طراحی، پیاده سازی و استقرار سیستم پایش پیش بینی کننده انتشار گاز دودکش نیروگاه ها

سعید نظری[۱*], سعید محمودی[۲], مهسا علایی[۲] , ارد احمدی[۳], امیر سهرابی کاشانی[٤]
رامین پایدار[٤], پیمان پورمقدم[٤], رامین فخری[٥], آرش کوکب پیک[٦]

۱*-عضو هیات علمی گروه محیط زیست، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
۲-کارشناس پژوهشی گروه الکترونیک و ابزار دقیق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
۳- عضو هیات علمی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۴- کارشناس پژوهشی گروه محیط زیست، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
۵- کارشناس پژوهشی گروه پایش و کنترل نیروگاه، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
۶- کارشناس گروه محیط زیست، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
*ایمیل نویسنده مسئول : snazarikudahi@nri.ac.ir
تاریخ دریافت : ۹۹/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش : ۹۹/۰۳/۲۵

چکیده

پروژه "طراحی، پیاده‌سازی و استقرار سیستم پایش پیش‌بینی کننده انتشار گاز دودکش نیروگاه ها (PEMs)" در پژوهشکده انرژی و محیط زیست پژوهشگاه نیرو تعریف و اجرا گردیده است. مراحل اجرای پروژه مشتمل بر بررسی مستندات علمی و استاندارد های مرتبط با سیستم PEMs ، طراحی و معماری سیستم PEMs ، پیاده سازی سیستم PEMs بر اساس اطلاعات بهره برداری سیستم و داده های اندازه گیری بصورت پیوسته یک نیروگاه بخاری منتخب، استقرار و راه اندازی و بهره برداری از سیستم PEMs بوده است. بعد از نصب سیستم PEMs ، مقادیر واقعی نشر گازهای حاصل از احتراق مشتمل بر NO، SO_2، CO، CO_2 و O_2 اندازه گیری شده و با نتایج حاصل از سیستم مذکور مقایسه شد. در شرایط بهره برداری عادی میزان انتشار پیش بینی شده گاز ها بجز گاز CO دارای انحراف کمتر از ۱۰٪ نسبت به مقادیر اندازه گیری شده بوده و عدم قطعیت اندازه گیری در حدود ۴٪ ± مقدار اندازه گیری شده می باشد.

کلمات کلیدی

"سیستم پایش مداوم انتشار","سیستم پایش پیش بینی کننده انتشار ", " اندازه گیری گازهای حاصل از احتراق", " نیروگاه بخاری"

Designing, engineering and establishing predictive emission monitoring system for power plants

Saeed Nazari[1,*], Saeed Mahmoodi[2], Mahsa Alaei[2], Orod Ahmadi[3], Amir Sohrabi Kashani[4], Ramin Paydar[4], Peyman Pourmoghaddam[4], Ramin Fakhri[5], Arash Kokabpeyk[6]

1*.Faculty member of Environment Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
2.Research Staff of Electronic and Instrument Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
3 .Faculty member of Kharazmi University, Tehran, Iran.
4.Research Staff of Environment Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
5.Research Staff of Power Plant Monitoring and Control Group,Niroo Research Institute,Tehran, Iran.
6 .Staff of Environment Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
*Email Address: snazarikudahi@nri.ac.ir

Abstract

The project entitled "designing, engineering and establishing predictive emission monitoring system for power plants (PEMs)" was described and accomplished by energy and environment research center of Niroo Research Institute. The literature review related to Predictive Emission Monitoring system, designing and engineering of PEMs for power plants, implementation of PEMs for power plants, installation of PEMs for power plants, operation of Predictive Emission Monitoring system for power plants and the performance report of PEMs for power plants were the steps of this project. The predictive emission monitoring of the flue gas components at the selected steam power plant including, NO،SO_2،CO,CO_2,O_2 was modeled and estimated. According to the results of this project it was found that the relative error of of the flue gas components except CO was fewer than 10% in comparison with the measured values. The uncertainty of estimation for Predictive Emission Monitoring system was calculated to be ±4% of measured value.

Keywords

"Continuous emission monitoring systems","Predictive Emission Monitoring Systems", "Flue Gas Analysis", "Steam Power Plant"

۱- مقدمه

استفاده از سیستم های پایش مداوم انتشار جهت اندازه گیری میزان گاز های حاصل از احتراق خروجی از دودکش نیروگاه ها و سایر صنایع در اوایل دهه ۷۰ میلادی رایج گردیده است. اما استفاده از این سیستم ها دارای مشکلاتی نظیر هزینه سرمایه گذاری بالا جهت نصب و راه راندازی و بهره برداری، مشکلات ناشی از تعمیر و نگهداری ، مشکل عدم وجود اطلاعات اندازه گیری و حذف شدن آنها در بعضی اوقات و تاخیر پاسخ در شرایط مختلف آب و هوایی می باشد. لذا شرکت های فناور در دنیا به منظور حل این مشکلات سیستم جدیدی تحت عنوان سیستم Predictive Emission Monitoring System توسعه دادند (نظری، ۱۳۹۶). این سیستم ها از داده های فرآیندی و سایر پارامترها به عنوان ورودی های یک نرم افزار کامپیوتری جهت پیش بینی میزان انتشار استفاده می کنند. این سیستم بر اساس بهره گیری از پارامترهای بهره برداری سیستم ها و تجهیزات احتراقی از طریق استفاده از روش های آماری و یا استفاده از ترمودینامیک و سینتیک واکنش ها جهت تهیه یک مدل ریاضی که قادر به پیش بینی مقادیر انتشار در قالب یک برنامه نرم افزای است ، کار می کند. اجزاء قالب در سیستم های PEMS عبارتند از سنسور های اندازه گیری پارامتر های محیطی، سنسور های بهره برداری توربین گازی و بویلر ، یک برنامه نرم افزاری بر پایه استفاده از سینتیک و ترمودینامیک واکنش ها و یا مدل های آماری و یک سیستم ذخیره سازی و گزارش دهی اطلاعات می باشد (نظری، ۱۳۹۶). دولت فدرال آمریکا و بیش از ۱۸ ایالت در این کشور سیستم PEMs را به عنوان یک سیستم پایش مداوم جهت استفاده در بازار نشر آلاینده های گازی به رسمیت شناخته اند. همچنین کشورهای امارات متحده عربی ، استرالیا، کانادا ، دانمارک ، هلند و سوئد این سیستم را برای استفاده در سیستم های پایش آلودگی هوا به رسمیت شناخته اند. در راستای اجرای بند ۵ سیاست های کلی کشور در حوزه محیط زیست مبنی بر "پایش مستمر و کنترل منابع و عوامل آلاینده هوا، آب، خاک، آلودگی‌های صوتی، امواج و اشعه‌های مخرب و تغییرات نامساعد اقلیم و الزام به رعایت استانداردها و شاخص‌های زیست محیطی در قوانین و مقررات، برنامه‌های توسعه و آمایش سرزمین" و سیاست های اقتصاد مقاومتی کشور لازم و ضروی است که جایگاه علمی و فنی کشور خصوصاً صنعت برق کشور در حوزه طراحی و ساخت سیستم مختلف پایش مداوم ارتقاء یابد به این منظور پروژه " طراحی، پیاده‌سازی و استقرار سیستم پایش پیش‌بینی کننده انتشار گاز دودکش نیروگاه ها" برای اولین بار در کشور به کارفرمایی شرکت توانیر در گروه محیط زیست پژوهشگاه نیرو تعریف و اجرا شد. استفاده از سیستم های PEMs دارای فواید به شرح ذیل می باشد (نظری، ۱۳۹۶) :

