

مدل سازی کمپرسور K-250 با استفاده از روش سری موازی نارکس و فازی سلسله مراتبی

عادل خسروی، عباس چترایی، غضنفر شاهقلیان و سیدمحمد کارگر دهنوی

کمپرسور در صنعت مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، سیستم‌های کمپرسور بیشتر از نظر مصرف انرژی الکتریکی و مدل‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در طراحی کنترل‌کننده برای کمپرسور، تست و آزمایش آن است که با توجه به پرخطر و هزینه‌بر بودن آزمایش در عمل، بهتر است ابتدا مدل کمپرسور تخمین زده شده در طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده مورد استفاده قرار گیرد و بعد از اطمینان از قابلیت عملکرد مطلوب کنترل‌کننده، در عمل اجرا شود که اهمیت برجسته مدل‌سازی مشخص می‌گردد [۱] و [۲].

کمپرسورها از نظر مصرف انرژی و اندازه بسیار متفاوت هستند. این سیستم‌ها از مدل کوچک با توان ۵ اسب بخار شروع شده و تا توان ۵۰۰۰۰ اسب بخار متغیر هستند. بعضی از کمپرسورهای بزرگ برای ساخت هوای فشرده به چندین کیلووات توان نیاز دارند. برای کمپرسورهای کوچک یک موتور الکتریکی با توان بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلووات مورد نیاز است [۳] و [۴]. یکی از روش‌های مؤثر در کاهش توان مصرفی کمپرسورهای بزرگ صنعتی و متوسط، استفاده از فرایند فشرده‌سازی چندمرحله‌ای با خنک‌کن میانی است به صورتی که گاز پس از فشرده‌شدن در هر کمپرسور در یک خنک‌کننده سرد شده و سپس به کمپرسور بعدی وارد می‌شود [۵] و [۶]. در [۷] با در نظر گرفتن هوا به عنوان گاز کامل و همچنین ثابت در نظر گرفتن توان حرارتی خنک‌کننده میانی، یک روش بهینه‌سازی برای کمپرسور صنعتی با استفاده از روش لاگرانژ ارائه شده است. در [۸] با استفاده از فرض گاز ایده‌آل برای هوای خشک، نشان داده شده که توان مصرفی کمپرسورها با افزایش دمای ورودی کمپرسور به صورت خطی افزایش می‌یابد.

عموماً در کاربردهای مهندسی و غیر مهندسی، شناسایی سیستم به معنی یافتن یک مدل ریاضی در قالب دستگاهی از معادلات دیفرانسیل با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی سیستم است که در یک آزمایش عملی به دست آمده است [۹] و [۱۰]. به عبارت دیگر در این گونه از مسایل هدف از شناسایی، تقریب رفتار حاکم بر سیستم به صورت تخمین یک عبارت ریاضی در قالب تابع تبدیل، معادلات دیفرانسیل (معادلات تفاضلی برای سیستم‌های گسسته)، پاسخ ضربه و نمایش فضای حالت است [۱۱] و [۱۲]. روش‌های شناسایی سیستم به طور کلی به سه دسته جعبه سفید، جعبه خاکستری و جعبه سیاه تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۳]. یکی از روش‌های متداول در شناسایی سیستم‌های مختلف، روش حداقل مربعات (LS) است که در آن پارامترهای مجهول مدل به گونه‌ای تخمین زده می‌شوند که یک تابع هزینه شامل مجموع مربعات خطا

چکیده: با توجه به افزایش روزافزون کاربرد کمپرسورها در صنعت، تعیین یک مدل ریاضی برای کمپرسور جهت طراحی سیستم کنترلی، تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی کامپیوتری آن بسیار مهم است. همچنین در سال‌های اخیر مدل‌سازی‌های هوشمند نظیر شبکه عصبی و فازی به علت عملکرد واقع‌بینانه‌تر این مدل‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته و از انواع آن برای مدل‌سازی استفاده شده است. روش‌های هوشمند دارای قابلیت بالایی برای برقراری ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی است. در این مقاله، مدل‌سازی کمپرسور K-250 شرکت ذوب‌آهن اصفهان بر اساس مدل‌های هوشمند شبکه عصبی فازی رگرسیون خودکار غیر خطی با ورودی خارجی (نارکس) و شبکه فازی سلسله‌مراتبی ارائه شده است. جهت مدل‌سازی، سیستم مورد آزمایش قرار گرفته است و داده‌های ورودی و خروجی کمپرسور با استفاده از سنسورهای موجود در کمپرسور و پردازش تصویر برای تبدیل کردن داده‌ها به داده مورد نیاز در مدل‌سازی استفاده می‌شوند. سپس الگوریتم‌های نارکس و فازی سلسله‌مراتبی مدل کمپرسور با استفاده از نرم‌افزار Matlab تعیین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده از مدل‌سازی، برازش بهتری برای نارکس نسبت به فازی سلسله‌مراتبی را نشان می‌دهد. از بین دو مدل ارائه‌شده در این مقاله مدل نارکس در بردار رگرسیون و خطای گوسی، پاسخ بهتری نسبت به شبکه فازی سلسله‌مراتبی ارائه می‌کند.

کلیدواژه: شناسایی سیستم، کمپرسور، فازی سلسله‌مراتبی، نارکس، مدل‌سازی.

۱- مقدمه

سیستم‌های فشرده‌سازی هوا (کمپرسور) ماشینی است که برای افزایش فشار انواع گازها استفاده می‌شود که این افزایش فشار می‌تواند به دلایل مختلفی صورت گیرد، مانند افزایش فشار در خطوط لوله انتقال گاز که فشرده‌سازی به منظور غلبه بر تلفات فشاری که به علت انبساط گاز، اصطکاک مسیر، تغییر در ارتفاع یا تغییر در دما و همچنین تغییر در میزان فلو بین نقاط تولید و مصرف گاز اتفاق می‌افتد. در سال‌های اخیر کاربرد

این مقاله در تاریخ ۲۶ تیر ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۶ فروردین ماه ۱۳۹۹ بازنگری شد.

عادل خسروی، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. (email: khosravi_adel@yahoo.com).

عباس چترایی، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. (email: abbas.chatraei@gmail.com).

غضنفر شاهقلیان، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. (email: shahgholian@iaun.ac.ir).

سیدمحمد کارگر، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. (email: kargar@pel.iaun.ac.ir).

نشان‌دهنده خطای حدود ۳/۵ درصد بین مدل نارکس ارائه شده و واقعیت سیستم است که با توجه به مقدار خطای کم نشان از مدل‌سازی دقیق نارکس خواهد بود.

