

شناسایی و پیش بینی سیستم غیرخطی کوره دوار سیمان با استفاده از شبکه عصبی - فازی و انتخاب ورودی ها به کمک الگوریتم ژنتیک

آرمیتا فاطمی مقدم^۱، آرش شریفی^۲، محمد تشنه لب^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکترونیک، گروه کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران،

Armitafatemimoghadam@gmail.com

^۲ مربی، گروه کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، A.sharifi@srbiau.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Teshnehlabb@eetd.kut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۰/۳/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۰/۶/۵)

چکیده: با توجه به اهمیت کوره دوار سیمان در صنعت و عدم وجود یک مدل قابل قبول برای آن، شناسایی و پیش بینی وضعیت کوره از ملزومات شبیه سازی و اتوماسیون سیستم کوره دوار سیمان می باشد. کوره دوار سیمان یک سیستم غیرخطی و متغیر با زمان می باشد. در این نوشتار به منظور شناسایی و پیش بینی وضعیت کوره دوار سیمان از شبکه عصبی- فازی تطبیقی ANFIS استفاده شده است. از آنجا که داده های استخراج شده مرتبط با سیستم واقعی است، لذا انجام عملیات پیش پردازش بر روی داده های موجود یکی از مهمترین و دشوارترین مراحل شناسایی می باشد. علاوه بر ورودیهای سیستم، دینامیک های سیستم که از روش لیشیتز انتخاب شده با تأخیر خالص سیستم با یک گام عقب تر به عنوان ورودی های شبکه عصبی- فازی اعمال شده است. با توجه به مسأله تعداد قوانین در سیستم فازی در زمان حضور تعداد زیادی متغیر ورودی و همچنین با وجود زیاد بودن تعداد ورودیها مورد نیاز برای اعمال آنها به شبکه عصبی- فازی، از الگوریتم ژنتیک بعنوان روش انتخاب ویژگی به منظور کاهش تعداد متغیرهای ورودی سیستم فازی استفاده شده است. نتایج حاصل از اعمال روش مطرح شده بر روی داده های واقعی کوره دوار سیمان ساوه نشان دهنده کارایی بالای روش ارائه شده در پیش بینی عملکرد این سیستم صنعتی و غیرخطی دارد.

کلمات کلیدی: شناسایی سیستم، انتخاب ویژگی، کوره دوار سیمان، شبکه عصبی- فازی ANFIS و الگوریتم ژنتیک.

Prediction and Identification of Nonlinear Rotary Cement Kiln System with Neuro-Fuzzy ANFIS Network by Using Feature Selection with Genetic Algorithm

Armita Fatemimoghadam, Arash Sharifi, Mohammad Teshnehlabb

Abstract: Due to the status of Rotary Kiln Cements (RKC)s in different industries and lack of a mature model for these systems, identification and prediction of the Kiln system are necessary for any simulation and automation approaches. Intrinsically, RKC)s are non-linear and time-variant systems. This paper proposes a novel approach of using ANSFI to predict the status of a RKC system in a scale of few minutes in advance. Since the data used in this research has been extracted from a real system, pre-analysis of data is one of the critical parts of identification process. In addition to the system inputs, dynamic of the system which has been selected according to the LIPSCHITZ method with a system's genuine delay are applied as inputs for Neural Network system

with one step phase lag. Genetic algorithm has been utilized as a characteristic selection and phasor rules reduction method due to the existing challenges on the number of rules in phasor systems specifically with a large number of variables to be applied to the Neural Network. To verify the performance of the proposed identification and prediction method on a non-linear industrial system, simulation results have been carried out on a real data extracted from SAVEH Cement Company.

Keywords: System Identification, Feature Selection, Cement Rotary Kiln, Algorithm Genetic.

۱- مقدمه

بیش از یک میلیارد تن سیمان هر ساله در سراسر جهان تولید می شود و کوره سیمان قلب این پروسه تولید می باشد. بالا رفتن کارایی در بهره بروری از کوره دوار سیمان به عنوان اصلی ترین مرحله صرفه جویی در انرژی و خارج کردن گازهای گلخانه ای در تولید سیمان، هسته مرکزی پروسه تکنولوژی تولید سیمان است. کوره دوار سیمان، مهمترین بخش از کارخانه سیمان است که کلینکر سیمان در آن تولید می شود. کوره دوار سیمان، یک سیستم پارامتر گسترده و غیرخطی متغیر با زمان است که رفتار غیر خطی و دینامیکی آن منجر به فعل و انفعالات شیمیایی اش می شود. در واحد صنعتی تولید سیمان، برای تولید کلینکر سیمان، مواد در کوره دوار با افزایش دما با یکدیگر ترکیب شده تا پس از واکنشهای صورت گرفته در نهایت منجر به تولید کلینکر سیمان - شود [۱].

تلاشهایی به منظور شناسایی برای نیل به اهدافی همچون کنترل، پیش بینی و شبیه سازی این سیستم پیچیده انجام شده است، با این وجود مدل دقیق و صحیحی که بیانگر رفتار دینامیکی و پیچیدگی های موجود در سیستم غیر خطی کوره باشد، بدست نیامده است. اگرچه نتایج حائز اهمیتی در سالهای گذشته بدست آمده است، اما می توان مشاهده نمود که بسیاری عوامل با عدم قطعیت در بیان مدل های ارائه شده مواجه بوده است. هیچ یک از مدل های فرضی نام برده شده برای کوره بعنوان ابزار پیش بینی برای عملیات کوره کافی نیستند. بنابراین تلاشهای بیشتری برای دستیابی به مدلی که بتواند رفتار کوره را به صورت کامل نشان دهد باید صورت پذیرد. چنین مدلی برای صنعت سیمان بعنوان یک ابزار مفید بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

یکی از راهکارهای مناسب در روشهای شناسایی و مدل سازی، شبکه های عصبی مصنوعی است که در بسیاری از سیستم های غیر خطی با رفتار های دینامیکی پیچیده مورد استفاده قرار می گیرد. پژوهشهای بسیاری روی کاربرد های مختلف شبکه های عصبی در زمینه شناسایی سیستم بر روی عملکرد سیستم های ساده و خطی و همچنین سیستم های پیچیده و غیرخطی صورت گرفته است. ک. پازند رفتار مکانیکی بدنه کوره را با استفاده از شبکه های عصبی در سال ۲۰۰۹ شبیه سازی نموده [۲] و مدلی مکانیکی برای کل بدنه کوره، به منظور پیش بینی دو متغیر مکانیکی حائز اهمیت که ماکزیمم تنش نامی و تغییر شکل هر بخش از بدنه کوره می باشند را ارائه داده است. کنترل مدل پیش بین کوره دوار

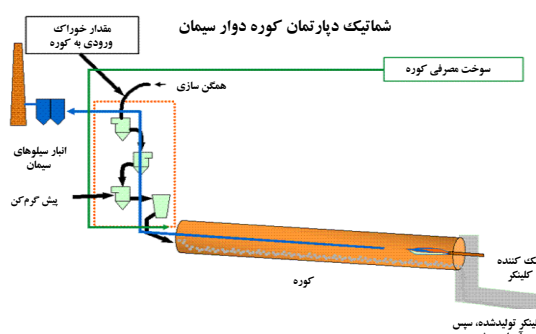
سیمان، هسته اصلی پژوهش استادلر در سال ۲۰۱۰ بود که توانست درجه حرارت تمام کوره را که به عنوان پارامتر مؤثر تولید کلینکر انتخاب کرده بود، در طول پروسه تولید سیمان پایدار نگه دارد [۳]. شایان ذکر است که این پژوهش تنها یکی از پارامترهای مؤثر روی وضعیت کوره دوار سیمان را مورد بررسی قرار داده است.