- هزینه نصب و بهره برداری از این سیستم ها ۲۵ تا ۵۰ درصد ارزان تر از سیستم های CEMs متداول می باشد.
- نصب و بهره برداری آن سریعتر و هزینه تعمیر و نگهداری آن نسبت به سیستم های CEMs کمتر می باشد.
- نیازی به گازهای کالیبره ندارد.
- قطعات یدکی استفاده نمی شود (در سیستم های پایش مداوم متداول ۱۰٪ کل قیمت سیستم صرف هزینه تهیه قطعات یدکی می شود).
- صحت نتایج اندازه گیری به میزان سیستم های پایش مداوم متداول می باشد.
- راه اندازی سیستم های PEMs در مقایسه با سیستم های CEMs سریعتر می باشد.
- زمان در دسترس بودن سیستم های PEMs در مقایسه با سیستم های CEMs بیشتر (در حدود ۹۹٪) می باشد.
- با توجه به الزام نصب CEMs برای تمامی نیروگاه ها جهت اندازه گیری لحظه ای آلاینده های خروجی دودکش نیروگاه ها ، هر واحد نیاز به نصب یک CEMs دارد .

از آنجایی که سیستم های متداول گرانقیمت هستند امکان نصب در تمامی واحد ها وجود نداشته لذا استفاده از PEMs نیاز به خرید دستگاه های گرانقیمت CEMs را برای هر واحد نیروگاهی مرتفع می نماید.

۲- مستندات علمی و استاندارد های سیستم PEMs

- **استاندارد های سیستم PEMs**

دستورالعمل های موجود درباره واحدهای احتراقی بزرگ بیانگر آن است که استانداردهای کیفی برای سامانه‌های پیش‌بینی آلاینده PEMs به سه دسته تقسیم می‌شوند (نظری، ۱۳۹۶). اولین دسته دستورالعمل‌هایی هستند که شرایط اندازه‌گیری‌ها و انجام آزمون‌های مرجع را برای پایش و کالیبراسیون توصیف می‌کنند. این آزمون‌ها در استانداردهای EPA آمریکا و CEN اتحادیه اروپا (Netherlands technical agreement, 2012)، منطبق با استانداردهای تعریف‌شده برای سیستم پایش مداوم CEM است. تعداد زیادی از این استانداردها مشخصات کیفی انجام آزمون‌های مرجع را توصیف کرده‌اند (نظری، ۱۳۹۶). دومین دسته، دستورالعمل‌های هستند که مشخصات کیفی جامعی برای هر دو روش پایش غیر پیوسته و روش پایش پیوسته بر اساس میزان مجاز عدم قطعیت به‌صورت درصدی از مقدار حد انتشار (ELV) را بیان می‌کنند. میزان مجاز عدم قطعیت‌ها بر اساس سطح اطمینان ۹۵٪ جهت بیان دقت و صحت ارائه می‌شوند. نظیر استاندارد EN 14181 (BS.EN.14181, 2004) و استاندارد CFR 40 Part 75 که مشخصات کیفی و استانداردهای کنترل کیفیت سامانه‌های پایش غیر پیوسته جایگزین سیستم CEM و سیستم پایش پیوسته CEM را تشریح کرده‌اند (نظری، ۱۳۹۶). دسته سوم استانداردهایی هستند که به‌طور اختصاصی برای سامانه‌های پیش‌بینی آلاینده PEMs طراحی‌شده و مشخصات عملکردی این سیستم ها را ارائه کرده‌اند (U.S Federal Register, 2015). در جدول ۱ مهم‌ترین استانداردهای مطرح و مرتبط با سامانه‌های پیش‌بینی آلاینده PEMs ارائه می شوند (نظری، ۱۳۹۶) .