همان‌طور که بیان شد در پژوهش‌های ذکر شده، نویسندگان مدل مورگریتر و مدل‌های ریاضی را مورد استفاده قرار داده و کمتر از مدل‌های غیر خطی جعبه سیاه استفاده شده است. با توجه به این که با گذشت زمان، سیستم نامعینی‌هایی از خود را در شرایط مختلف محیطی، زمانی و فرکانسی نشان می‌دهند، مدل‌های ریاضی ممکن است دچار خطای تخمین فاحش شوند. این در حالی است که مدل‌های جعبه سیاه ساختار سیستم را در همان لحظه تخمین زده و مدل را ارائه می‌کنند. در مورد خاص کمپرسور، نامعینی‌های زیادی همچون تغییر درجه آزادی پروانه‌ها بر اثر گذشت زمان، مستهلک شدن آب‌بندی‌های قسمت‌های مختلف، تغییر دمای محیط در فصل‌های مختلف سال برای قسمت‌های گوناگون کمپرسور و ... در عمل وجود دارد که لزوم یافتن یک مدل جعبه سیاه غیر خطی همه‌جانبه نسبت به مدل‌های موجود را نشان می‌دهد که در بین مدل‌های جعبه سیاه مدل نارکس بیشترین پوشش مدل‌سازی برای سیستم‌های غیر خطی را دارد و مدل فازی سلسله‌مراتبی یکی از روش‌های مورد استفاده برای کاهش پیچیدگی در مدل‌سازی است [۱۹] و [۲۰].

در این مقاله یک کمپرسور گریز از مرکز سه‌مرحله‌ای دارای دو خنک‌کننده میانی و یک خنک‌کننده انتهایی بررسی شده است. این کمپرسور یکی از کمپرسورهای اصلی در کارخانه ذوب‌آهن اصفهان تحت عنوان کمپرسور K-۲۵۰ است (شکل ۱). از یک روش شناسایی جعبه سیاه با استفاده از ساختار نارکس سری-موازی که شامل یک لایه ورودی از مقادیر حقیقی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی است برای مدل‌سازی کمپرسور K-۲۵۰ استفاده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده که درصد برازش، بردارهای رگرسیون و خطای گوسی است، نشان از تخمین نسبتاً دقیقی از مدل به دست آمده است.

ساختار مقاله بدین ترتیب است: در بخش دوم ساختار و عملکرد کمپرسور به طور مختصر بیان شده است. در بخش سوم مدل‌سازی به داده‌برداری و مدل‌سازی نارکس تقسیم می‌شود که از شبکه نارکس سری-موازی و فازی سلسله‌مراتبی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود که برای مدل‌سازی از دبی ورودی هوا به عنوان متغیر ورودی و از فشار خروجی به عنوان متغیر خروجی استفاده شده است. در بخش چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی بحث و بررسی می‌شود و نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- کمپرسور گریز از مرکز

کمپرسور یک تکنولوژی کلیدی در صنعت سیستم‌های انتقال گاز است. کمپرسور به طور خاص انرژی ترمودینامیکی گاز را از طریق افزایش فشار، با استفاده از انرژی مکانیکی تحویل شده توسط توربین‌های بخاری یا موتورهای الکتریکی متصل به محور کمپرسور افزایش می‌دهد. کمپرسورها به دو دسته دینامیکی و جابه‌جایی مثبت تقسیم می‌شوند. همچنین مدل کمپرسورهای دینامیکی به دو دسته گریز از مرکز و محوری دسته‌بندی می‌شوند. مطالعه این پژوهش بر روی کمپرسورهای هوا مدل K-۲۵۰ که از نوع دینامیکی گریز از مرکز بوده انجام شده است. کمپرسورهای هوا مدل K-۲۵۰ در شرکت سهامی ذوب‌آهن اصفهان برای فشرده‌سازی هوا استفاده می‌گردد. کمپرسور K-۲۵۰ از انواع کمپرسورهای سه‌مرحله‌ای است که در شکل ۲ نمایی از آن آمده که در



(الف)

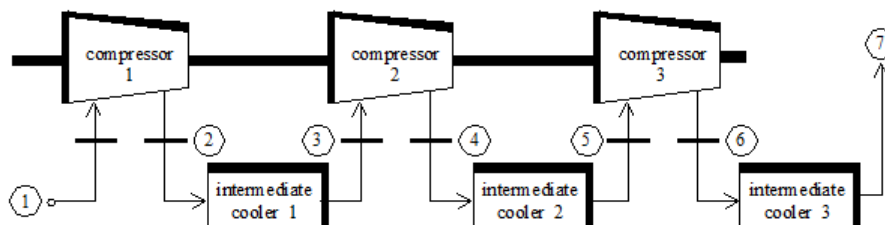


(ب)

شکل ۱: تصویر کمپرسور کارخانه ذوب‌آهن، (الف) نمای روبه‌روی کمپرسور و (ب) نمای کناری کمپرسور.

مینیمم می‌گردد [۱۴]. در سال‌های اخیر، استفاده از روش هوش مصنوعی در شناسایی جعبه سیاه بسیار پیشنهاد شده است. این پیشنهاد منجر به ارائه راهکارهای متعددی شد که در آن از روش‌های مختلفی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه‌های عصبی فازی، موجک و ... استفاده شده است [۱۵] و [۱۶]. مدل‌های شناسایی جعبه سیاه غیر خطی شامل پاسخ غیر خطی تحریک محدود^۱ (NFIR)، رگرسیون خودکار غیر خطی^۲ (NAR)، رگرسیون خودکار غیر خطی حرکت متوسط با ورودی خارجی^۳ (NARX)، رگرسیون خودکار غیر خطی^۴ (NARMAX) و خطای خروجی غیر خطی^۵ (NOE) است. در [۱۷] به تعریف و تفسیر مدل‌سازی فازی پرداخته شده و در ادامه ساختار فازی سلسله‌مراتبی توضیح داده شده است که این نوع مدل‌سازی با کاهش تعداد قوانین فازی توانایی کاهش پیچیدگی سیستم را نشان می‌دهد. ساختار به بخش‌های متفاوت تقسیم‌بندی کرد در غیر این صورت قوانین ساختار فازی سلسله‌مراتبی با قوانین فازی یکسان خواهد بود و این روش در کم‌شدن قوانین تأثیرگذار نخواهد بود. در [۱۸] به مدل‌سازی یک توربین گازی با استفاده از مدل نارکس به عنوان یک مدل جعبه سیاه اشاره شده است و از مدل‌سازی نارکس به دلیل در دست نداشتن اطلاعات داخلی از توربین استفاده می‌شود که نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی

1. Nonlinear Finite Impulse Response
2. Nonlinear Auto Regressive
3. Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input
4. Nonlinear Auto Regressive Moving Average with Exogenous Input
5. Nonlinear Output Error



شکل ۲: یک سیکل کمپرسور سه‌مرحله‌ای.