با توجه به قابلیت های شبکه های عصبی مصنوعی در مدل سازی و پیش بینی سیستم های پیچیده خطی و غیر خطی، این روش در تحقیقات اخیر برای شناسایی و کنترل کوره دوار سیمان ارائه شده است [۴-۶]. در پیش بینی و کنترل وضعیت کوره دوار سیمان عوامل بسیاری به علت غیرخطی بودن سیستم، دارا بودن تأخیر خالص در سیستم، ابعادی با اندازه بالا و همچنین چند ورودی-چند خروجی بودن اصل سیستم دخیل هستند که به همین علت فرآیند شناسایی و پیش بینی وضعیت کوره را با دشواری های بسیاری همراه می سازد. یکی از روشهای بکار رفته مدل ARX است که بدلیل ضعیف بودن نتایج بدست آمده از تخمین در فرکانس های پایین و میانی در مدل سازی، این مدل برای کاربردهایی مثل پیش بینی و کنترل فرآیندهای صنعتی و پیچیده نتوانست کارآمد واقع شود. در روش OE معیار خطای خروجی^۱ به عنوان تابع هزینه استفاده می شود که بدلیل آنکه خطای مشاهده شده مستقیماً خود را در خروجی نشان می دهد، مدل به نوع ساختار بسیار حساس است که این امر چندان مطلوب نیست.

در این پژوهش به منظور شناسایی سیستم کوره دوار سیمان با داده های ورودی و خروجی در نظر گرفته شده، از شبکه های ANFIS با ترکیب منطق فازی و شبکه های عصبی که ابزاری قدرتمند برای شناسایی و پیش بینی بسیاری از سیستم های پیچیده هستند، برای افزایش دقت سیستم در افق پیش بینی جلوتر استفاده شده است. آماده سازی داده ها یک امر قاطع و مهم در امر شناسایی و پیش بینی وضعیت کوره می باشد بنابراین ضروری است که داده های مناسب همچون تأخیر خالص سیستم بدست آمده و به سیستم شناسایی اعمال شود. با توجه به پیچیدگی کوره دوار سیمان و وجود تعداد زیاد متغیرهای ورودی، استفاده مستقیم از ورودی های موجود به منظور استفاده در سیستم فازی مقدور نبوده و سبب ایجاد مشکل ابعاد در سیستم فازی تولیدی خواهد شد، به نحوی که سیستم تولید شده عملاً قابلیت پیاده سازی و اعمال در سیستم واقعی را نخواهد داشت. از همین رو در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده

¹ Output Error

نظر مدل دینامیکی بر حسب دینامیک‌های موجود یک سیستم پارامتر گسترده محسوب می‌شود [۱۴]. در شکل (۱) دپارتمان کوره سیمان آورده شده است.



شکل ۱: مجموعه کوره دوار سیمان [۱۵]

در امر شناسایی سیستم، خروجی‌ها متغیرهایی هستند که برای طراحان جالب و همواره حائز اهمیت بوده و متغیرهای خروجی متأثر از رفتار متغیرهای ورودی می‌باشند. سیستم کوره دوار سیمان یک فرآیند چند ورودی-چند خروجی می‌باشد و مطابق با نظر کارشناسان خبره صنعت، متغیرهای ورودی و خروجی این سیستم به قرار زیر می‌باشد. متغیرهای ورودی و علائم اختصاری آنها در جدول (۱) و متغیرهای خروجی و علائم اختصاری آنها در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱: علائم اختصاری به کار رفته برای متغیرهای ورودی		
نام کامل متغیرهای ورودی	نام لاتین متغیر	اختصار
مقدار خوراک ورودی به کوره	Material	Mat
سخت مصرفی کوره	Fuel	Fuel
دور کوره	Kiln Speed	KS
دور فن	ID. Fan	ID. Fan speed
فشار هوای ورودی به کوره	Air Pressure	AP

جدول ۲: علائم اختصاری به کار رفته برای متغیرهای خروجی		
نام کامل متغیرهای خروجی	نام لاتین متغیر	اختصار
جریان کشی کوره	Kiln Ampere	KA
گازمونوکسید کربن ایجاد شده	CO	CO
درجه حرارت عقب کوره	Back End Temperature	BE
درجه حرارت پیش گرم کن	Pre-heater Temperature	PRE

۳- آماده‌سازی داده‌ها

انتخاب داده‌ها برای شناسایی سیستم در حین پیاده‌سازی، به هیچ عنوان شبیه به داده‌های مناسب برای استفاده بلادرنگ در شناسایی الگوریتم نیست [۷]. موارد محتمل بسیاری در ناکارا بودن داده‌ها دخیل است که عبارت‌اند از:

۱. اغتشاشات فرکانس بالا در داده برداری

از الگوریتم ژنتیک به انتخاب زیر مجموعه‌ای موثر و مناسب از متغیرهای ورودی پرداخته شود تا ضمن حفظ کارایی سیستم فازی، مواردی همچون شفافیت و تفسیر پذیری در سیستم ایجاد شده نیز حفظ شوند.

این مقاله در بر گیرنده بخشهای زیر می‌باشد: در بخش دوم، سیستم کوره دوار سیمان و پارامترهای موثر انتخاب شده بعنوان متغیرهای ورودی و خروجی توضیح داده می‌شود. بخش سوم شامل آماده سازی داده‌ها و مراحل پیش پردازش داده‌ها می‌باشد. پس از آن در بخش چهارم با توضیحاتی در باب روش مدل هوشمند ترکیبی بکار گرفته شده و نحوه انتخاب ورودی‌های مناسب با استفاده از الگوریتم ژنتیک، به فرآیند شناسایی کوره دوار سیمان پرداخته شده است. ارائه و ارزیابی نتایج بدست آمده در بخش پنجم نشان داده شده است و نتایج بدست آمده در بخش پایانی جمع بندی شده است.

۲- کوره دوار سیمان

کوره سیمان یکی از کلیدی ترین تجهیزات در صنعت سیمان می‌باشد که برای تبدیل مواد کلسینه شده به کلینکر سیمان کاربرد دارد. کوره های سیمان برای مرحله پیرو فرآیند تولید پرتلند و دیگر سیمان های هیدرولیک استفاده می شود. با افزایش دما در کوره، واکنش هایی در مخلوط، اتفاق می افتد که در ابتدا سبب تغییر شکل مواد معدنی رسی به اکسید هایشان می شود، سپس کربنات کلسیم با اکسید سیلیسیم واکنش داده و سیلیکات کلسیم شکل می گیرد و نهایتاً کلسیم باقی مانده تغییر شکل داده و به اکسید کلسیم و دی اکسید کربن تبدیل می شود.

کوره دوار شامل یک لوله استوانه‌ای است که از صفحات فولادی ساخته شده است و درون آن با آجر نسوز پوشیده شده است. شیب لوله ۱ تا ۴ درجه است و به آهستگی حدود ۳۰ تا ۲۵۰ دور بر ساعت حول محور خود دوران می کند. مخلوط از انتهای بالای آن تغذیه می شود و دوران کوره باعث حرکت منظم ذرات تا انتهای دیگر آن می شود. در انتهای دیگر (انتهای پایین) سوخت به شکل گاز، نفت یا سوخت جامد پودری از طریق لوله سوزان به درون کوره دمیده می شود که یک شعله هم مرکز با قسمت پایین لوله کوره تولید می کند. هنگامی که مواد به شعله می رسند، به حداکثر دمای خود نایل می شوند. البته قبل از رسیدن به کولر، هوا ابتدا از درون کولر و سپس از درون کوره برای انجام احتراق سوخت عبور داده می شود. در کولر، هوا با سرد کردن کلینکر داغ، گرم می شود، که دمای آن قبل از ورود به کوره ممکن است به ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه برسد که باعث احتراق موثرتر و سریعتر سوخت می شود.