جدول ۱- خلاصه استانداردهای ارائه‌شده برای سیستم PEM

عنوان استاندارد	کشورهای استفاده‌کننده	محدوده استفاده استاندارد
CFR 40 Part 60 PS16	ایالات متحده آمریکا خاورمیانه و آسیا	دستگاه‌های PEMS
CFR 40 Part Subpart E،75	ایالات متحده آمریکا	کلیه سامانه‌های جایگزین CEM
NTA 7379	هلند، کشورهای اروپایی	سامانه‌های PEMS
EN 14181	کشورهای اروپایی	سامانه‌های CEM و PEMS

- **روش های کلی مدل سازی PEMs**

بطور کلی دو گرایش کلی جهت مدل سازی در مقالات و مستندات علمی به منظور پیاده سازی سیستم های PEM در نیروگاه ها و یا سایر واحد های بزرگ احتراقی وجود دارد که عبارتند از (نظری، ۱۳۹۶):

۱- اصول اولیه

۲- روش های تجربی

به سبب پیچیدگی ذاتی واکنش های که منجر به تولید آلاینده های گازی می شوند مدل های اولیه چنان پیچیده می شوند که حل آنها بسیار مشکل و زمان بر می گردد. در مقابل در صورت وجود داده های قبلی (پیشینه اطلاعات انتشار) و نیز وجود داده های عملکرد سیستم در سیستم DCS و یا Data Acquisition System نیروگاه ها مدل های تجربی با سهولت بسیار بیشتری قابل پیاده سازی هستند. مراحل ساخت یک مدل ریاضی برای استقرار و پیاده سازی یک سیستم PEM در یک نیروگاه به شرح ذیل می باشد (نظری، ۱۳۹۶):

۱- بررسی دیدگاه کلی مقالات در مدل‌سازی

۲- بررسی انواع مدل‌سازی‌های انجام‌شده

۳- انتخاب روش

۴- تعیین متغیرهای مستقل ورودی مشتمل بر: متغیرهای مورد استفاده در مقالات و متغیرهای موجود در نیروگاه

- آنالیز حساسیت
- حذف متغیرهایی که موجب پیچیدگی و کندی مدل می‌شود.
- حذف متغیرهایی که مدل را از عمومیت خارج می‌کند.

۵- طراحی آزمون‌های خاص در صورت لزوم

۶- محاسبه پارامترهای مدل با آموزش و ارزیابی

- با استفاده از بخشی از داده‌های موجود
- با استفاده از داده‌های جدید

۷- پیاده‌سازی فیلترهای اندازه‌گیری (آنلاین) یا تحلیلی (آفلاین) با توجه به نوع اشکالات داده‌ها

۸- پیاده‌سازی نهایی مدل

- **شرکت های تجاری ارائه دهنده سیستم PEMs**

شرکت های تجاری مختلفی در دنیا در زمینه استقرار سامانه های پایش پیش بینی کننده انتشار گاز دودکش نیروگاه ها فعالیت می کنند که مهمترین آنها به شرح ذیل می باشند (نظری، ۱۳۹۶):

شرکت Weel & Sandvig یک شرکت پیشرو و نوآور در ارائه سامانه‌های PEM در دنیا با کاربرد در زمینه‌های نفت و گاز، تولید انرژی الکتریکی، صنایع غذایی، کاغذ و مواد شیمیایی است. به‌طورکلی مدل‌سازی برای سامانه‌های PEM در این شرکت بر دو نوع است (WEEL-SANDVIG,2015):

- داده محور: استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)
- اصول اولیه: بر مبنای ترمودینامیک و برهم‌کنش جنبشی

شرکت CMC Solutions یکی از شرکت‌های پیشرو درزمینه‌ی سامانه‌های PEM در دنیا است. این شرکت در ایالت میشیگان آمریکا قرار دارد و دارای نمایندگی‌های متعددی در سراسر جهان است. سامانه‌های تولیدشده شرکت CMC Solutions در کشورهای آسیایی مثل مالزی، فیلیپین، سنگاپور، کره، عربستان سعودی، چین و امارت متحده عربی نصب شده است. سامانه های PEM این شرکت به‌طورکلی از دو روش مدل‌سازی برای تخمین غلظت گازهای منتشرشده استفاده می کنند (CMC Solutions, 2015):

- روش تئوری- مدل پارامتری یا اصول اولیه
- روش پیش‌بین تجربی- شبکه عصبی یا روش Statistical Hybrid

شرکت ABB یک شرکت چندملیتی است که مقر اصلی آن در زوریخ سوئیس قرار دارد و یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های مهندسی در جهان محسوب می‌شود. این شرکت در زمینه‌های مختلفی ازجمله رباتیک، انرژی و فن‌آوری اتوماسیون فعالیت می‌کند. این شرکت همچنین درزمینه‌ی سامانه‌های تجاری پایش انتشار آلایندگی (CEMS & PEMS) فعالیت می‌کند. سامانه‌های PEM این شرکت به‌طور گسترده در اروپا، آمریکا و آسیا به‌کاربرده شده است. سامانه‌های PEM می‌توانند به‌صورت تئوری و یا به‌صورت تجربی مدل‌سازی گردند. شرکت ABB مدل‌سازی سیستم پیش‌بین خود را با استفاده از روش تجربی یا داده محور توسعه داده است و آن را Optimize Inferential Modeling Platform (IMP) نام نهاده است (ABB,2015).شرکت Rockwell Automation یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های تخصصی در زمینه اتوماسیون صنعتی است. برندهای محصولات این شرکت Allen-Bradley و Rockwell Software است. دفتر مرکزی این شرکت در تگزاس آمریکا قرار دارد. این شرکت به صنایع سوخت‌های زیستی، صنایع سیمان، مواد معدنی و کانی، صنایع شیمیایی، صنایع گاز و نفت، صنایع پلیمری، محیط‌زیست،کاغذ، انرژی و آب و فاضلاب خدمات ارائه می‌دهد. روش مدل‌سازی نرم‌افزار این شرکت ترکیبی از مدل‌های تجربی غیرخطی همراه با مدل‌های اصول اولیه است تا مدل‌ها دقت بسیار بالایی داشته باشند. در اعتبار سنجی مدل مقادیر مشخص به‌عنوان ورودهای حس‌گر اعمال می‌گردد و خروجی‌های مشخصی توسط نرم‌افزار باید داده شود (ROCKWELL.AUTOMATION, 2013). شرکت GE، نرم‌افزار PEMS خود را به‌عنوان بخشی از بسته نرم‌افزاری به نام System 1 ارائه می‌کند که به طور اختصاصی تنها برای توربین‌های گازی مدل LM2500 با پیکربندی‌هایSAC و DLE، و توربین‌های گازی مدل LM6000 با پیکربندی SAC طراحی شده است. مدل پیش‌بین شرکت GE بر مبنای اصول اولیه و اطلاعاتی که در طول سالیان متمادی از تست‌های این مدل توربین‌های گاز جمع‌آوری‌شده، توسعه داده شده است (GE,2015). شرکت CleanAir یک شرکت مشاوره‌ای و خدماتی است که زمینه‌های مشاوره/مدیریت کیفیت هوا، سامانه‌های CEMS/PEMS، مدیریت گازهای گلخانه‌ای، مانیتورینگ جیوه، سنجش آلایندگی‌های هوا و اجاره سامانه‌های پایش به‌طور موقت و ... از حوزه‌های گسترده فعالیت این شرکت است. شرکت Tecnatom یک شرکت مهندسی است که ارائه خدمات خود را درزمینهٔ صنعت هسته‌ای از زمان تأسیس در سال ۱۹۵۷ آغاز کرده است و بازارهای آن در حوزه‌های انرژی هسته‌ای ، نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی، هوافضا، حمل‌ونقل و پتروشیمی است. مالکین Tecnatom نیروگاه‌های برق اسپانیا علاقه‌مند به نیروگاه هسته‌ای کشور می‌باشند. این شرکت در طول دهه گذشته در بیشتر از ۳۰ کشور دارای نیروگاه هسته‌ای ازجمله امریکا، ژاپن، روسیه و... پروژه انجام داده است. فنّاوری مورداستفاده در این سامانه‌های پیشرفته، شبکه‌های عصبی و Fuzzy Logic است. بنا به اظهارات شرکت این نرم‌افزار می‌تواند از اطلاعات DCS یا DAS موجود استفاده نماید و معماری آزاد آن امکان یکپارچه‌سازی آن را با DCS یا