که کمپرسور از سیستم فشرده‌سازی کلی کارخانه خارج شده است، انجام می‌گیرد. این کمپرسور دارای سنسورهای ورودی و خروجی مکانیکی برای اندازه‌گیری دبی هوای ورودی و فشار هوای خروجی است. بر این اساس داده برداری به دو مرحله تقسیم می‌شود: مرحله اول شامل داده برداری عقربه مکانیکی با استفاده از سنسورها و عقربه‌های کمپرسور است و قسمت دوم تبدیل داده‌های استخراج‌شده توسط نرم‌افزارها و برنامه پردازش تصویر به دیجیتال است. در این مدل‌سازی سیستم به صورت تک‌ورودی-تک‌خروجی در نظر گرفته شده است. کمپرسور ۲۵۰-K دارای دو سنسور دبی ورودی و خروجی ساخت کشور روسیه است که کمیت اندازه‌گیری شده توسط یک عقربه مکانیکی نشان داده شده در شکل ۳ نمایش داده می‌شود.

در مرحله دیجیتال‌سازی، تصویر عقربه‌ها به وسیله دوربین‌های فیلمبرداری که به صورت کالیبره و صاف روبه‌روی عقربه‌های دبی ورودی و فشار خروجی قرار گرفته‌اند، ثبت شده و تغییرات عقربه‌ها مشخص می‌گردد. پس از آن با استفاده از یک الگوریتم پردازش تصویر (شکل ۴) که در هر ثانیه ۳۰ فریم از تصویر را استخراج می‌کند طی شش مرحله، فرایند تبدیل دیتای مکانیکی به دیجیتال انجام می‌گردد. همان گونه که در روندنا دیده می‌شود در مرحله ششم مختصات نوک عقربه تبدیل به زاویه شده و نسبت به زاویه موجود با استفاده از (۱) مقدار محدوده عددی دیجیتال به دست می‌آید

$$A = k(\theta_c - \theta_e) \quad (1)$$

که در آن A مقدار کمیت اندازه‌گیری شده دیجیتال و k یک ضریب تبدیل با مقدار عددی ۰.۱۰۶۱۵ است که با استفاده از فرایند برازش منحنی مقدار شیب خط به دست آمده است. همچنین θ زاویه نقطه صفر عقربه و θ_c زاویه فعلی عقربه است. شکل‌های ۵ و ۶ نحوه به دست آوردن داده‌های دیجیتال از عقربه‌های مکانیکی را نمایش می‌دهد که نشان از دقت نتایج به دست آمده است.

۳-۲ مدل‌سازی نارکس

یکی از روش‌های شناسایی سیستم استفاده از شبکه‌های عصبی است [۲۱] و [۲۲] و شبکه پرسپترون چندلایه MLP جزء شبکه‌های عصبی ایستا به حساب می‌آید. در این نوع از شبکه‌ها المان‌های فیدبک و تأخیر زمانی وجود ندارد و خروجی‌ها به طور مستقیم از روی ورودی‌ها و با اتصالات پیشخور به دست می‌آیند. این نوع از شبکه‌ها در مدل‌سازی سری‌های زمانی پیچیده که تحت تأثیر متغیرهای محرک ورودی هستند، کارایی لازم را ندارند و نیاز است تا از شبکه‌های عصبی دیگری استفاده شود. در مقابل در شبکه‌های عصبی پویا، خروجی شبکه نه تنها وابسته به ورودی حال است بلکه وابسته به ورودی یا خروجی شبکه در حال و گذشته نیز است. این شبکه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: شبکه‌هایی که فقط اتصالات پیشخور دارند و شبکه‌هایی که دارای فیدبک هستند. شبکه عصبی نارکس جزء شبکه‌های پویای فیدبک‌دار است که ورودی‌های



(الف)



(ب)

شکل ۳: سنسور دبی ورودی و خروجی، (الف) عقربه خروجی فشار خروجی و (ب) عقربه خروجی دبی ورودی.

آن هوا در نقطه ۱ با فشار P_1 که همان فشار جو است وارد سیستم می‌شود. سپس هوا پس از فشرده‌شدن در کمپرسور اول در نقطه ۲ با فشار P_2 خارج می‌شود. پس از آن دمای هوای فشرده‌شده در خنک‌کننده میانی اول کاهش یافته و در نقطه ۳ با فشار P_3 وارد کمپرسور دوم می‌گردد. سپس با فشرده‌سازی، هوا در نقطه ۴ با فشار P_4 خارج می‌شود. در خنک‌کننده میانی دوم نیز دمای هوا کاهش می‌یابد و در نقطه ۵ با فشار P_5 وارد مرحله آخر فشرده‌سازی شده و نهایتاً در نقطه ۶ با فشار P_6 خارج می‌گردد. فشار خارج‌شده در سردکننده آخر وارد شده و در نهایت با فشار P_7 در نقطه ۷ از کمپرسور خارج می‌شود.

۳- مدل‌سازی

شناسایی سیستم به معنای به دست آوردن یک مدل ریاضی برای ارتباط بین ورودی و خروجی یک سیستم با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی به دست آمده از یک آزمایش واقعی و عملی روی سیستم است. بر این اساس مدل‌سازی کمپرسور ۲۵۰-K در این مقاله به سه مرحله داده برداری، مدل‌سازی نارکس و مدل‌سازی فازی سلسله‌مراتبی تقسیم می‌شود که در ادامه به مراحل مختلف اشاره شده است.

۳-۱ داده برداری

کمپرسور مورد مطالعه یکی از کمپرسورهای حیاتی و در حال کار کارخانه ذوب‌آهن اصفهان است و لذا داده برداری به صورت ایمن و زمانی

ساختار از یک لایه ورودی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده که به طور کلی ۱۱ نورون در لایه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته و برای تنظیم وزن لایه‌های مختلف شبکه از الگوریتم لونیگ مارکوات استفاده شده است. الگوریتم لونیگ مارکوات به دلیل همگرایی سریع‌تر در آموزش شبکه‌های با اندازه متوسط، برای استفاده در این پژوهش انتخاب شده است. در این الگوریتم وزن‌ها به صورت زیر به روز رسانی می‌شود

$$\Delta W = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e \quad (3)$$

که J ماتریس ژاکوبین از مشتقات هر خطا با توجه به هر وزن و همچنین μ یک عدد، e خطای بردار و I ماتریس تشخیص است. معمولاً پارامترهای شبکه نارکس شامل تأخیر ورودی و خروجی، تعداد لایه‌ها و نورون‌ها در هر لایه و وزن لایه‌های مختلف هستند که این پارامترها بعضاً از طریق فرایند سعی و خطا و الگوریتم‌های شناسایی سیستم به دست می‌آیند.