کوره سیمان به طور ۲۴ ساعته در شبانه روز در حال کار می باشد و به ندرت حدود ۲ یا ۳ روز در سال برای برقراری اصول نگهداری کوره متوقف می شود. پژوهشگران و دست اندرکاران صنعت سیمان به خوبی واقفند که کوره دوار سیمان یکی از پیچیده ترین راکتورهای حرارتی در صنایع است و تحلیل و آنالیز رفتار فرآیند پخت در کوره دوار سیمان بسیار پیچیده بوده و با دشواریهایی همراه است [۱۴]. کوره دوار سیمان از

۲. از دست رفتن برخی داده ها در حین فرآیند نمونه برداری
۳. وجود انحراف از صفر، اغتشاشات فرکانس پایین و رفتار احتمالی تناوبی سیستم

داده هایی که در دسترس داریم، حاصل نمونه برداری ۱۲ هفته کاری بطور مداوم و ۲۴ ساعته شبانه روزی و به ازای هر ثانیه از وضعیت کوره دوار سیمان از کارخانه سیمان ساوه می باشد. از آنجا که داده های استخراج شده مرتبط با سیستم واقعی می باشد، این داده ها نیازمند عملیات پیش پردازش به جهت گسسته سازی، رفع نویز، فیلترینگ، کاهش سطوح قله ها و تصحیح مقدار انحراف از صفر می باشد. لذا انجام عملیات پیش پردازش بر روی داده های موجود به منظور حصول داده هایی مناسب جهت اعمال به سیستم شناسایی ضروری می باشد. در این تحقیق آماده سازی داده ها شامل مراحل پیش پردازش زیر است:

۳-۱- کاهش تعداد نمونه ها

میدانیم که نمونه برداری از سیگنال های پیوسته در سیستم های کنترل دیجیتال، باعث از بین رفتن اطلاعات می شود. بنابراین لازم است که فرکانس نمونه برداری اطلاعات به نحوی انتخاب شود که در محتوی اطلاعاتی داده های نمونه برداری شده مشکلی ایجاد نشود. در تئوری پردازش سیگنال گسسته اثبات می شود که حداقل فرکانس نمونه برداری می باید دو برابر پهنای باند فرکانسی سیگنال نمونه برداری شده، باشد تا بتوان سیگنال پیوسته را از سیگنال نمونه برداری شده بازسازی نمود [۸]. داشتن نمونه های زیاد از داده ها باعث پاره ای مشکلات در فرآیند شناسایی می گردد، بطوریکه با تعداد نمونه های بیش از حد علاوه بر سخت شدن فرآیند شناسایی، به زمان بیشتری جهت آموزش نیاز داریم. در این پروژه برای بدست آوردن فرکانس نمونه برداری از پیش پردازش و روش کوچکترین ثابت زمانی استفاده شده است. با بررسی های انجام شده مشخص شده است که کوچکترین ثابت زمانی سیستم تقریباً ۳ دقیقه می باشد [۱۰]. لذا با توجه به رابطه (۱) که در زیر آمده است از هر ۶۰ ثانیه یک نمونه برداشته شده است.

اگر $\tau_{\min}$ کوچکترین ثابت زمانی سیستم باشد، می توان زمان نمونه برداری را به صورت زیر انتخاب کرد:

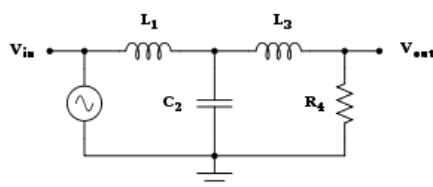
$$T_s = \frac{\tau_{\min}}{3} \text{ (Sec)} \quad (1)$$

۳-۲- فیلترینگ

برطرف کردن تغییرات شدید پیک ها و هموار سازی داده ها در حل مسأله شناسایی بسیار اهمیت دارد. این تغییرات ناگهانی بدلیل عملیات حسگرها و کارتهای اتصال داده رخ می دهد [۸]. لازم است بخاطر داشته باشیم که داده های بکار رفته در این پروژه در زمانی که این کارخانه در

حال کار بوده جمع آوری شده است. برای حل این مشکل، داده ها از فیلتر مناسبی که می تواند سیگنال نویز را از سیگنال اصلی حذف کند، می گذرد. نتایج به ما نشان داده که داده هایی که از فیلتر میان گذر عبور کنند، سیگنال نویز بر روی سیگنال اصلی باقی می ماند و در نتیجه کاربردی برای داده های این سیستم ندارد. چنانچه باند میانی فیلتر میان گذر را کوتاه کنیم، این امر می تواند سیگنال نویز را حذف کند، ولی چون سبب تغییر شکل سیگنال می شود، در اصل، حالت ماندگار سیستم را از بین برده و بنابراین فیلتر مناسبی برای داده های این پروژه نمی باشد. چنانچه فیلتر بالا گذر استفاده شود، حالت ماندگار سیستم و برخی از قله های لازم در داده های مورد نظر، از بین رفته و فقط فرکانس های بالا که همان نویزهای سیستم می باشند، در سیستم باقی می ماند. اما با انتخاب یک فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع مناسب، ضمن حفظ حالت ماندگار سیستم، سبب حذف نویزهای فرکانس های بالا شده [۹] و همچنین قادر به بازسازی ویژگی های اصلی سیگنال می باشد. فیلتر باترورث مرتبه سوم که جهت حذف مقدار بایاس یا مقدار dc و حفظ حالت ماندگار سیستم می باشد، همانطور که در شکل (۲) آورده شده است، از یک فیلتر باترورث مرتبه یک و یک فیلتر باترورث مرتبه دو که بصورت سری تحقیق می یابند استفاده می شود.

در حالت کلی تابع تبدیل یک فیلتر باترورث مرتبه سه با توجه به رابطه (۲) بصورت زیر بیان می شود:



شکل (۲): فیلتر باترورث پایین گذر مرتبه سه

در این پروژه فیلتر پایین گذر باترورث^۱ مرتبه سوم با باند گذر ۰.۰۱۵ هرتز را، انتخاب کرده که بدون تحت تأثیر قرار دادن سیگنال های ورودی، امکان حذف نویز و سیگنال های توزیعی از سیگنال اصلی را دارا می باشد.

۳-۳- تخمین تأخیر

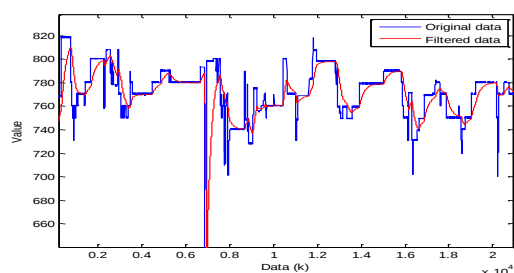
به منظور شناسایی فرآیند، تأخیر خالص سیستم، اولین پارامتر مهمی است که باید مشخص گردد. در غیر این صورت تمام مراحل شناسایی دچار مشکل خواهد شد. تحقیقی که سابقاً در این باره انجام شده است [۱۰] قبلاً این هدف را به درستی نشان گرفته است. در [۱۰] روش عددی لپشیتز برای تخمین تأخیر ورودی سیستم مدل کوره اعمال شده است. در جدول (۳) تخمین تأخیر برای هر یک از ورودی ها بر حسب دقیقه آورده شده است.

¹ Butterworth Low-pass Filter

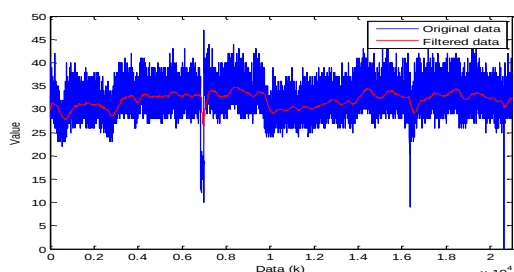
جدول ۳: نمایش تأخیر ورودی‌ها و خروجی‌ها نسبت به هم بر حسب دقیقه [۱۰]

ورودی‌ها	خروجی‌ها	جریان کشی	مقدار گاز CO	درجه حرارت عقب کوره	درجه حرارت پیش گرمکن
مقدار خوراک ورودی	۳۰	۱۵	۱۸	۳۰	
سوخت مصرفی کوره	۰	۶	۴	۱۰	
دور کوره	۰	۶	۳۷	۴۲	
دور فن	۳۰	۰	۰	۶	
فشار هوای ورودی	۳۰	۲	۰	۶	

پ: متغیر سرعت کوره (KS)



ت: متغیر سرعت فن کوره (ID.Fan)



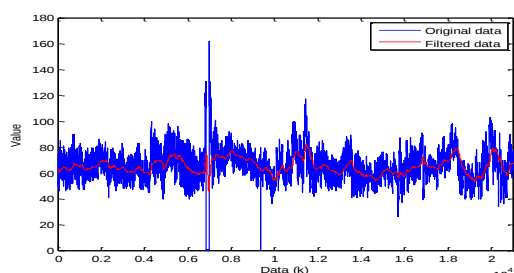
ث: متغیر فشار هوای ثانویه (AP)