DAS به‌راحتی فراهم می‌سازد (TECNATOM, 2015). شرکت مشاوره‌ای BP در زمینه‌های مدیریت بحران، مدیریت محیط‌زیست، مدیریت بهداشت و ایمنی و سیستم پایش پیش‌بینی کننده آلاینده‌ها (PEMS) خدمات ارائه می‌دهد. دفتر مرکزی این شرکت در کویت قرار دارد. نرم‌افزار پایش پیش‌بین این شرکت می‌تواند قسمتی از بسته نرم‌افزاری Environmental Management Solution باشد. مدل این نرم‌افزار Statistical Hybrid است که توانایی ارتباط با سرورها و PLC های یک نیروگاه برای دریافت اطلاعات را دارا است (BP.CONSULTANCY, 2015).

۳- طراحی و معماری سیستم PEMs

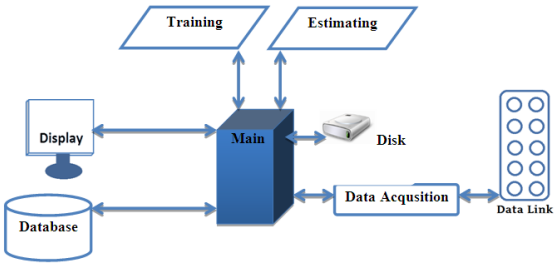
امکانات سخت‌افزاری لازم برای سیستم پایش پیش بینی کننده انتشار گاز دودکش بر اساس پارامترهای مورد نیاز سیستم نرم افزاری باید تعیین شود سپس این پارامترها با اطلاعات حس‌گرهایی که توسط سیستم ابزار دقیق نیروگاه جمع‌آوری می‌گردند مقایسه گردد تا در صورت عدم اندازه‌گیری پارامتر مورد نظر در سیستم ابزار دقیق فعلی، نسبت به خریداری حس‌گرهای مورد نیاز و نصب آن‌ها اقدام شود. پارامترهای مورد نیاز نرم‌افزار سیستم پایش پیش بینی کننده انتشار نیروگاه ها بر اساس اطلاعات اخذ شده از نیروگاه منتخب به شرح زیر است (نظری، ۱۳۹۶):

- دمای دود در اکونومایزر
- دمای دودکش
- درجه حرارت در نقطه نصب دبی سنج هوای احتراق
- فشار در نقطه نصب دبی سنج هوای احتراق
- جریان حجمی هوای احتراق
- جریان جرمی هوای احتراق
- جریان حجمی سوخت (به تفکیک گاز و مازوت)
- جریان جرمی سوخت (به تفکیک گاز و مازوت)
- فشار سوخت در محل اندازه‌گیری دبی حجمی سوخت (به تفکیک گاز و مازوت)
- دمای سوخت در محل اندازه‌گیری دبی حجمی سوخت (به تفکیک گاز و مازوت)
- میزان تزریق آب یا بخار در سوپر هیتر و ری هیتر
- بار نیروگاه (مگاوات اکتیو)
- میزان آب به‌عنوان خوراک ورودی
- فشار بخار
- دبی جرمی بخار تولیدشده