۳-۳ مدل‌سازی فازی سلسله‌مراتبی

یکی از روش‌های پرکاربرد دیگر در حوزه شناسایی سیستم شبکه‌های فازی است [۲۵] و [۲۶]. برای مدل‌سازی فازی در این مقاله از مدل فازی سلسله‌مراتبی استفاده شده است. برای رفع مشکل تعداد قوانین و پارامترهای فازی در روش سلسله‌مراتبی ابتدا مدل‌های فازی با تعداد متغیرهای مقدم کمتر ایجاد می‌شود (مدل جزئی) و با ترکیب این مدل‌ها مدل کلی که تمام متغیرها را در بر دارد ایجاد می‌شود. در شکل ۸ ساختار فازی سلسله‌مراتبی استفاده شده در این مقاله نشان داده شده است.

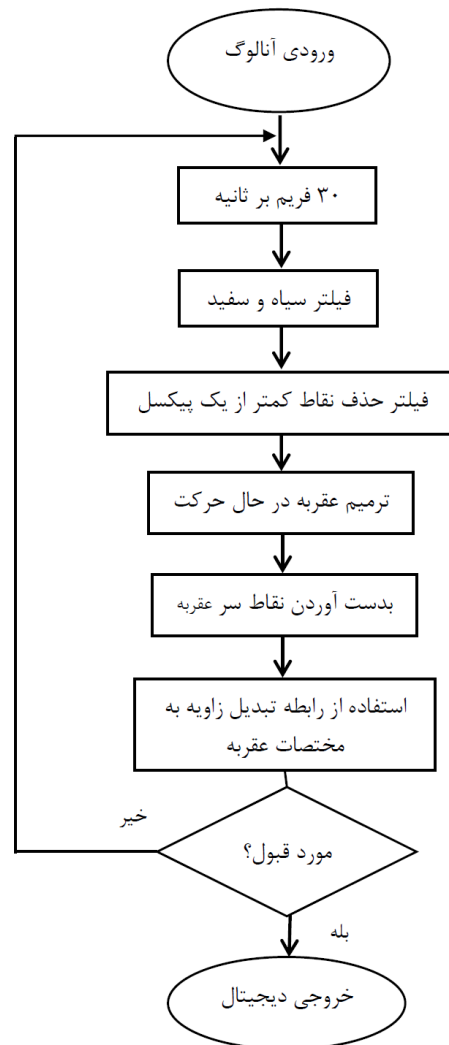
برای ساختار نشان داده شده به ازای هر متغیر بخش مقدم دارای یک مجموعه فازی است که تعداد کل قوانین برابر ۹ قانون است. تعداد توابع عضویت ورودی و نحوه ارتباط آنها در ایجاد قوانین، با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی میانگین c فازی به دست آمده است. توابع عضویت ورودی طبق (۴) به صورت تابع گوسی است

$$f(x) = \exp \frac{-0.5(x+c)^2}{\sigma^2} \quad (4)$$

که در آن c مرکز تابع گوسی و σ پهنای باند گوسی است. قوانین فازی در ساختار طبق قوانین If-Then در سیستم‌های فازی تاکاگی سوگو است که توابع عضویت برای ورودی و خروجی به صورت شکل ۹ است.

۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

در این قسمت ساختار شبکه نارکس پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۱۰ داده‌های ورودی و خروجی سیستم قابل مشاهده است. با توجه به بخش پردازش تصویر تعداد داده‌های ورودی و خروجی ۵۱۰۰ است که داده‌ها به سه بخش آموزش، ارزیابی و تست تقسیم شده‌اند، به طوری که از ۷۰ درصد داده‌های اولیه که برابر ۳۵۷۰ نمونه است مربوط به آموزش و ۱۵ درصد که برابر ۷۶۵ نمونه از داده‌های میانی است مربوط به ارزیابی و ۱۵ درصد پایانی که برابر با ۷۶۵ نمونه است مربوط به بخش تست برای ساختار پیشنهادی نارکس در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۱ خروجی مدل نارکس و خروجی واقعی کمپرسور به ترتیب با خط و خطچین نشان داده شده است. تطابق مدل پیشنهادی نسبت به مدل واقعی ۸۳/۹ درصد است که نشان از دقیق بودن مدل پیشنهادی است. این برازش بر اساس مجموعه داده‌های موجود در بخش ارزیابی (۱۵ درصد کل داده‌ها) محاسبه شده است.



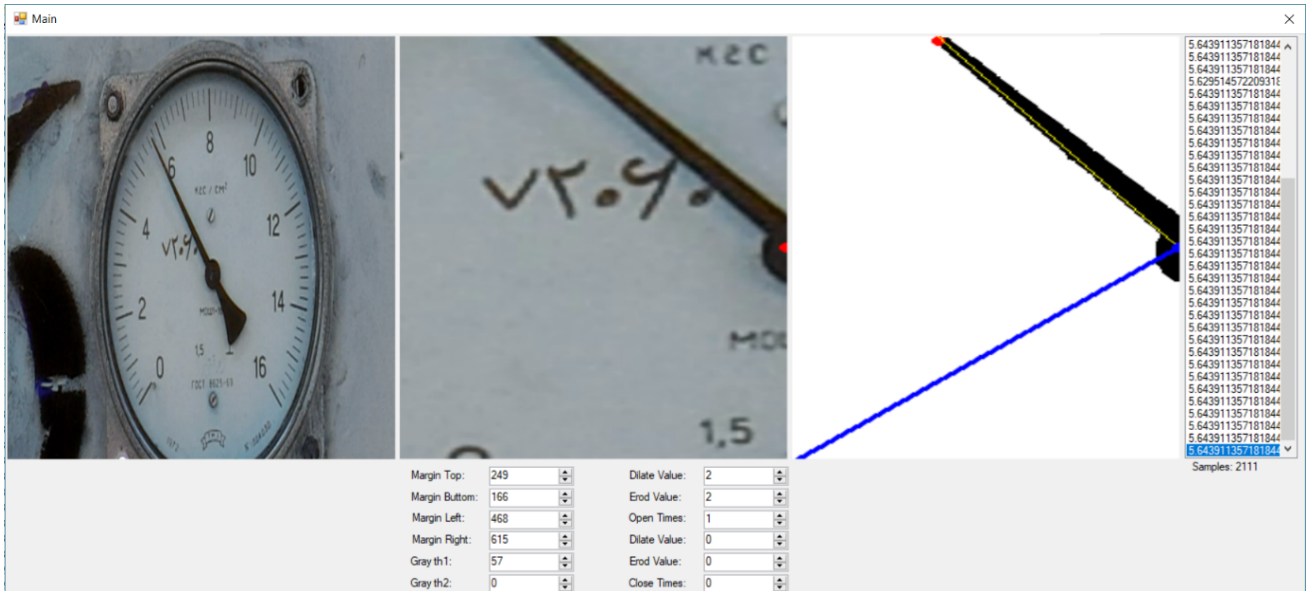
شکل ۴: روندنمای پردازش تصویر.