شکل ۳: داده‌های فیلتر شده و داده‌های واقعی شامل (الف الی ث) به ازای

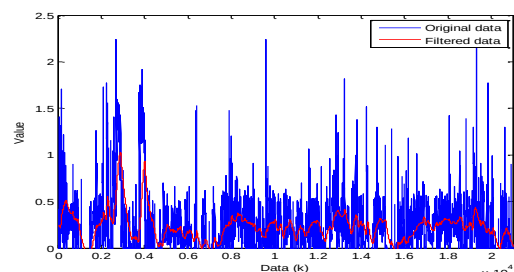
پنج متغیر ورودی

شکل (۴) داده‌های فیلتر شده و داده‌های واقعی از متغیرهای خروجی

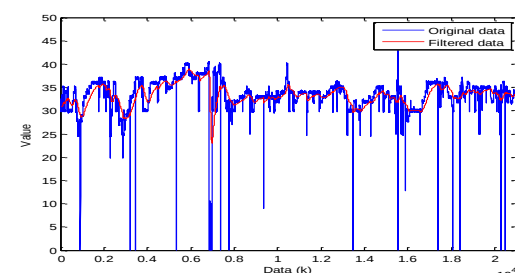
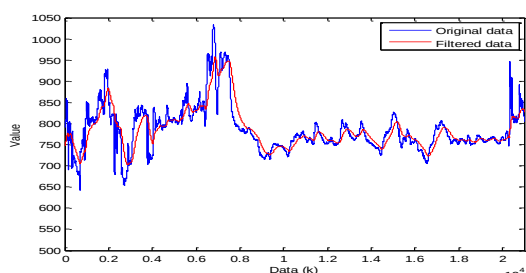
را نشان می‌دهد.



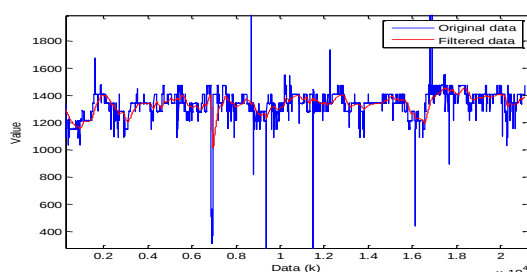
الف: متغیر جریان کشی کوره (KA)



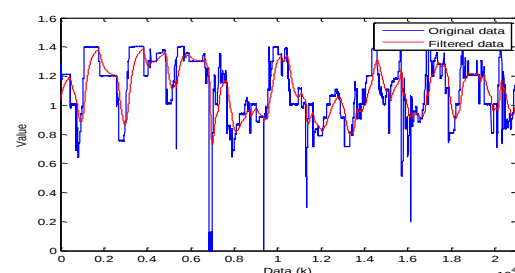
ب: متغیر مقدار گاز مونوکسید کربن ایجاد شده در کوره (CO)

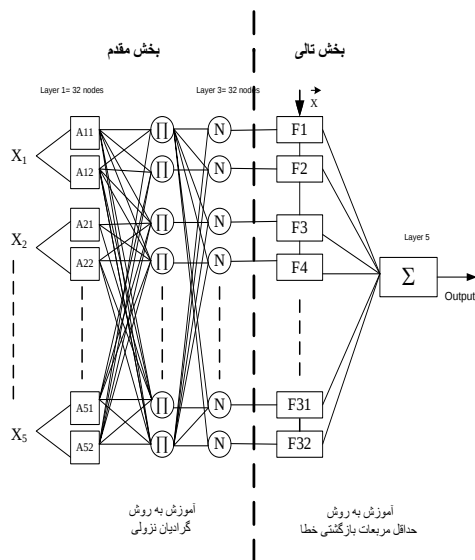


الف: متغیر خوراک ورودی کوره (Mat)



ب: متغیر سوخت مصرفی کوره (Fuel)





شکل ۵: ساختار شبکه عصبی - فازی تطبیقی ANFIS

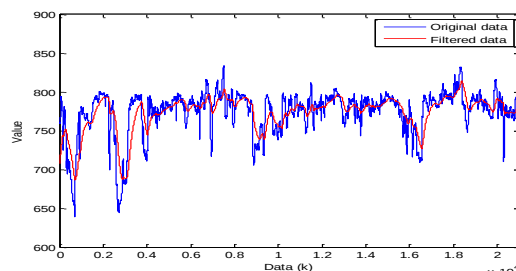
لایه های دوم تا پنجم. الگوریتم آموزش به شکل یک الگوریتم ترکیبی^۱ که شامل دو روش مختلف برای آموزش پارامترهای یادگیری می باشد، مورد استفاده قرار می گیرد. پارامترهای تابع تعلق برای یک تابع گوسی شامل: پارامتر انحراف از معیار تابع گوسی و مرکز دسته تابع گوسی می باشند. سیستم یادگیری ANFIS به این صورت است که چون رابطه پارامترهای لایه چهارم تا خروجی نهایی یک رابطه خطی است، بنابراین در تخمین آنها می توان از الگوریتم کمترین مربعات خطا استفاده نمود و پارامترهای لایه اول نیز مطابق معمول شبکه های تطبیقی، از طریق پس انتشار خطا و الگوریتم های گرادینت شیب، قابل یادگیری هستند. همانطور که قبل تر در شکل (۵) نشان داده شده، در این نوع آموزش بخش مقدم، توسط روش گرادینت نزولی و بخش تالی، توسط روش حداقل مربعات خطا آموزش داده می شوند. لازم به توضیح است که لایه های اول تا سوم در ساختار ANFIS بخش مقدم و لایه های چهارم و پنجم، بخش تالی نامیده می شوند [۱۰].

هدف، آموزش سیستم فازی $f(x)$ است به نحوی که خطای تطبیق زیر به حداقل سوق پیدا کند.

$$E_p = \frac{1}{2} [e_f]^2 \quad (3)$$

اگر یک سیستم فازی به صورت (۴) فرض شود، هدف در آموزش به روش گرادینت نزولی برای بخش مقدم بدین معنی است که می بایست پارامترهای $\bar{x}_i^l$ و σ_i^l تعیین شوند، به نحوی که E_p کمترین مقدار ممکن را داشته باشد.

پ: متغیر درجه حرارت عقب کوره (BE)



ت: متغیر درجه حرارت پیش گرمکن (PRE)

شکل ۴: داده های فیلتر شده و داده های واقعی شامل (الف الی ت) به ازای چهار متغیر خروجی

۴- روش توسعه یافته عصبی - فازی ANFIS

سیستم عصبی - فازی، سیستمی است که در آن از الگوریتم های آموزشی شبکه های عصبی برای تنظیم پارامترهای سیستم استنتاج فازی استفاده می شود. در این میان، شبکه های ANFIS با ترکیب منطق فازی و شبکه های عصبی، ابزاری قدرتمند برای شناسایی و پیش بینی بسیاری از سیستم های پیچیده هستند که کاربردهای مختلفی چون پیش بینی، بهینه سازی، تشخیص خطا، کلاس بندی، شناسایی الگو، طراحی کنترل کننده - ها را دارا می باشند. مزیت بکارگیری این نوع از شبکه ها قدرت بسیار بالای آنها در تعیین کردن و تقریب زدن مدل غیرخطی مربوط به تابعی از متغیرهای ورودی و خروجی است که بواسطه تعدادی داده آموزشی ارائه شده است. شبکه ANFIS را می توان مجموعه ای از قوانین اگر - آنگاه به فرم زیر تعریف نمود [۱۱]:

اگر $x_1, A_1^i, x_2, A_2^i, \dots, x_n, A_n^i$ باشد،

$$F^i(k) = \alpha_0^i + \alpha_1^i X_1 + \alpha_2^i X_2 + \dots + \alpha_n^i X_n$$

در این رابطه $i=1,2,\dots,n$ ورودی های شبکه، A مجموعه های فازی، $l=1,2,\dots,M$ تعداد قواعد فازی و y خروجی شبکه فازی می باشد. شکل (۵) ساختار شبکه ANFIS را به ازاء پنج ورودی و یک خروجی که برای هر ورودی دو تابع تعلق اختصاص داده شده است را نشان می دهد.

