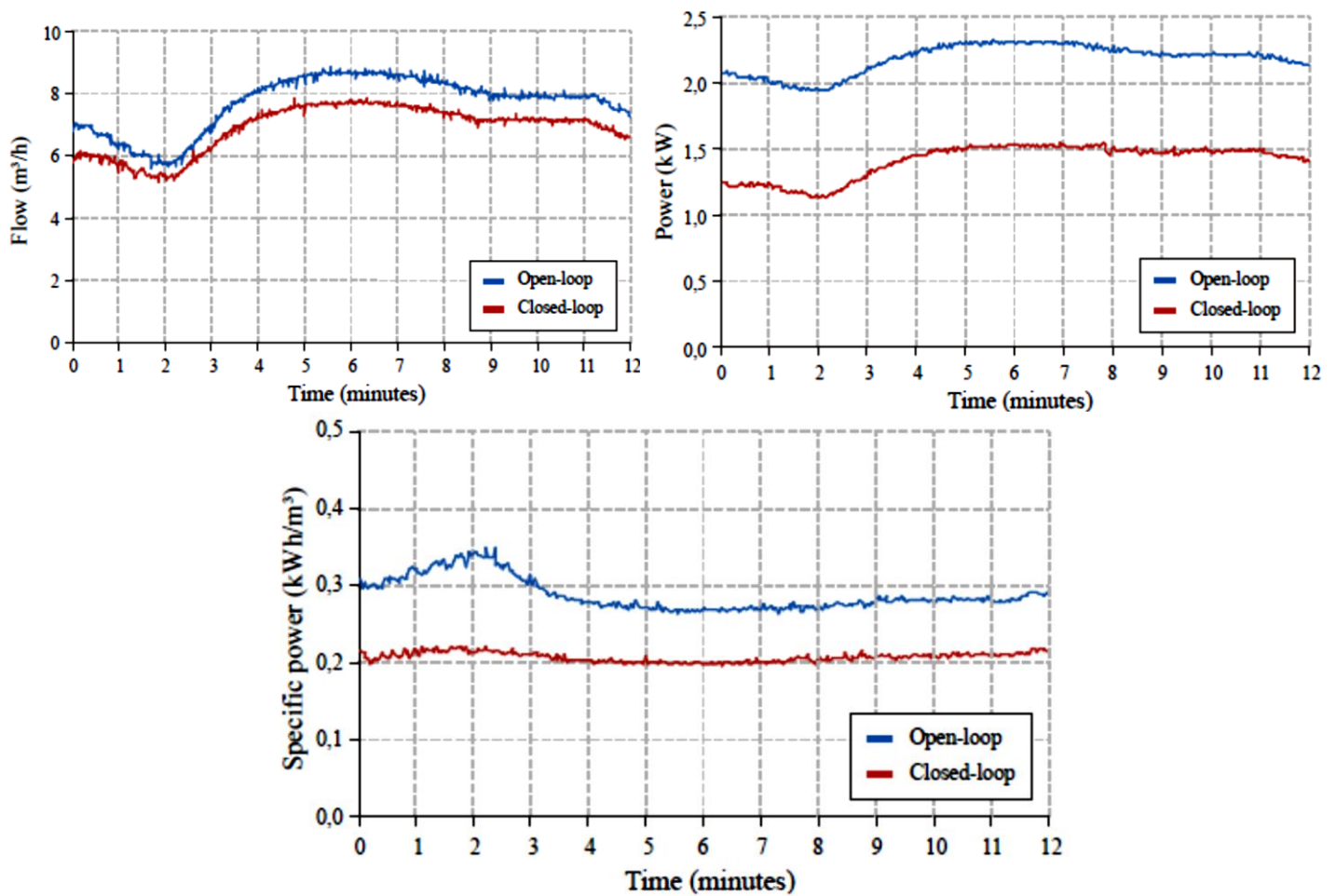


شکل ۸: نتایج حاصله از آزمایش ۲ - فشار و جریان

### ارزیابی مصرف برق

برای ارزیابی بهره وری انرژی در شرایط تجربی، مصرف انرژی در خط مستقیم اندازه گیری شد همچنین مصرف انرژی ویژه محاسبه شد. مصرف انرژی به طور گسترده ای در بخش های تامین آب استفاده می شود و به عنوان نسبت مصرف انرژی، در کیلووات ساعت و حجم پمپ، در مگاوات، در یک فاصله زمانی مشخص تعریف می شود. با وجود این واقعیت که  $VFD$  حدود ۵ درصد کل انرژی را مصرف می کند و باعث کاهش کارایی موتور پمپ می شود، مشخص شد که کنترل سرعت چرخش باعث کاهش ۳۵,۰۳ درصد مصرف برق می شود که با کاهش ۲۷,۹۱ درصد در مصرف انرژی خاص همراه است. جریان های به دست آمده در آزمایشات ۱ و ۲، قدرت و مصرف انرژی خاص در شکل ۹ را نشان داده است. جدول ۳ مقادیر و پارامترهای ارزیابی انرژی آزمایشات ۱ و ۲ را نشان می دهد.