خارجی نیز در آن بر روی خروجی‌ها اثر می‌گذارد. در این مقاله برای مدل‌سازی کمپرسور از روش نارکس استفاده شده است. شبکه نارکس، سیستم غیر خطی گسسته را با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی تأخیردار مدل‌سازی می‌کند [۲۳] و [۲۴]. شناسایی سیستم کمپرسور طبق (۲) در ساختار نارکس انجام می‌گردد

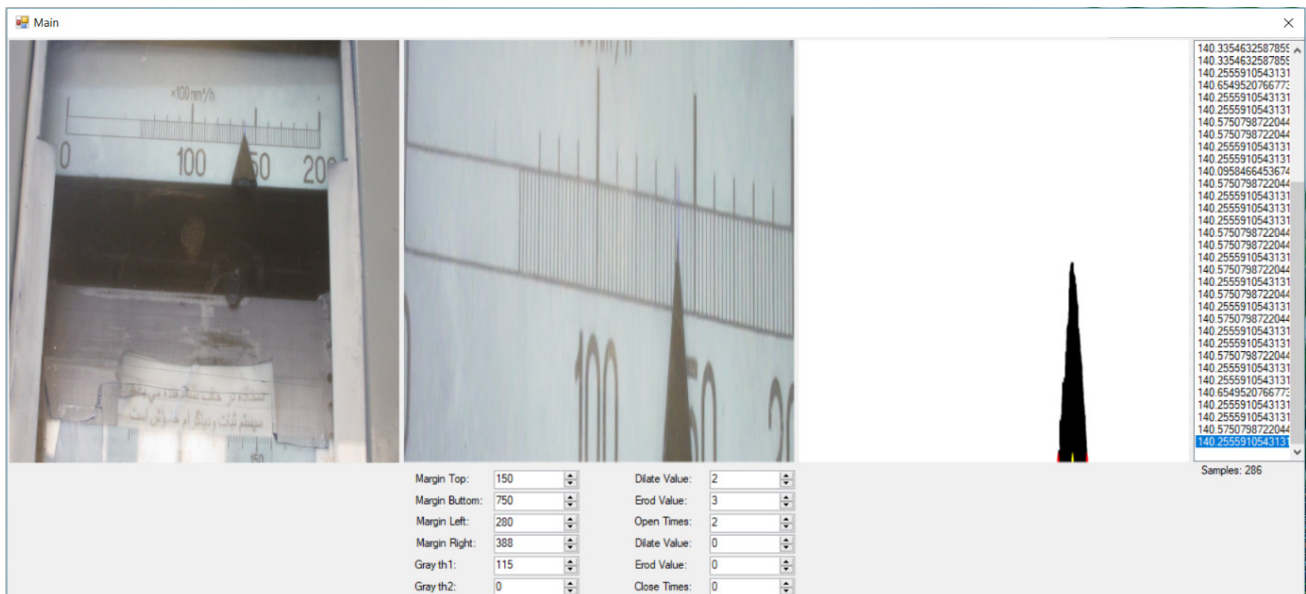
$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-d_y)), \quad (2)$$

$$X(t-1), X(t-2), \dots, X(t-d_x))$$

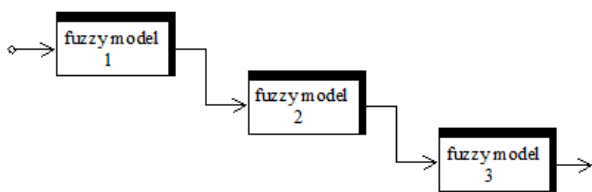
که در آن x و y به ترتیب نشان‌دهنده بردارهای ورودی و خروجی سیستم هستند. همچنین d_x و d_y به ترتیب نشانگر میزان تأخیر زمانی شبکه در ورودی و خروجی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خروجی‌ها علاوه بر این که به ورودی وابسته‌اند به خود خروجی‌ها در گام‌های زمانی قبل‌تر نیز وابسته‌اند. می‌توان گفت که شبکه‌های نارکس همان شبکه‌های پرسپترون هستند که دارای قابلیت تأخیر زمانی برای ورودی‌های خارجی و همچنین ایجاد فیدبک از خروجی‌ها به ورودی‌ها هستند. در فرایند شناسایی با استفاده از مدل نارکس، ساختار سری-موازی معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد که دارای مزایای مختلفی است. مزیت اول این است که در این شبکه عصبی سیگنال فیدبک دقیق‌تری ساخته می‌شود و بدین ترتیب میزان دقت فرایند شناسایی بهبود می‌یابد. تبدیل شدن ساختار به راحتی به ساختار موازی مزیت دوم است. این ساختار کلی شبکه نارکس در شکل ۷ نشان داده شده است. این



شکل ۵: نحوه به دست آوردن داده دیجیتال از عقربه فشار.



شکل ۶: نحوه به دست آوردن داده دیجیتال از عقربه دبی ورودی.

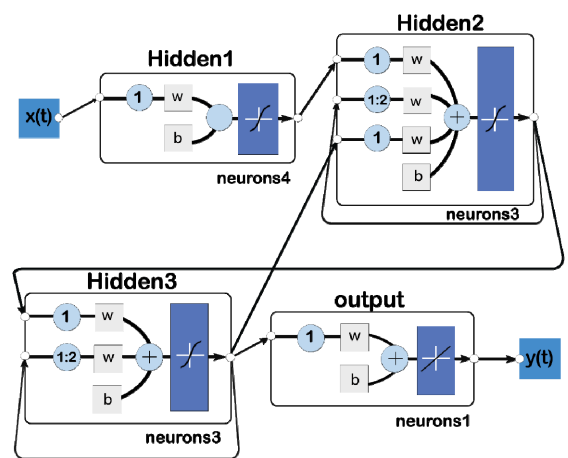


شکل ۸: ساختار پیشنهادی شبکه ANFIS.

نارکس پیشنهادی و دادهای واقعی نزدیکی بسیار زیادی وجود دارد (شکل ۱۲).