۴-۱- یادگیری شبکه عصبی - فازی ANFIS

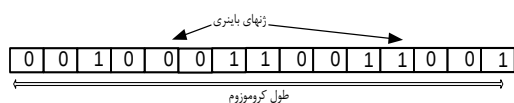
الگوریتم آموزش در شبکه های ANFIS شامل آموزش پارامترهای که به آموزش نیاز دارند، عبارتند از پارامترهای تابع تعلق و نیز وزن های

¹ Hybrid

در این مقاله هدف انجام شناسایی و پیش بینی وضعیت کوره دوار سیمان با استفاده از شبکه ANFIS می‌باشد. لازم به ذکر است اگرچه ویژگی‌های مناسب شبکه ANFIS این ساختار را به ساختاری مناسب برای طراحی خودکار سیستم فازی کوره دوار سیمان، تبدیل نموده است، این سیستم در کاربردهایی با ابعاد ورودی بالا بعلا محدودیت حافظه ایجاد شده قابل پیاده سازی نمی‌باشد. در این پروژه تعداد متغیرهای ورودی برای حل مسئله ۱۵ متغیر ورودی می‌باشد که با در نظر گرفتن تنها دو تابع تعلق برای هر ورودی، تعداد کل قواعد فازی ایجاد شده برابر با $2^{15} = 32768$ قانون فازی خواهد بود که عملاً هیچ سیستمی قادر به پیاده سازی این تعداد قانون و مدیریت ساختار شبکه نخواهد بود. (در این حالت تعداد پارامترهای آموزش پذیر برابر با ۵۲۴۳۴۸ پارامتر خواهد بود). بنابراین توسط یکی از روشهای انتخاب ویژگی، تعداد ورودی‌های اعمالی به سیستم کاهش داده می‌شود، که برای رسیدن به هدف انتخاب زیر مجموعه‌ای مناسب از داده‌های ورودی با کمترین تعداد ویژگی و بیشترین بازده شناسایی، در این پروژه از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که در بخش بعدی به اختصار مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۴- انتخاب ورودی‌های ویژه با استفاده از الگوریتم ژنتیک

یکی از روشهای انتخاب ویژگی، استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد [۱۲]. در این روش بعد فضای ورودی به عنوان طول رشته کروموزوم در نظر گرفته می‌شود. برای ساختن جمعیت اولیه ابتدا به صورت تصادفی به هر ژن مقادیر صفر و یک نسبت داده می‌شود. شکل (۷) یک نمونه از کروموزوم‌های مورد استفاده در انتخاب ویژگی در الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.



شکل ۷: یک نمونه از کروموزوم‌های مورد استفاده در انتخاب ویژگی در الگوریتم ژنتیک

در این ساختار مقادیر ژن‌ها به صورت باینری بوده، بطوریکه صفر برای ژنی در نظر گرفته می‌شود که می‌باید حذف شود و در صورتی که یک ویژگی انتخاب شود، عدد یک به آن ژن نسبت داده می‌شود. شماره‌های منتصب به ژن‌های دارای مقادیر یک، که در Index ذخیره می‌شوند، نشان دهنده شماره ویژگی انتخاب شده در فرآیند انتخاب ورودی‌ها به کمک الگوریتم ژنتیک می‌باشند که از میان تعداد ۱۵ ویژگی کلی انتخاب شده است [۱۲] و [۱۳]. از همین رو در این پروژه از الگوریتم ژنتیک به منظور انتخاب ورودی‌های مناسب و برخورد با مساله رشد تعداد قوانین در سیستم‌های فازی استفاده شده است.

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M F^l \left(\prod_{i=1}^n \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right) \right)}{\sum_{l=1}^M \left[\prod_{i=1}^n \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right) \right]} \quad (4)$$

که $l=1,2,\dots,M$ تعداد قواعد فازی و $i=1,2,\dots,n$ تعداد ورودی‌های فازی می‌باشد.

برای تعیین میانگین تابع گوسین، $\bar{x}_i^l$ ، مطابق زیر عمل می‌شود:

$$\bar{x}_i^l(k+1) = \bar{x}_i^l(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial \bar{x}_i^l} \quad (5)$$

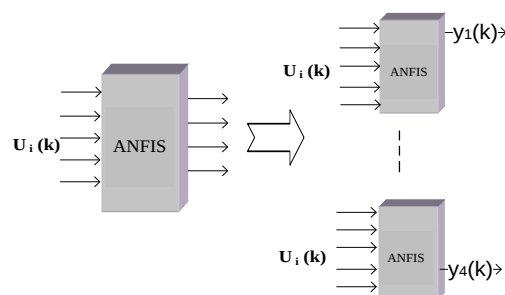
که $k=0,1,2,\dots$ گام آموزش و η یک عدد ثابت بوده که طول گام را

مشخص می‌کند. به همین ترتیب انحراف تابع گوسین، σ_i^l ، بدست می‌آید:

$$\sigma_i^l(k+1) = \sigma_i^l(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial \sigma_i^l} \quad (6)$$

سیستم‌های فازی سیستم‌هایی مبتنی بر دانش هستند که قابلیت مدل سازی مسائل با استفاده از قواعد اگر-آنگاه فازی را دارند. در مسائل با زیاد شدن تعداد ورودی‌های سیستم فازی، تعداد قواعد بصورت نمایی رشد پیدا کرده، بنابراین طراحی سیستم فازی امکان پذیر نبوده و می‌باید به سمت روش‌های طراحی خودکار سیستم عصبی حرکت کرد. شبکه ANFIS یکی از روش‌های طراحی خودکار سیستم فازی و حصول قواعد فازی بر اساس داده‌های آموزشی می‌باشد.

شناسایی کوره دوار سیمان با متغیرهای ارائه شده، شناسایی یک سیستم پنج ورودی و چهار خروجی می‌باشد. ولی با توجه به اینکه شناسایی یک سیستم چند ورودی-چند خروجی^۱ کاری دشوار است و علاوه بر آن جواب‌های بدست آمده نیز چندان قابل قبول نمی‌باشد، عمل شناسایی سیستم مطابق شکل (۶) به صورت چند سیستم چند ورودی-تک خروجی^۲ در نظر گرفته شده است. مدل بدست آمده تا آنجا که می‌شود باید رفتاری نزدیک تر به رفتار فرآیند داشته باشد. کیفیت مدل‌سازی توسط بدست آوردن یک تابع خطا که بین y و $\hat{y}$ می‌باشد، سنجیده می‌شود که این خطا برای تنظیم کردن پارامترهای مدل استفاده می‌شود.

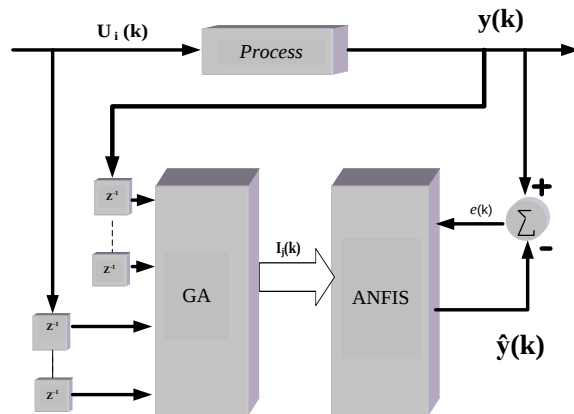


شکل ۶: تبدیل شبکه شناسایی چند ورودی-چند خروجی به شبکه چند ورودی-تک خروجی

^۱ Multi Input Multi Output(MIMO)

^۲ Multi Input Single Output(MISO)

کروموزوم می باشد و بنابراین اهمیت توابع (f_1) و (f_2) توسط ضریب تعادل هر کدام تعیین می شود.