جدول ۳ شاخص مصرف آزمایشات			
	جریان کل (متر مکعب در ساعت)	مصرف برق الکتریکی (کیلووات ساعت / سال)	مصرف انرژی خاص (کیلووات ساعت / $M3$ )
آزمایش ۱	۷,۷۳	19312	0.29
آزمایش ۲	۶,۹۳	12547	0.21
تفاوت (%)	۱۰,۳۸	35.03	27.91



شکل ۹: مقایسه آزمایشات ۱ و ۲ - کل جریان، مصرف برق و مصرف انرژی خاص

### آزمایش ۳

*VFD* به طور جداگانه عمل می کند و قادر به بهینه سازی فشار در بیش از یک نقطه از سیستم توزیع آب نیست، همانطور که در اندازه گیری نقطه ۱ (شعبه ۱) فشار بیش از ۷ متر دیده می شود (شکل ۸).  
 با استفاده از معادله پیشنهاد شده توسط مسیرهای ثابت و متغیر منطقه تخلیه تئوری (*FAVAD*) معادله (۲)، با  $NI = 1.5$  (نشت معمولی پس زمینه)، و استخراج نتایج یک شبکه واقعی با نشت، شبیه سازی سیستم فازی توسعه یافته کنترل همزمان *VFD* و *VC* (آزمایش ۳)، در مقایسه با سیستم کنترل بدون کنترل فشار، کاهش احتمالی ۶۴٫۶۷٪ (شعبه ۱) و ۵۶٫۶۹٪ (شعبه ۲) میزان نشت را فراهم می کند. جدول ۴ خلاصه ای از حجم پتانسیل نشتی و فشار شبکه برای شرایط مختلف ذکر شده را ارائه می دهد.

جدول ۴  
 خلاصه ای از فشار و حجم از دست رفته توسط نشت ها (برآورد شده)

	شعبه ۱		شعبه ۲	
	میانگین فشار ( $m$ )	حجم بالقوه	میانگین فشار ( $m$ )	حجم بالقوه
سیستم کنترل ( <i>VFD + CVc</i> )	۲۰٫۰۰	$x$	۲۰٫۰۰	$Y$
کنترل فازی <i>VFD</i>	۲۷٫۰۴	$1.57 * X$	۲۰٫۰۰	$Y$
بدون کنترل	۴۰٫۰۲	$2.83 * x$	۳۴٫۹۴	$2.31 * Y$

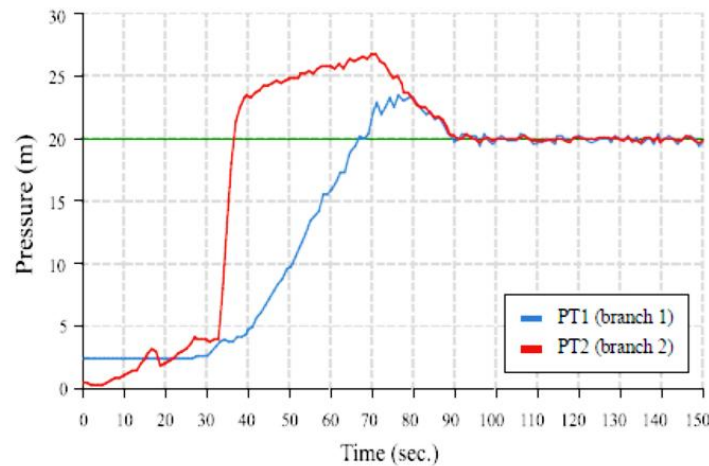
$x$  و  $y$  حجم آب از دست رفته ناشی از نشت احتمالی و تئیکه هر دو کنترل کننده به طور همزمان استفاده می شود. تئوری FAVAD درک روابط نشتی فشار برای شبکه ها را بسیار پیشرفته کرده است. این تئوری پی برد که انواع خاصی از نشت مسیرهای نشتی متغیر را دنبال می کنند. محاسبه نشت فشار می تواند تا ۲,۵ برابر در چنین مواردی متفاوت باشد. آزمایش های مختلف با استفاده از تئوری FAVAD تایید می کند که تاثیر فشار بر حجم نشت و فرکانس نشت های جدید بسیار بیشتر از مقدار پیش بینی شده می باشد.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left[ \frac{P_1}{P_2} \right]^{N_1}$$

جایی که :

$Q_i$  مقدار نشت از طریق سوراخ در لوله که فشار  $P_i$  است.

بنابراین، آزمایش ۳ برای فاصله مرجع ورودی از ۲۰ متر برای دو نقطه اندازه گیری انجام می شود. با استفاده از این روش، شاخص های عملکرد سیستم کنترل به دست می آید (بارگذاری، زمان راه اندازی و خطای حالت ثابت). زمان راه اندازی ۹۰ ثانیه، خطای حالت ایستا ۳,۳۸٪ (۰,۶۸ متر) و ۳,۴۷٪ (۰,۷۰ متر) و بارگذاری آن ۱۶,۸۰٪ (۳,۳۶ متر) و ۳۳,۹۱٪ (۶,۷۸ متر) به ترتیب برای نقاط اندازه گیری شده ۱ و ۲ می باشد. شکل ۱۰ فاصله منحنی های پاسخ برای دو نقطه از فشار اندازه گیری شده را نشان می دهد.