با توجه به اطلاعاتی که از نیروگاه منتخب گرفته شد، تمامی پارامترهای فوق توسط شبکه ابزار دقیق نیروگاه اندازه‌گیری و توسط نرم‌افزار Dimon جمع‌آوری و ذخیره می‌گردند. درنتیجه نیازی به تهیه و نصب حس‌گر اضافی در نیروگاه نیست. در صورت نیاز به وجود حس‌گر اکسیژن، در بازدید از نیروگاه مشخص شد که می‌توان از ظرفیت‌های خالی موجود بر روی کارت‌های ورودی آنالوگ استفاده نمود. بدین منظور باید تنظیمات نرم‌افزاری واحد PU که وظیفه جمع‌آوری اطلاعات کارت‌های آنالوگ را بر عهده دارد مجدداً برنامه‌ریزی نمود تا این اطلاعات توسط نرم‌افزار ابزار دقیق نیروگاه به‌درستی قابل دریافت باشد. بنابراین با اطلاعات اخذ شده از نیروگاه به نظر می‌رسد پارامترهای موردنیاز نرم‌افزار پایش پیش‌بین توسط حس‌گرها و سیستم ابزار دقیق فعلی نیروگاه قابل‌اندازه‌گیری و دستیابی می‌باشند و نیازی به تمهیدات خاص سخت‌افزاری وجود ندارد. در انتخاب سخت‌افزار سیستم پایش دو رویکرد می‌توان اختیار کرد. رویکرد اول استفاده از کامپیوترهای صنعتی و رویکرد دوم استفاده از کامپیوترهای غیر صنعتی یا معمولی است. کامپیوترهای صنعتی جهت استفاده در محیط‌های صنعتی پر گرد و غبار، با رطوبت بالا و آلوده استفاده می‌شوند. قطعات و مواد بکار رفته در ساخت کامپیوترهای صنعتی از درجه صنعتی است. سیستم خنک کاری کامپیوترهای صنعتی معمولاً بدون فن است و هیچ‌گونه ارتباطی با محیط بیرونی ندارند (نظری، ۱۳۹۶). در عوض این کامپیوترها از قیمت بسیار بیشتری نیز نسبت به کامپیوترهای معمولی برخوردارند و قابلیت‌های سخت‌افزاری همانند قدرت و حافظه پردازشی و ذخیره‌سازی آن‌ها می‌تواند محدودتر باشد. در بازدیدی که از نیروگاه به عمل آمد، مکان مناسب برای قرارگیری سیستم پایش از دیدگاه کارشناسان نیروگاه بخش کنترل نیروگاه است. که درواقع سیستم فعلی پایش مداوم CEM نیروگاه نیز در این مکان واقع‌شده است. ازنظر شرایط محیطی بخش کنترل نیروگاه دارای شرایط مناسبی ازلحاظ عدم وجود گردوغبار و رطوبت و سایر آلاینده‌ها است. در نتیجه سیستم سخت‌افزاری نیازمند در نظر گرفتن شرایط کار خاص مانند برخورداری از یک کلاس IP مشخص نیست. کلاس IP تعیین‌کننده شرایط محیطی از قبیل مقاومت در برابر آلاینده‌هایی مانند گردوغبار و یا پاشش آب و ارتعاش و ضربه است که دستگاه باید در برابر آن مقاومت داشته باشد و یا حفاظت مناسب از آن صورت گیرد. ملاحظات حفاظتی یک سیستم در مقابل نفوذ انواع آلاینده‌ها و اجرام خاص و آب و رطوبت در استانداردهای بین‌المللی تعریف‌شده است و هر سخت‌افزار سیستمی باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد که با مکان و فضای مورداستفاده سازگاری داشته تا بتواند به نحو مطلوب مورد بهره‌برداری قرار گیرد. با توجه به موارد گفته‌شده استفاده از یک سیستم کامپیوتری غیر صنعتی بدین دلیل که این سیستم در فضای باز نصب نمی‌شود و در یک محیط صنعتی پر گردوغبار و دارای رطوبت بالا و آلوده استفاده نمی‌گردد مناسب به نظر می‌رسد (نظری، ۱۳۹۶). این امر در کاهش قیمت سخت‌افزار سیستم مؤثر است. همچنین سیستم به یک کارت شبکه برای برقراری ارتباط از طریق TCP/IP با نرم‌افزار Dimon و دریافت اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط حس‌گرها نیازمند است (نظری، ۱۳۹۶). نرم‌افزار طراحی شده سیستم پایش پیش بینی کننده انتشار باید قادر باشد داده‌های فرایندهای نیروگاهی را دریافت کند و با به کار بردن مدل موجود، میزان آلاینده‌های خروجی را محاسبه و اعلام نماید. مدل موجود حاصل یک فرایند آموزشی در نرم‌افزار است که در مرحله یادگیری و با استفاده از داده‌های واقعی آلاینده‌ها تولید شده است. در تحلیل سیستم از دیدگاه کاربر عمل می‌شود یعنی خدمات در نظر گرفته شده برای کاربر بررسی می‌گردد (نظری، ۱۳۹۶). خدمات در نظر گرفته‌شده برای کاربر تمامی خدمات یا سرویس‌هایی است که انتظار می‌رود سیستم به کاربر ارائه دهد که شامل توانایی‌هایی است که نرم‌افزار به کاربر می‌دهد، کارهایی که نرم‌افزار برای کاربر انجام می‌دهد و ارتباطی که نرم‌افزار با کاربر دارد. برای ارائه بهتر، این خدمات در چند زیرسیستم دسته‌بندی‌شده‌اند و با زبان طبیعی و به کمک نمودار مورد کاربرد یا use case diagram بیان‌شده‌اند. نرم‌افزار سیستم PEMs از زیرسیستم‌های زیر تشکیل‌شده است (شکل ۱):

- زیرسیستم جمع‌آوری داده
- زیرسیستم اتصال به سخت‌افزار

- زیرسیستم آموزش مدل
- زیرسیستم تخمین
- زیرسیستم ارتباط فایلی
- زیرسیستم پایگاه داده
- زیرسیستم نمایش
- زیرسیستم مرکزی