شکل ۸: بلوک دیاگرام فرآیند شناسایی با استفاده از شبکه عصبی-فازی ANFIS به همراه انتخاب ورودیهای ویژه بوسیله الگوریتم ژنتیک

جدول (۴) پارامترهای اصلی در الگوریتم ژنتیک استفاده شده را، در فرآیند شناسایی کوره دوار سیمان با استفاده از شبکه ANFIS به همراه انتخاب ورودی‌ها بوسیله الگوریتم ژنتیک، نمایش می دهد. قابل ذکر است که در هر چرخه اجرای الگوریتم ژنتیک، کلیه کروموزومهای موجود در جمعیت بررسی شده و بهترین نتایج حاصل به عنوان جمعیت جدید برای نسل بعدی انتخاب می شوند. در پایان بهترین کروموزوم موجود به عنوان بهترین ترکیب از ورودیهای منتخب گزینش شده و بهترین شبکه نیز ساختار ANFIS متناظر با این دسته از ورودیها می باشد.

جدول ۴: پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک در شناسایی با ANFIS

نام پارامتر	اختصار	مقدار پارامترها
اندازه جمعیت	Pop_Size	۱۲
تعداد تکرار	Max_Gen	۲۰
نرخ برش ^۱	Pc	۰.۵
نرخ جهش ^۲	Pm	۰.۱
وزن	W_1	۱
وزن	W_2	۱۰ ^۴
تعداد ویژگی انتخاب شده	N	۵

^۱ Crossover Rate

^۲ Mutation Rate

در روش مطرح شده در استفاده از الگوریتم ژنتیک، برای انتخاب ورودی در ساختار عصبی، محدودیت تعداد متغیرهای انتخاب شده وجود نداشت و از تعداد ۱ تا ۱۵ متغیر ورودی توانایی انتخاب شدن داشتند. اما در سیستم فازی ANFIS با توجه به رشد تعداد قواعد، تعداد ویژگیهای انتخاب شده می باید در یک حد قابل قبول محدود شده تا مشکل رشد نمایی تعداد قواعد و پارامترهای شبکه ایجاد نشود. از همین رو تعداد ویژگیهای انتخاب شده برای هر حالت مستقل بصورت آزمون و خطا برابر با ۵ در نظر گرفته شده است و برای هر ورودی نیز تعداد ۲ تابع تعلق مد نظر قرار گرفته است. در این حالت، حداکثر تعداد قوانین برابر با ۳۲ قانون فازی خواهد بود و کل پارامترهای آموزش پذیر ۲۱۲ پارامتر شامل مراکز دسته، واریانس و پارامترهای بخش تالی خواهد بود. در این حالت ساختار شبکه فازی ایجاد شده کوچک بوده و ضمن حفظ کارایی، قابلیت حفظ دو مقوله تفسیر پذیری و شفافیت را نیز خواهد داشت. به منظور تغییر دادن ساختار ورودیهای شبکه ANFIS، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده، در اولین گام از اجرای الگوریتم و تولید مجموعه پاسخهای تصادفی اولیه، بر روی تک تک کروموزومها بررسی انجام شده و در کروموزومهایی که تعداد ویژگیهای انتخاب شده بیش از پنج ویژگی می باشد تعدادی را به تصادف صفر کرده تا حداکثر تعداد ویژگیها برابر با پنج شود. این امر بصورت کنترل شده، به منظور جلوگیری از صفر شدن تعداد ویژگیهای انتخاب شده انجام می شود. تعداد ورودیهای در نظر گرفته شده برای هر سیستم فازی برابر با تعداد ویژگیهای انتخاب شده می باشند. در ادامه و به منظور ارزیابی هر کروموزوم موجود در جمعیت، تعداد دو تابع هدف متفاوت در نظر گرفته می شود. اولین تابع هدف (f_1) ، خطای شناسایی سیستم کوره دوار سیمان است و دومین تابع هدف تعداد ویژگیهای استفاده شده در هر کروموزوم (f_2) می باشد. در این حالت نیز هدف به دست آوردن بهترین شناسایی با کمترین تعداد ویژگی (در اینجا حداکثر ۵ ویژگی) می باشد تا بدین ترتیب علاوه بر حفظ سادگی مدل، قابلیت آن در پیش بینی فعالیت کوره سیمان نیز حفظ شود. شکل (۸) بلوک دیاگرام استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور انتخاب ویژگی برای شناساگر ANFIS را نشان می دهد. در این شکل، در بخش الگوریتم ژنتیک علاوه بر انجام عملیات برش، جهش و انتخاب که به صورت روال عادی انجام می شود، یک بخش کنترل بر روی تعداد ویژگی در جهت اصلاح کروموزومهایی با تعداد ویژگی بیش از پنج نیز وجود دارد. در این حالت به منظور تبدیل مسئله فوق به یک مسئله قابل حل توسط الگوریتم ژنتیک، تابع برازش به فرم زیر تعریف می شود:

$$W_1 f_1 + W_2 f_2 = \text{تابع برازندگی} \quad (۷)$$

که در رابطه فوق وزن های W_1 و W_2 به منظور ایجاد تعادل میان خطای حاصل از شناسایی و تعداد ویژگیهای انتخاب شده در هر

۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی‌های خروجی‌های کوره دوار سیمان، برای چهار مدل $MISO_1$ الی $MISO_4$ که به ترتیب نشان دهنده خروجی‌های جریان کشی کوره، مونوکسید کربن تولید شده در کوره، درجه حرارت عقب کوره و درجه حرارت پیش گرم کن می‌باشد، گزارش شده است. نتایج ارائه شده، حاصل اجرای مدل‌های مطرح شده با استفاده از ساختار شبکه عصبی MLP و همچنین استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور انتخاب ویژگی‌های موثر همراه با استفاده از دو ساختار شبکه عصبی MLP و ساختار عصبی-فازی ANFIS می‌باشند. برای انجام این شبیه سازی‌ها، داده‌های آموزش را برابر هفته اول نمونه برداری و ۳۰٪ از هفته دوم در نظر گرفته شده است و از مابقی داده‌های باقی‌مانده به عنوان داده آزمون مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به یادآوری است که اطلاعات ورودی به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم می‌شوند و سپس شبکه با داده‌های آموزش، آموزش داده شده و در مرحله نهایی با داده‌های آزمون خروجی شبکه بدست می‌آید.

در این شبیه سازی‌ها، در ساختار عصبی-فازی ANFIS، با توجه به رابطه بیان شده در (۷) و با توجه به اینکه از داده‌های نرمال شده استفاده شده است، به منظور ایجاد توازن مناسب میان خطای ناشی از شناسایی تعداد ویژگی‌های انتخابی، وزن مربوط به تابع هدف خطای شناسایی (W_2) ، به میزان 10^2 در نظر گرفته شده است. همچنین قابل ذکر است که وزن W_1 بر اساس نوع خروجی مورد بررسی و بازه خطای تولید شده در هر مساله به صورت متفاوت و به صورت تجربی در نظر گرفته شده است. در جدول (۵) (الف الی ت)، خطای MSE^1 برای داده‌های آزمون که بیانگر دقت نتایج حاصل برای شناسایی و پیش بینی خروجی‌های کوره دوار سیمان، با استفاده از داده‌های آزمون در سه روش متفاوت که به تفکیک در ردیف‌ها مشهود است، گزارش شده است. در جداول ارائه داده شده، منظور از $Pred.h$ افق پیش بینی در نظر گرفته شده بر حسب دقیقه می‌باشد. در این جداول، چهار افق ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه بعنوان نمونه‌هایی از افق‌های پیش‌بینی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۵: خطای MSE برای داده‌های آزمون برای خروجی‌های اول تا چهارم

کوره دوار سیمان با استفاده از سه روش مطرح شده، GA+ANFIS،

GA+MLP، MLP

الف) خروجی اول $MISO_1$ جریان کشی کوره (KA)

Pred.h (min)	1	5	10	15
MLP	2.68E-01	1.21E+00	3.64E+00	2.17E+01
GA + MLP	1.66E-01	7.92E-01	4.96E-01	7.08E-01
GA +ANFIS	2.25E-01	1.06E+00	3.17E-01	4.29E-01

ب) خروجی دوم $MISO_2$ گاز مونوکسید کربن تولید شده در کوره (CO)