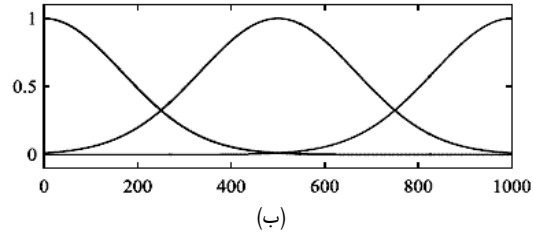
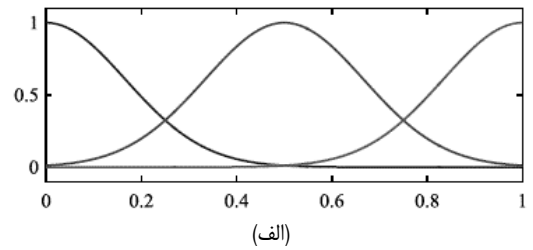
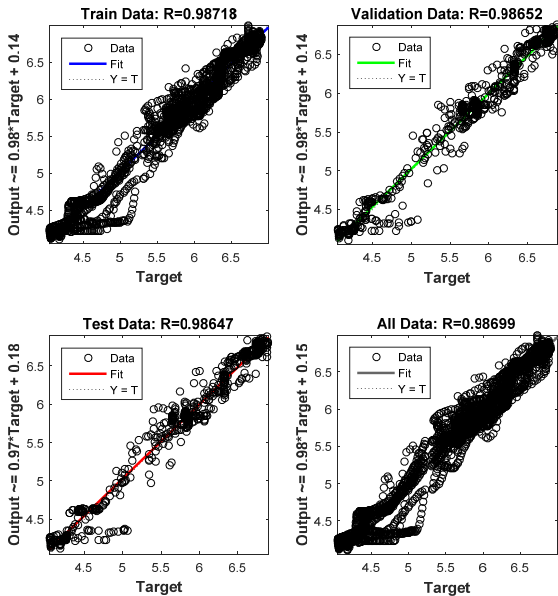
در شکل ۱۳ تابع خطای گوسی ساختار پیشنهادی آمده که با توجه به نتایج به دست آمده خطا روی محدوده صفر قرار دارد که با توجه به این که در عمل توزیعهای نرمال با میانگین صفر نخواهند شد در نتیجه مقدار 0.1051 که نزدیک به صفر است دقت نسبتاً خوب و مورد قبول مدل نارکس را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ خروجی حاصل از ساختار پیشنهادی فازی سلسله‌مراتبی را با خط و خروجی واقعی کمپرسور با خطچین نشان می‌دهند که میزان برازش این مدل فازی سلسله‌مراتبی برابر با 69.925



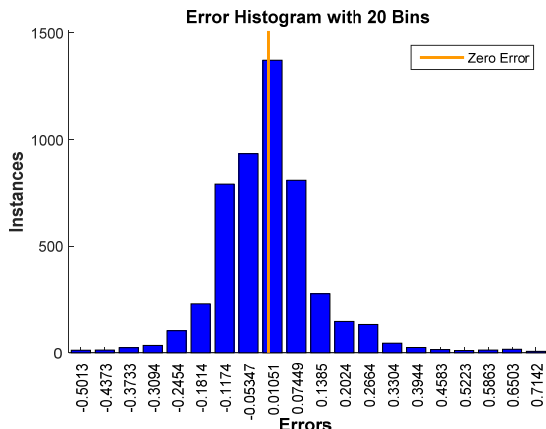
شکل ۷: ساختار پیشنهادی شبکه نارکس سری-موازی سیستم.

اکنون با استفاده از نتایج مختلف، درستی و دقت ساختار پیشنهاد شده بررسی می‌شود. در ابتدا با بررسی بردارهای رگرسیون برای هر یک از حالت‌های آموزش، ارزیابی و تست مشخص می‌شود که بین ساختار

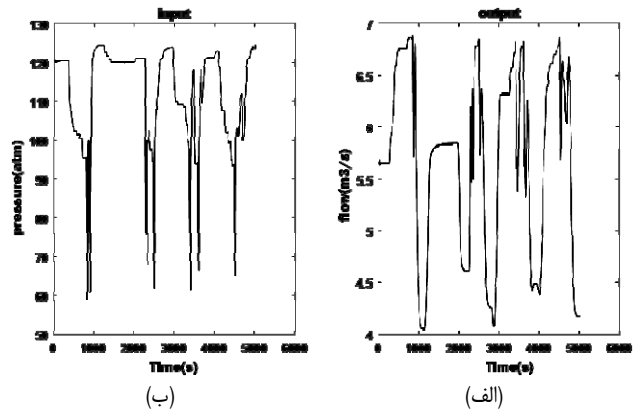


شکل ۹: تابع عضویت‌های ورودی و خروجی فازی سلسله‌مراتبی، (الف) تابع عضویت ورودی و (ب) تابع عضویت خروجی.

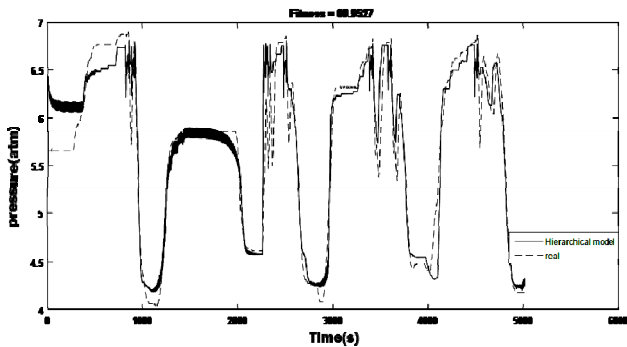
شکل ۱۲: بردارهای رگرسیون برای هر یک از حالت‌های آموزش، ارزیابی و تست ساختار پیشنهادی نارکس.



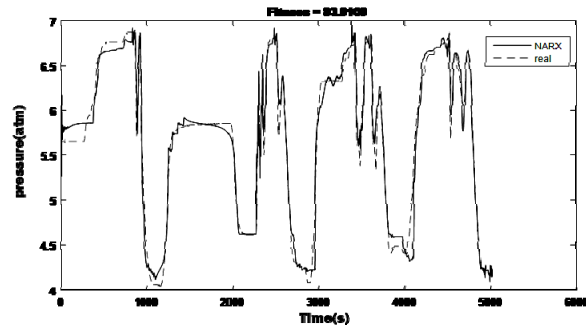
شکل ۱۳: خطای گوسی ساختار پیشنهادی نارکس.



شکل ۱۰: (الف) داده‌های خروجی و (ب) داده‌های ورودی.



شکل ۱۴: خروجی سیستم و خروجی ساختار پیشنهادشده فازی سلسله‌مراتبی.