شکل ۱- ارتباط بین زیرسیستمهای PEMs

٤- پیاده سازی سیستم PEMs

- **مدل سازی ریاضی سیستم PEMs**

هدف از مدل‌سازی ارائه رابطه یا ابزاری است که با دریافت ورودی‌های سیستم خروجی‌های آن را پیش‌بینی کند. دو گرایش کلی برای مدل‌سازی وجود دارد که عبارت‌اند از اصول اولیه و تجربی. به سبب پیچیدگی ذاتی واکنش‌های منجر به تولید آلاینده‌ها، مدل‌های اصول اولیه اغلب چنان پیچیده می‌شوند که حل آن‌ها بسیار مشکل و زمان‌بر است. در صورت حذف برخی از پارامترهای عملکرد کوره نیز دقت مدل کاهش می‌یابد. البته این مدل‌ها تمایل و جهت تشکیل یافتن آلاینده‌ها را نشان می‌دهند. در مقابل در صورت وجود داده‌های قبلی برداشت‌شده از میزان غلظت آلاینده‌ها و نیز داده‌های عملکرد سیستم در DCS، مدل‌های تجربی قابل پیاده‌سازی هستند (نظری، ۱۳۹۶). این مدل‌ها اغلب از مدل‌های اصول اولیه دقیق‌تر هستند. همچنین این مدل‌های تجربی می‌توانند مدل‌های رگرسیون خطی ساده تا رگرسیون چند متغیره پیچیده و سری‌های زمانی را پوشش دهند. در این پروژه سیستم توربین گاز یا بخار موردبررسی است. طراحی مدل این توربین‌ها با روش‌های مستقیم و مبتنی بر اصول اولیه از سابقه‌ای طولانی برخوردار است و اخیراً نیز روش‌های آماری و داده محور رایج شده‌اند. روش‌های قدیمی‌تر برای مدل‌سازی آلودگی که از روش‌های مبتنی بر اصول اولیه استفاده می‌کردند ازنظر علمی قابل استناد هستند. لیکن نیاز به پیش‌بینی غلظت آلودگی‌ها با دقت بیشتر و در حوزه کامل‌تر موجب شده است تا روش‌های آماری و یا داده محور نیز مورد توجه قرار گیرند. اگر سیستم در حال کار کردن در حداکثر بهینگی باشد، مدل‌ها ساده‌تر خواهند بود اما همسو کردن و ترکیب بهینگی و مدیریت آلودگی موضوع دیگری برای تحقیق است. مراحل مدل‌سازی یک سیستم به‌صورت زیر است (نظری، ۱۳۹۶).

- بررسی دیدگاه کلی مقالات در مدل‌سازی
- بررسی انواع مدل‌سازی‌های انجام‌شده
- انتخاب روش
- تعیین متغیرهای مستقل ورودی
- متغیرهای مورداستفاده در مقالات
- متغیرهای موجود در نیروگاه موردبررسی
- آنالیز حساسیت
- حذف متغیرهایی که مدل را از عمومیت خارج می‌کند
- طراحی آزمون‌های خاص در صورت لزوم
- محاسبه پارامترهای مدل با آموزش و ارزیابی به‌وسیله بخشی از داده‌های موجود و یا استفاده از داده‌های جدید.
- پیاده‌سازی فیلترهای اندازه‌گیری (آنلاین) یا تحلیلی (آفلاین) با توجه به نوع اشکالات داده‌ها
- پیاده‌سازی نهایی مدل

- **مدل سازی ریاضی سیستم PEMs**

بر اساس مطالعات انجام گرفته در پروژه، مدل های شبکه عصبی و شبکه عصبی-فازی و شبکه عصبی- فازی با ورودی های ترکیبی به عنوان مدل های نهایی پیش‌بینی غلظت گازهای خروجی CO_2، CO، O_2، SO_2 و NO انتخاب گردید.

- **مدل شبکه عصبی**

مدل‌سازی با استفاده ازجعبه ابزار شبکه عصبی در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفت.مدل شبکه عصبی پیش‌بینی گازهای SO_2، CO ، O_2 و CO_2، پس از انجام چندین آزمایش مدل‌سازی با ورودی‌های داده نیروگاه و ساختارهای گوناگون مدل شبکه عصبی (از نظر تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های مورد استفاده در این لایه‌ها) و نهایتا مشاهده و مقایسه نتایج مدل با مقادیر واقعی گاز به صورت زیر انتخاب گردیده است(نظری، ۱۳۹۶):

- لایه ورودی : دارای ۱۴ ورودی از سیگنال‌های (داده‌های) نیروگاه
- لایه میانی (پنهان) : دارای دو لایه میانی با ۵ نرون در لایه پنهان اول و ۳ نرون در لایه پنهان دوم
- لایه خروجی: دارای تک نرون خطی

مدل شبکه عصبی پیش‌بینی گاز NO ، پس از انجام چندین آزمایش مدل‌سازی با ورودی‌های داده نیروگاه و ساختارهای گوناگون مدل شبکه عصبی (از نظر تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های مورد استفاده در این لایه‌ها) و نهایتا مشاهده و مقایسه نتایج مدل با مقادیر واقعی گاز به صورت زیر انتخاب گردیده است :

- لایه ورودی: دارای ۹ ورودی از سیگنال‌های (داده‌های) نیروگاه
- لایه میانی (پنهان): دارای یک لایه میانی با ۲۲ نرون
- لایه خروجی: دارای تک نرون خطی

توابع فعال‌سازی که برای لایه میانی یا پنهان استفاده شده است، تابع تانژانت هایپربولیک سیگموئیدی (tangent hyperbolic sigmoid) می‌باشد. تابع فعال‌سازی در لایه خروجی نیز تابع خطی یا پیورلاین (purelin) انتخاب شده است. برای مدل‌سازی شبکه عصبی از ۷۰ درصد داده موجود نیروگاه برای آموزش (train) شبکه عصبی و پیش‌بینی خروجی استفاده شده است. ۳۰ درصد داده باقی‌مانده نیز برای تست مدل بدست آمده و مقایسه نتایج با مقادیر واقعی به کار گرفته شده است. با آموزش مدل شبکه عصبی، وزن (ضرایب) نرون‌های شبکه به گونه‌ایی تنظیم می‌گردد که مدل بتواند خروجی مطلوب را با استفاده از داده‌های جدید پیش‌بینی نماید (نظری، ۱۳۹۶). الگوریتم تنظیم وزن‌های شبکه عصبی نیز الگوریتم Levenberg-Marquardt backpropagation یا trainlm انتخاب شده است. از میان روش‌های مختلف آموزش به روش پس انتشار خطا، الگوریتم لونبرگ-

مارکوارت، به دلیل همگرایی سریع‌تر در آموزش شبکه‌های اندازه متوسط مناسب‌تر تشخیص داده شده است. برای توقف آموزش شبکه عصبی نیز یکی از شروط زیر به کار گرفته شده است (نظری، ۱۳۹۶).

- توقف آموزش بعد از تکرار به دفعات معین
- توقف آموزش وقتی که خطا از یک مقدار تعیین شده کمتر شود.
- توقف آموزش وقتی که خطا در مجموعه تائید از قاعده خاصی پیروی نماید.