Pred.h (min)	1	5	10	15
MLP	2.08E-02	8.04E-01	3.80E-01	1.27E+01
GA + MLP	7.73E-02	5.57E-01	1.88E-01	7.11E-01
GA +ANFIS	2.03E-03	3.49E-03	2.81E-03	2.41E-03

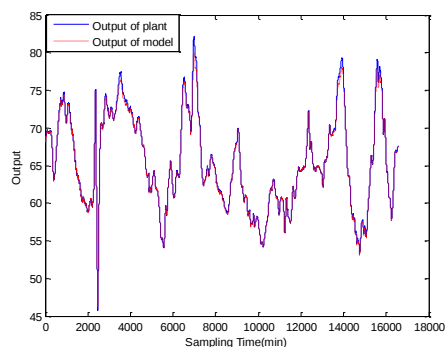
پ) خروجی سوم $MISO_3$ درجه حرارت عقب کوره (BE)

Pred.h (min)	1	5	10	15
MLP	1.57E-01	2.96E+00	4.62E+00	2.75E+01
GA + MLP	5.41E-01	2.61E+00	1.89E+00	1.03E+01
ANFIS+GA	3.92E+01	6.10E+00	6.35E+01	2.00E+01

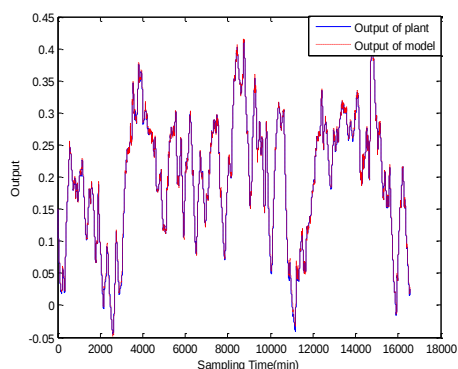
ت) خروجی چهارم $MISO_4$ درجه حرارت پیش گرم کن (Pre)

Pred.h (min)	1	5	10	15
MLP	3.30E-01	6.13E-01	2.57E+00	1.72E+01
GA + MLP	9.79E-01	4.70E-02	3.66E+00	2.08E+00
GA +ANFIS	7.25E-01	7.55E-01	8.25E-01	1.00E+00

در ادامه، نمودارهای ترسیم شده در شکل (۹) خروجی ناشی از افق پیش‌بینی ۵ دقیقه جلوتر را به ترتیب برای خروجی‌های اول تا چهارم کوره دوار سیمان در شکل‌های (الف الی ت) با استفاده از ساختار عصبی-فازی ANFIS به همراه انتخاب کننده ویژگی ژنتیک نمایش می‌دهد.



الف) خروجی اول $MISO_1$ جریان کشی کوره (KA)



ب) خروجی دوم $MISO_2$ گاز مونوکسید کربن تولید شده در کوره (CO)

¹ Mean Square Error

انتخاب ورودی ها با الگوریتم ژنتیک، تنها با انتخاب ۵ ویژگی در هر کروموزوم از ورودی ها بر اساس آنچه در بخش ۲-۴ بیان شد، به عمل شناسایی و پیش بینی وضعیت کوره دوار سیمان گزارش شده است.

جدول ۶: اسامی ورودی های اعمال شده همراه با شماره اندیس مربوطه

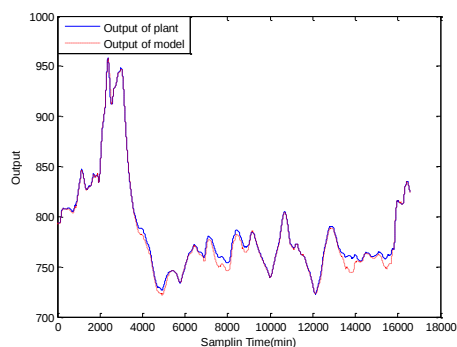
اندیس	توضیح
۱	ورودی مقدار خوراک ورودی به کوره همراه با تأخیر خالص سیستم
۲	ورودی ذکر شده در اندیس (۱) با یک گام تأخیر
۳	ورودی سوخت مصرفی کوره همراه با تأخیر خالص سیستم
۴	ورودی ذکر شده در اندیس (۳) با یک گام تأخیر
۵	ورودی دور کوره همراه با تأخیر خالص سیستم
۶	ورودی ذکر شده در اندیس (۵) با یک گام تأخیر
۷	ورودی دور فن کوره همراه با تأخیر خالص سیستم
۸	ورودی ذکر شده در اندیس (۷) با یک گام تأخیر
۹	ورودی فشار هوای ورودی به کوره همراه با تأخیر خالص سیستم
۱۰	ورودی ذکر شده در اندیس (۹) با یک گام تأخیر
۱۱	خروجی واقعی سیستم با یک گام تأخیر
۱۲	خروجی واقعی سیستم با دو گام تأخیر
۱۳	خروجی واقعی سیستم با سه گام تأخیر
۱۴	خروجی واقعی سیستم با چهار گام تأخیر
۱۵	خروجی واقعی سیستم با پنج گام تأخیر

جدول ۷: اندیس های انتخاب شده توسط الگوریتم ژنتیک با استفاده از دو روش شبکه عصبی و سیستم عصبی-فازی برای خروجی های اول تا چهارم کوره دوار سیمان

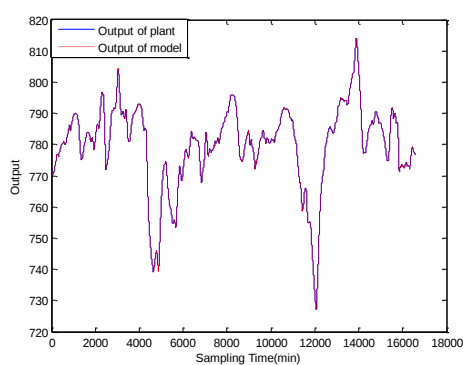
الف) خروجی اول $MISO_1$ جریان کشتی کوره (KA)				
Pred.h (min)	1	5	10	15
GA + MLP	1, 2, 7, 8, 9, 10, 11	1, 5, 7, 8, 11, 12	3, 4, 6, 7, 9, 13	2, 3, 5, 7, 8, 9, 12
GA +ANFIS	6, 11, 12, 13	3, 5, 6, 11, 12	4, 5, 8, 11, 13	3, 5, 7, 11, 12

ب) خروجی دوم $MISO_2$ گاز مونوکسید کربن تولید شده در کوره (CO)				
Pred.h (min)	1	5	10	15
GA + MLP	1, 6, 8, 10, 11, 12	1, 3, 6, 8, 11, 12, 13	1, 5, 7, 8, 10, 11, 14	1, 2, 5, 7, 8, 10, 14
GA +ANFIS	1, 2, 11, 12	1, 2, 5, 11, 12	1, 2, 11, 12, 14	1, 2, 4, 11, 12

پ) خروجی سوم $MISO_3$ درجه حرارت عقب کوره (BE)				
Pred.h (min)	1	5	10	15
GA + MLP	2, 3, 5, 6, 7, 9, 12, 13	3, 5, 6, 8, 9, 11, 13	1, 2, 3, 4, 5, 9, 11, 13	1, 5, 7, 10, 11, 12, 13
GA +ANFIS	7, 8, 11, 13	7, 9, 11, 13	4, 6, 9, 11, 13	4, 8, 10, 11, 12



پ) خروجی سوم $MISO_3$ درجه حرارت عقب کوره (BE)



ت) خروجی چهارم $MISO_4$ درجه حرارت پیش گرم کن (Pre)