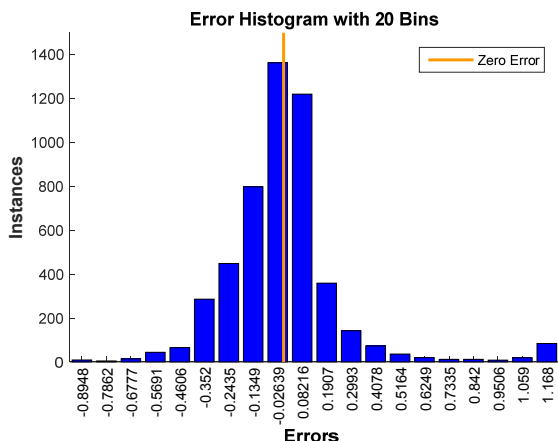


شکل ۱۱: خروجی سیستم و خروجی ساختار پیشنهادشده نارکس.

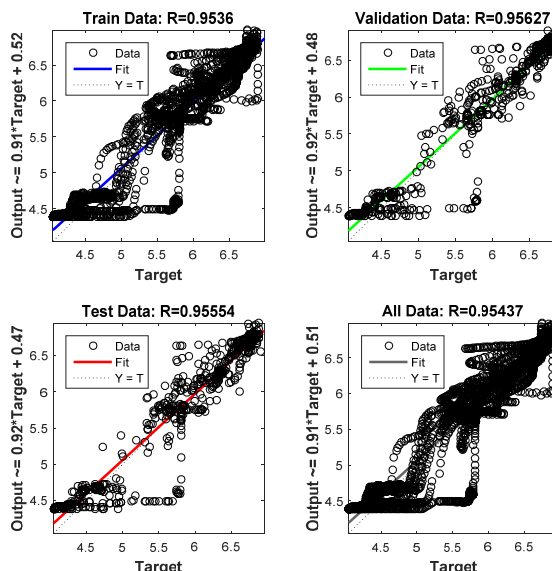
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله شناسایی یک کمپرسور گریز از مرکز متعلق به شرکت ذوب‌آهن اصفهان در قالب یافتن یک مدل نارکس و فازی سلسله‌مراتبی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بر این اساس و با توجه به مکانیکی بودن سیستم اندازه‌گیری ورودی و خروجی، یک الگوریتم پردازش تصویر جهت تبدیل داده‌های مکانیکی به دیجیتال ارائه شده است. در ادامه ساختار جدیدی از NARX-سری-موازی برای شناسایی کمپرسور بیان شد. نتایج این شناسایی نشان می‌دهد که با توجه به برآزش

درصد است. در شکل ۱۶ تابع خطای گوسی ساختار پیشنهادی فازی آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده خطا روی محدوده صفر قرار دارد که دقت نسبتاً خوب و مورد قبول مدل فازی سلسله‌مراتبی را نشان می‌دهد. همان گونه که در جدول ۱ آمده درصد برآزش برای مدل نارکس ۸۳/۹۱۰۹ درصد و فازی سلسله‌مراتبی ۶۹/۹۵۲ درصد است که نشان از بهبود بودن الگوریتم پیشنهادی نارکس نسبت به فازی سلسله‌مراتبی است. همچنین خطاهای رگرسیون و گوسی برای نارکس کمتر از فازی سلسله‌مراتبی است که در مجموع نشان از برتری روش نارکس نسبت به فازی سلسله‌مراتبی را دارد. با توجه به این که مدل فازی سلسله‌مراتبی باعث کاهش معادلات خواهد شد ولی به دلیل پیچیدگی فراوانی که در کمپرسور وجود دارد نتوانسته به خوبی مدل کمپرسور را تخمین بزند و با توجه به نتایج به دست آمده مدل فازی سلسله‌مراتبی نمی‌تواند مدل خوبی برای سیستم‌های پیچیده باشد.



شکل ۱۶: خطای گوسی ساختار پیشنهادی فازی سلسله‌مراتبی.



شکل ۱۵: بردارهای رگرسیون برای هر یک از حالت‌های آموزش، ارزیابی و تست ساختار پیشنهادی فازی سلسله‌مراتبی.

جدول ۱: مقایسه روش‌های مختلف شبیه‌سازی.

روش	پارامتر	درصد برازش	خطای رگرسیون آموزش	خطای رگرسیون ارزیابی	خطای رگرسیون تست	خطای رگرسیون کلی	خطای گوسی
نارکس		۸۳٫۹۱۰۹	۰٫۹۸۷۱۸	۰٫۹۸۶۵۲	۰٫۹۸۶۴۷	۰٫۹۸۶۹۹	۰٫۱۰۵۱
فازی سلسله‌مراتبی		۶۹٫۹۵۲	۰٫۹۵۳۶	۰٫۹۵۶۲۷	۰٫۹۵۵۵۴	۰٫۹۵۴۳۷	-۰٫۰۲۶۹۳

[7] J. D. Lewins, "Optimizing an intercooled compressor for an ideal gas model," *International J. of Mechanical Engineering Education*, vol. 31, no. 1, pp. 190-200, Jul. 2003.

[8] ا. آقادی و غ. شاهقلیان، "شناسایی حلقه بسته سیستم احتراق با استفاده از سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی بازگشتی و شبکه با ورودی‌های برون‌زا،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، سال ۱۷، شماره ۳، صص. ۲۱۲-۲۰۵، پاییز ۱۳۹۷.

[9] T. K. Ibrahim, M. M. Rahman, and A. N. A. Alla, "Study on the effective parameter of gas turbine model with intercooled compression process," *International J. of Scientific Research and Essays*, vol. 23, no. 1, pp. 3760-3770, Dec. 2010.

[10] ل. خلیل‌زاده گنجعلی‌خانی، ف. شیخ‌الاسلام و ه. مهدوی‌نسب، "شناسایی سیستم غیر خطی چندمتغیره مولد بخار نیروگاه با به کار بردن شبکه‌های عصبی تأخیر زمانی ویولت،" *نشریه روش‌های هوشمند در صنعت برق*، سال ۳، شماره ۱۲، صص. ۶۷-۷۳ زمستان ۱۳۹۱.

[11] G. Shahgholian and P. Shafaghi, "State space modeling and eigenvalue analysis of the permanent magnet DC motor drive system," in *Proc. of the IEEE/ICECT*, vol. 1, pp. 63-67, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2010.

[12] G. Shahgholian, P. Shafaghi, M. Zinali, and S. Moalem, "State space analysis and control design of two-mass resonant system," in *Proc. of the IEEE/ICCEE*, vol. 1, pp. 668-672, Dubai, Dec. 2009.

[13] M. Rampazzo, D. Tognin, M. Pagan, L. Carniello, and A. Beghi, "Modelling simulation and real-time control of a laboratory tid generation system," *Control Engineering*, vol. 83, no. 1, pp. 165-175, Feb. 2019.

[14] K. Ludtke, "Aerodynamic tests on centrifugal process compressors the influence of the vaneless diffuser shape," *J. of Engineering for Power*, vol. 105, no. 4, pp. 902-909, Oct. 1983.