برای آموزش شبکه عصبی باید این نکته مورد توجه قرار گیرد که اگر دفعات تکرار آموزش کم باشد، خطای پیش‌بینی وجود خواهد داشت و اگر تعداد دفعات آموزش زیاد باشد، مسئله Overfitting رخ خواهد داد. Overfitting می‌تواند برای در نظر گرفتن مثال‌های داده نادری که ممکن است با توزیع کلی داده‌ها مطابقت نداشته باشند، اتفاق بیفتد (نظری، ۱۳۹۶).

- **مدل عصبی- فازی با ورودی های ترکیبی**

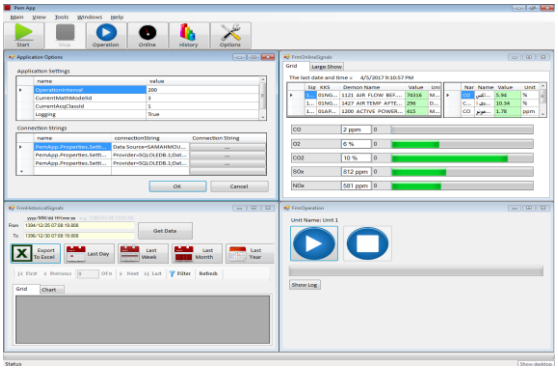
یکی از تلاشهای منجر به موفقیت در این پروژه فعالیتهایی بود که به منظور استفاده از سیگنالهای نامعتبر صورت گرفت. در این راستا طی مصاحبه های متعدد با مسئولین و کاربران ابزاردقیق و بهره برداری نیروگاه مشخص شد به یک علت مشخص، کارتهای قرائت کننده مقادیر سیگنالهای سوخت دچار مشکل شده و اشباع می شوند و این مشکل تا زمانی که کارت ریست نشود ادامه دارد و تا آن زمان سیگنالهای قرائت شده در سیستم Demon به اندازه بیشینه یا کمینه ممکن هستند که صحیح نمی باشد (نظری، ۱۳۹۶). از طرفی چه در هنگامی که سوخت نیروگاه گاز است و چه مازوت تعدادی از سیگنالها مقادیر صحیح ارسال می کنند. پس از مشورت با اپراتور بهره برداری مشخص شد مقادیر مصرفی سوخت در مشعل های ۱۴ گانه تقریبا برابر هستند و لذا می توان با میانگین گیری شرطی مقدار کل سوخت مصرفی لحظه ای را محاسبه کرد و مورد استفاده قرار داد (نظری، ۱۳۹۶).

ما این روش را پیاده سازی کردیم و سه پارامتر زیر را به متغیرهای ورودی اضافه نمودیم (نظری، ۱۳۹۶) :

- متوسط مشروط فلوی سوخت گاز مصرفی در مشعل ها
- متوسط مشروط فلوی سوخت مازوت مصرفی در مشعل ها
- متوسط مشروط فلوی هوای مصرف شده در مشعل ها

- **معرفی نرم افزار نگارش یافته PEM App**

نرم افزار PEM App برای انجام عملیات نرم افزاری سیستم PEM به منظور دریافت، مدل سازی و ارائه نتایج پیش بینی ها طراحی و پیاده سازی شده است (نظری،۱۳۹۶). برنامه کاربردی در بستر NET Framework 4.0 Client Profile. پیاده سازی شده است و در هر ماشینی که این چهارچوب را نصب کرده باشد کار می کند، سیستم عامل پیشنهادی Microsoft Windows 7 می باشد. سیستم مدیریت بانک اطلاعاتی مورد استفاده Microsoft Sql Server 2014 (12.0.5553.0) می باشد که باید بر روی سرور نصب شود. فرم اصلی نرم افزار چنانچه در شکل ۲ ملاحظه می شود دارای منوهای متعددی است که در طول این راهنما شرح داده خواهند شد. از طرفی چگونگی نمایش پنجره ها یا فرمهایی که در فرم اصلی باز می کنید از طریق منوی "پنجره ها" قابل مدیریت است. در شکل ۲ نمونه ای از نمایش عمودی ارائه شده است (نظری،۱۳۹۶).



شکل ۲- نمایش پنجره ها به شکل عمودی

فعالیت اصلی نرم افزار خواندن آخرین مقادیر سیگنالها و محاسبه میزان آلاینده هاست. این فعالیت Operation نام دارد و کاربر از نوع مدیر می تواند آن را آغاز کند یا به اتمام برساند. بنابر این فرمی به نام Operation با کلیدهایی به نام Start و Stop طراحی شده است. چنانچه در شکل ۳ دیده می شود کلید Log هم محتوای آخرین اقدامات انجام شده را به مدت ۵ ثانیه نمایش می دهد(نظری،۱۳۹۶).

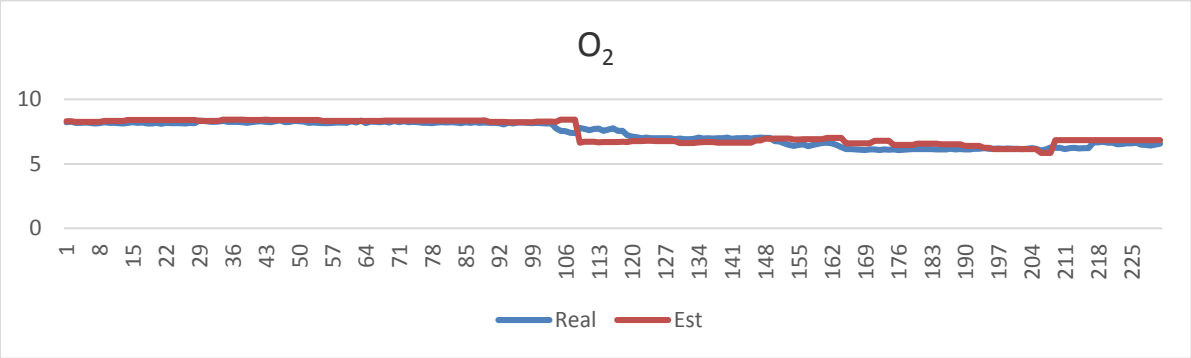
شکل ۳- نمونه فرم عملیات در حال کار سیستمPEMs