شکل ۹: عملکرد سیستم عصبی-فازی برای داده های آزمون برای خروجی های اول تا چهارم کوره دوار سیمان در دومین افق پیش بینی برابر ۵ دقیقه در هریک از شبیه سازی های انجام شده، ورودی های اعمالی که ویژگی های انتخاب شده توسط الگوریتم ژنتیک می باشند به ترتیب شامل: ورودی های واقعی سیستم کوره دوار سیمان همراه با تأخیر خالص سیستم، دینامیک ورودی های واقعی سیستم با یک گام تأخیر و در نهایت خروجی های واقعی سیستم تا ۵ گام عقب تر می باشند که در مجموع تعداد ۱۵ متغیر ورودی را تشکیل داده که اسامی این متغیرهای با شماره اندیس مربوطه در جدول (۶) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از پیاده سازی الگوریتم ژنتیک به منظور انتخاب زیر مجموعه مناسبی از ویژگی های موثر برای دو روش شبکه عصبی و سیستم عصبی-فازی برای خروجی های اول تا چهارم کوره دوار سیمان به ترتیب در جدول (۷) (الف الی ت) نشان داده شده است که اندیس های نامبرده بر اساس موارد مطرح شده در جدول (۶) ارائه شده اند. لازم به ذکر است که تأخیر خالص ورودی ها بر هریک از خروجی های مورد نظر بر حسب دقیقه، در جدول (۳) آورده شده است. در این حالت الگوریتم ژنتیک به منظور انتخاب زیر مجموعه ای مناسب از ورودی ها با کمترین تعداد ویژگی و بیشترین بازده شناسایی برای داده های آزمون، مورد استفاده قرار می دهیم. در استفاده از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب ورودی های مناسب در ساختار عصبی محدودیت تعداد متغیرهای انتخاب شده وجود نداشت و از تعداد ۱ تا ۱۵ متغیر ورودی توانایی انتخاب شدن داشتند، در حالیکه نتایج شبیه سازی خروجی های کوره دوار سیمان با استفاده از ساختار ANFIS به همراه

ت(خروجی چهارم MISO₄ درجه حرارت پیش گرم کن (Pre)

Pred.h (min)	1	5	10	15
GA + MLP	1, 2, 6, 9, 10, 12, 13	2, 7, 8, 9, 11, 12	1, 2, 4, 7, 9, 10, 11, 12, 13	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 15
GA +ANFIS	5, 7, 11 12	4, 6, 11, 12, 15	4, 6, 11, 12, 15	4, 6, 11, 12, 15

نخستین مراتب اهمیت در صنعت قرار داشته است. یکی از اهمیت‌های بسیار زیاد نتایج برگرفته از این پژوهش، کاربرد‌های متفاوت روش‌های عصبی و عصبی-فازی به جهت پیش‌بینی، شبیه-سازی و شناسایی سیستم-های پیچیده در صنعت است.

به منظور شناسایی این فرآیند، زمان نمونه برداری مناسب، برطرف کردن نویز، نرمالیزه کردن داده‌ها و تخمین تأخیر ورودی‌ها امری ضروری است. از طرف دیگر بدون انتخاب پارامترهای مناسب و مؤثر شناسایی خوبی روی سیستم صورت نخواهد پذیرفت. بعد از انجام عملیات پیش-پردازش روی داده‌ها و بدست آوردن داده‌های غنی شده، شواهد برآمده از این پژوهش نشان دهنده رفتار مناسبی بین داده‌های بدست آمده از داده‌های واقعی ضبط شده در کوره سیمان می‌باشد. در این نوشتار برای تعیین اثر روش عصبی-فازی بعنوان روشی شناخته شده برای مدل‌سازی فازی، یک سیستم استنتاج فازی با توپولوژی ANFIS مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به مسأله رشد نمایی تعداد قوانین در سیستم فازی، تعداد متغیرهای انتخابی را به پنج متغیر محدود نمودیم و در نهایت توانستیم با وجود محدود بودن تعداد ورودی‌ها، شناساگر کارآمدی برای شناسایی فرآیند کوره دوار سیمان که از مدل‌های دنیای واقعی با درجه پیچیدگی بالا می‌باشد را با توانایی انعطاف پذیری مناسب ایجاد نماییم. علاوه بر اینکه خروجی حاصل از مدل، خروجی سیستم واقعی را به خوبی ردیابی می‌کند، توانسته با حداقل تعداد ممکن و قوانین فازی موجود شناسایی پیش‌بینی مناسبی را در چهار افق پیش‌بینی ۱۰، ۵، ۱ و ۱۵ دقیقه جلوتر داشته باشیم که این امر برای کنترل و طراحی کنترل کننده‌ها امری ضروری و مفید است.

در هر حال روش‌های ارائه شده و بکار رفته در این پژوهش ممکن است قابلیت استفاده در شناساگرهای دیگری در سیستم‌های غیر خطی دینامیکی مشابه و مهم در صنعت مانند کوره رنگ و غیره قابل اعمال باشد.

مراجع

- [۱] م. عزیزیان، "تکنولوژی پخت سیمان"، چاپ سوم، شرکت مهندسی و قطعات سیمان ایران ۱۳۸۵.
- [2] K. Pazand, M. Shariat Panahi and M. Pourabdoli, "Simulating the mechanical behavior of rotary cement kiln using artificial neyral networks", Elsevier Ltd. Material and Design, Vol.30, pp. 3486-3473, 2009.
- [3] K. S. Stadler, J. Poland and E. Gallestey, "Model predictive Control of a rotary cement kiln", Elsevier Ltd. Control Engineering practice, 2010.
- [4] G. Noshirvani, A. Fatahi, B. N. Araabi and M. Azizi, "Comparison of Rotary Cement Kiln Identified Models", Proceedind of the IEEE International Conference on Control and Automation, pp. 1290-1295, 2009.

۶- نتیجه گیری

در این نوشتار شناسایی و پیش‌بینی، فرآیند کوره دوار سیمان بعنوان یک سیستم پیچیده غیرخطی متغیر با زمان تحقیق و بررسی قرار گرفت. همانطور که اشاره شد استفاده از مجموعه کلی متغیرهای ورودی سبب و پیچیدگی فراوان ساختاری و حافظه شبکه عصبی-فازی و ایجاد پارامترهای زیادی خواهد شد که این امر سبب می‌شود تا پیاده سازی ساختار عصبی-فازی غیرممکن بنظر می‌رسد. لذا در این پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک و انجام مجموعه‌ای از پیش پردازش‌های مناسب به روش قابل قبولی برای شناسایی و پیش‌بینی دست یافتیم. بر اساس الگوریتم ژنتیک ورودی‌های مؤثر در هر مدل را از میان ورودی‌های مناسب انتخاب نمودیم که این روش باعث کاهش تعداد ورودی‌ها و همچنین کاهش ساختار شبکه عصبی-فازی گردید که در نتیجه باعث کاهش تعداد قوانین فازی شد. شناسایی چنین سیستم‌هایی همیشه در

-
- [11] J. R. Jang, "ANFIS: Adaptive Network based Fuzzy Interface System," IEEE Tran. System, Man and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, 1993, pp. 665-685, 1993.
- [12] Ho-Duck Kim, Chang-Hyun Park, Hyun-Chang Yang, and Kwee-Bo Sim, "Genetic Algorithm Based Feature Selection Method Development for Pattern Recognition," in SICE-ICASE International Joint Conference, 2006.
- [13] Z. Sun, G. Bebis and R. Miller, "Object Detection Using Feature Selection," Elsevier Ltd. Pattern Recognition, Vol. 37, pp. 2165-2176, 2004.
- [14] A. Fatemimoghadam, "Identification and prediction of a cement rotary Klin using fuzzy neural networks mid feature selection by Genetic Algorithm", MSc Thesis (in persian), Science and researches branch of Islamic Azad University, Tehran, Iran, 2010.
- [15] www.wikipedia.com
- [5] M. Fallahpour, A. Fatehi, B.N. Araabi and M. Azizi, "A Neuro-Fuzzy Controller for Rotary Cement kiln," the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- [6] I. Makaremi, A. Fatehi and B.N. Araabi, "Lipschitz Numbers: A Medium for Delay Estimation," 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- [7] Nelles. Nonlinear System Identification. Springer publication, 2000.
- [8] M. Fallahpour, A. Fatahi, B. N. Araabi and M. Azizi, "Identification of Rotary Cement Kiln by Neural Networks", Proceedind of the 8th Conference on Intelligent Systems(CIS), Mashhad, Iran, 2007.
- [9] L. Ljung, "System Identification Theory for the Users", 2nd Edition, Prentice-Hall, 1999.
- [10] I. Makaremi, A. Fatehi and B.N. Araabi, "Abnormal condition detection in cement rotary kiln with system identification methods", Elsevier Ltd. Journal of Process Control, Vol 19, pp. 1538-1545, 2009.