[۱۵] س. م. ج. آل‌هاشرو و م. تشنه‌لب، "پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی راف با یادگیری احتمالاتی جهت شناسایی سیستم‌های غیر خطی،" *مجله کنترل*، سال ۶ شماره ۱، صص. ۴۱-۵۰، بهار ۱۳۹۱.

[۱۶] ح. مرادی چشمه‌بیگی و ا. نوری، "کاهش ریبیل گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس با بهره‌گیری از منطق فازی جهت کنترل دینامیکی پارامترهای تابع

با مقدار ۸۳٫۹ درصد، مقدار خطای تخمین کمی وجود دارد. همچنین فرایند شناسایی سیستم با مدل فازی سلسله‌مراتبی انجام شده که مقدار برازش ۶۹٫۹۵۲ درصد به دست آمد که با توجه به ساختار نارکس دقت پایین‌تری دارد.

۶- سپاسگزاری

از داوران محترم مقاله که با ارائه نظرات خود در بهبود کیفیت مقاله کمک کردند و از زحمات کارکنان نشریه تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از کارشناسان کارگاه اکسیژن ذوب‌آهن قسمت کمپرسورخانه که در جمع‌آوری داده‌های عملی کمک نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

[1] G. Torrisi, S. Grammatico, A. Cortinovis, M. Mercangoz, M. Morari, and R. S. Smith, "Model predictive approaches for active surge control in centrifugal compressors," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 6, pp. 1947-1960, Nov. 2017.

[2] F. Willems and B. Jager, "Modeling and control of compressor flow instabilities," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 8-18, Oct. 1999.

[3] N. Fujisawa, T. Inui, and Y. Ota, "Evolution process of diffuser stall in a centrifugal compressor with vanned diffuser," *J. of Turbomachinery*, vol. 141, no. 4, pp. 1-10, Apr. 2019.

[4] T. Nehler, "Linking energy efficiency measures in industrial compressed air systems with non-energy benefits - a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 72-87, Jun. 2018.

[5] K. Srinivasan, "Identification of optimum inter-stage pressure for two-stage transcritical carbon dioxide refrigeration cycles," *the J. of Supercritical Fluids*, vol. 58, no. 1, pp. 26-30, Aug. 2011.

[6] G. Wang and X. Zhang, "Thermoeconomic optimization and comparison of the simple single-stage transcritical carbon dioxide vapor compression cycle with different subcooling methods for district heating and cooling," *Energy Conversion and Management*, vol. 185, no. 1, pp. 740-757, Apr. 2019.

عادل خسروی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق گرایش کنترل به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد به پایان رسانده و هم‌اکنون دانشجوی دکتری برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: فازی، شبکه عصبی، کمپرسور، مدل‌سازی و ربات‌های متحرک همکار.

عباس چترایی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۱ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد و در مقطع دکتری در رشته مکترونیک از دانشگاه صنعتی لیسرس در جمهوری چک در سال ۱۳۹۰ فارغ التحصیل گردید. ایشان هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد و عضو مرکز رباتیک این دانشگاه است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی انواع سیستم‌های کنترل غیرخطی نظیر تطبیقی، مقاوم، هوشمند (فازی، عصبی، ...) روی سیستم‌های رباتیکی نظیر بازوهای رباتیکی، ربات‌های متحرک، ربات‌های پرنده و انواع دیگر سیستم‌های الکترومکانیکی است.

غضنفر شاهقلیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۷۳ در دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه تبریز و دکتری مهندسی برق را در دانشگاه علوم و تحقیقات تهران به پایان رسانده و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، دینامیک سیستم‌های قدرت و انرژی‌های نو.

سیدمحمد کارگر در سال ۱۳۸۵ مدرک کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک را از دانشگاه شهرکرد و در سال ۱۳۸۷ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق- کنترل را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد دریافت نمود. همچنین دوره دکتری مهندسی برق کنترل را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات و در سال ۱۳۹۲ به پایان رساند. وی هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده تشخیص و کنترل تحمل‌پذیر عیب، کنترل پیش‌بین و کنترل انرژی در ساختمان است.

توزیع گشتاور در سرعت‌های پایین، "نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۱۶، شماره ۲، صص. ۱۰۷-۹۷، تابستان ۱۳۹۷.

- [17] L. Magdalena, "Semantic interpretability in hierarchical fuzzy systems: creating semantically decouplable hierarchies," *Information Sciences*, vol. 496, no. 1, pp. 109-123, Sep. 2019.
- [18] H. Asgari, X. Q. Chen, M. Morini, M. Pinelli, R. Sainudiin, P. Ruggero, and S. M. Venturini, "NARX models for simulation of the start-up operation of a single-shaft gas turbine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 93, no. 1, pp. 368-376, Jan. 2016.
- [19] J. Kerr-Wilson and W. Pedrycz, "Generating a hierarchical fuzzy rule-based model," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 381, no. 1, pp. 124-139, Feb. 2020.
- [20] D. Dovzan and I. Skrjanc, "Fuzzy space partitioning based on hyperplanes defined by eigenvectors for takagi-sugeno fuzzy model identification," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 6, pp. 5144-5153, Jun. 2020.
- [21] E. Aghadavoodi and G. Shahgholian, "A new practical feed-forward cascade analyze for close loop identification of combustion control loop system through RANFIS and NARX," *Applied Thermal Engineering*, vol. 133, no. 1, pp. 381-395, Mar. 2018.
- [22] E. Hosseini, E. Aghadavoodi, G. Shahgholian, and H. Mahdavi-Nasab, "Intelligent pitch angle control based on gain-scheduled recurrent ANFIS," *J. of Renewable Energy and Environment*, vol. 6, no. 1, pp. 36-45, Winter 2019.
- [23] L. He, K. Wen, C. Wu, J. Gong, and X. Ping, "Hybrid method based on particle filter and NARX for real-time flow rate estimation in multi-product pipelines," *J. of Process Control*, vol. 88, no. 1, pp. 19-31, Apr. 2020.
- [24] M. Annabestani and N. Naghavi, "Nonlinear identification of IPMC actuators based on ANFIS-NARX paradigm," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 209, no. 1, pp. 140-148, Mar. 2014.
- [25] S. H. Mozafarpour-Khoshrodi and G. Shahgholian, "Improvement of perturb and observe method for maximum power point tracking in wind energy conversion system using fuzzy controller," *Energy Equipment and Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 111-122, Autumn 2016.
- [26] G. Shahgholian, A. Hakim, and N. Behzadfar, "Motor speed maximum control in the resonance ratio controller for two-mass system using self-organizing fuzzy controller," *International J. of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 1-8, Spring 2020.