شکل ۱۰: منحنی های پاسخ سیستم فازی در یک حلقه بسته از آزمایش ۳

### نتیجه گیری

این مقاله یک سیستم فازی برای کنترل فشار شبکه های توزیع آب ارائه می دهد. هدف این مطالعه طراحی یک کنترل کننده قوی برای هر مقادیر مرجع فشار می باشد. هیچ محدودیتی برای تعداد نقاط کنترل شده وجود ندارد. علاوه بر این، مقادیر مرجع فشار در این نقاط می تواند در طول زمان تغییر کند.

سیستم فازی یک نتیجه رضایت بخش ارائه داد؛ حداکثر خطای حالت پایدار در آزمایش ها  $3/47\%$  ( $0.70$  متر) بود. حداقل کنترل فشار سیستم، که عمدتاً توسط مشخصه فرکانس متغیر (سرعت چرخش پمپ) انجام می شود، یک پاسخ سریع ارائه می دهد. با این حال، با توجه به زمان بالای پاسخ شیر کنترل، پاسخ سیستم به طور کلی نسبتاً کند و با شدت زیاد می باشد. زمان محاسبه شده مناسب حدود  $90$  ثانیه می باشد.

با وجود این واقعیت که مصرف مشخصه فرکانس متغیر حدود  $5\%$  از کل انرژی می باشد که باعث کاهش کارایی موتور پمپ می شود، همچنین مشخص شد که کنترل سرعت چرخش به طور کلی با کاهش مصرف برق از  $35\%$ ، به  $28\%$  در مصرف ویژه برق همراه می باشد ( $kWh/m^3$ ).

با به دست آوردن نتایج حاصل از شرایط آزمایشی می توان به یک شبکه واقعی هیدرولیک با نشت و بدون کنترل فشار، تلفات حجمی را بیش از  $56\%$  کاهش داد.

عملکرد سیستم کنترل در شرایط آزمایشی رضایت بخش است. مزایای اصلی سیستم فازی عدم نیاز به مدل سازی کارخانه، سازگاری آن با شرایط عملیاتی مختلف و کاربرد آن برای سیستم های دینامیکی پیچیده است. از این رو انتظار می رود که سیستم فازی که در اینجا توسعه یافته است، به راحتی در سایر شبکه های توزیع آب مشابه نیز اجرا شود.

## منابع و مراجع

- [1] Cirre, C. M., Berenguel, M., Valenzuela, L., & Klempous, R. (2009). Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field. *European Journal of Operational Research*, 193(3), 709-717. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>
- [2] de Almeida Souza, D., de Aragao Filho, W. C. P., & Sousa, G. C. D. (2007). Adaptive Fuzzy Controller for Efficiency Optimization of Induction Motors (Vol. 54).
- [3] El-Baroudy, I., & Simonovic, S. (2011). Application of the fuzzy performance measures to the City of London water supply system (Vol. 33).
- [4] Lin, W.-M., Hong, C.-M., Ou, T.-C., & Chiu, T.-M. (2011). Hybrid intelligent control of PMSG wind generation system using pitch angle control with RBFN. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1244-1251. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.020>
- [5] Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., & Marques, A. S. (2014). Pressure-dependent Demand and Leakage Modelling with an EPANET Extension – WaterNetGen. *Procedia Engineering*, 89, 632-639. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.488>
- [6] Pimentel Gomes, H., de Tarso, S., & Srinivasan, V. (2008). An iterative optimisation procedure for the rehabilitation of water-supply pipe networks (Vol. 34).
- [7] Sinske, S., & Zietsman, H. (2004). A spatial decision support system for pipe-break susceptibility analysis of municipal water distribution systems (Vol. 30).
- [8] Sung, H. C., Park, J. B., & Joo, Y. H. (2011). Robust observer-based fuzzy control for variable speed wind power system: LMI approach. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 9(6), 1103-1110. doi:[10.1007/s12555-011-0611-7](https://doi.org/10.1007/s12555-011-0611-7)
- [9] Tabesh, M., & Hoomehr, S. (2009). Consumption management in water distribution systems by optimizing pressure reducing valves' settings using genetic algorithm. *Desalination and Water Treatment*, 2(1-3), 96-102. doi:[10.5004/dwt.2009.154](https://doi.org/10.5004/dwt.2009.154)
- [10] Yu, J., Chen, B., & Yu, H. (2010). Position tracking control of induction motors via adaptive fuzzy backstepping. *Energy Conversion and Management*, 51(11), 2345-2352. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.04.008>
- [11] Zadeh, L. A. (2008). Is there a need for fuzzy logic? *Information Sciences*, 178(13), 2751-2779. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.02.012>