- **نتایج مدل سازی عصبی- فازی با ورودی ترکیبی**

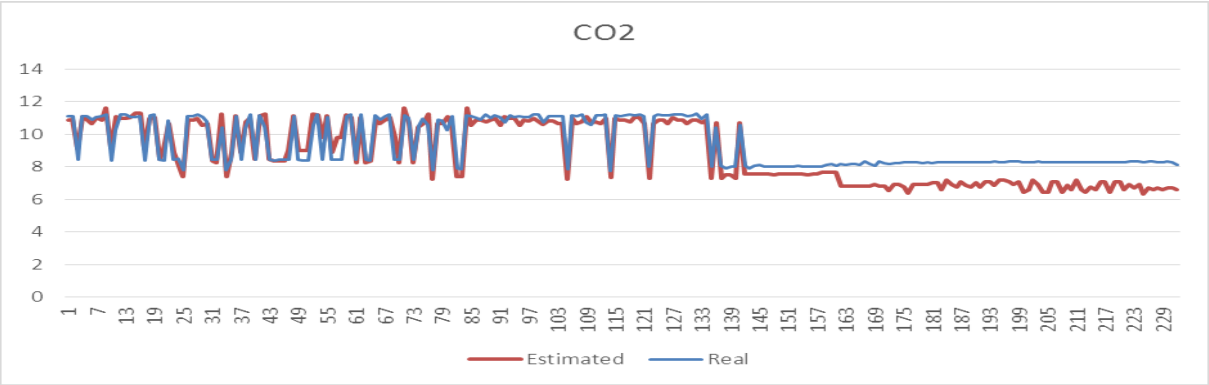
نتایج مدل ساخته شده در روش شبکه عصبی-فازی با ورودی های ترکیبی در شکل های ۴ تا ۸ ارائه شده است. همانطور که در این شکل ها مشاهده می شود مقادیر مدل شده بجز گاز CO بخوبی مقادیر اندازه گیری شده را پیش بینی می کند. میزان خطای مدل سازی برای کلیه گازهای حاصل از احتراق بجز گاز CO زیر ۱۰ درصد است (نظری،۱۳۹۶).

جدول ۲- میزان خطای مدل سازی سیستم PEMs

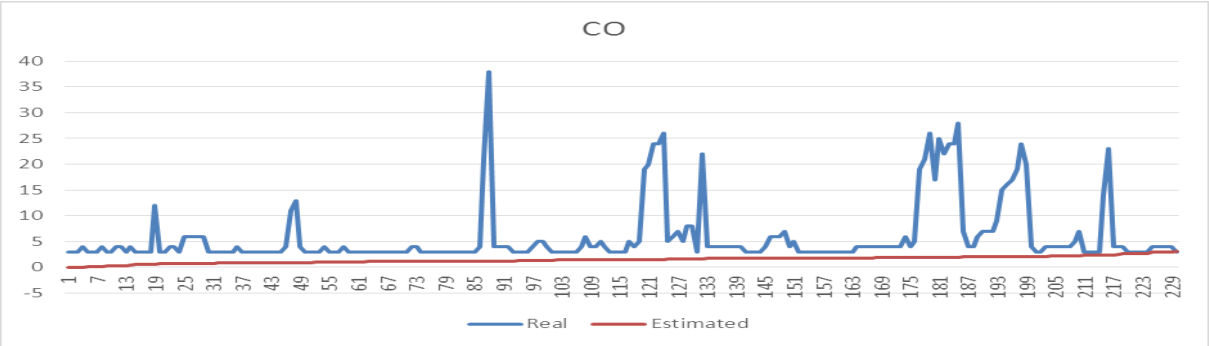
روش مدل سازی	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	NO (%)	SO_2 (%)
شبکه عصبی- فازی	۳,٦	۳,۷	۲۷۲	۱٦,۱	٥,۱
شبکه عصبی	۷,۱	۲,٥	۳۳۱	۱۹,٥	۲۰,۰
شبکه عصبی- فازی با ورودی ترکیبی	۲,٤٥	۲,٥٤	۱٤۰,۷٤	۷,۷۰	٦,۸۰



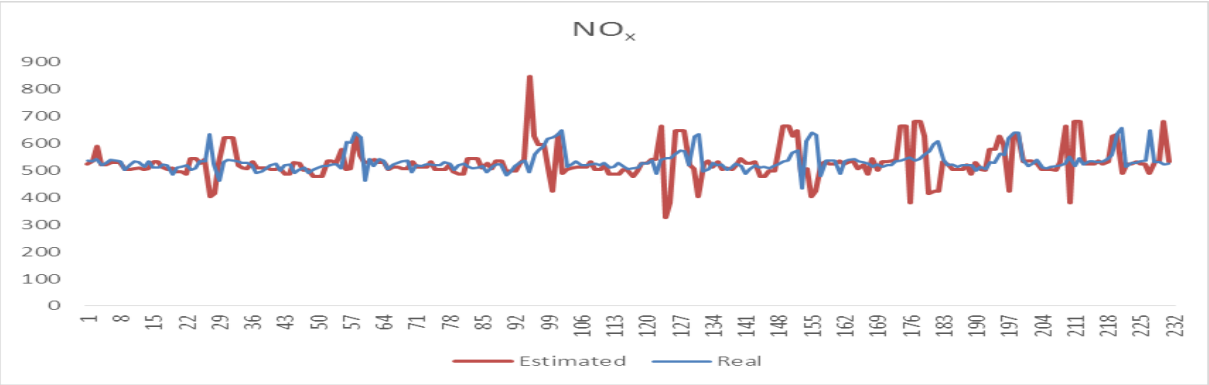
شکل ٤- مقادیر واقعی و مدل سازی شده گاز O_2 بر حسب vol٪



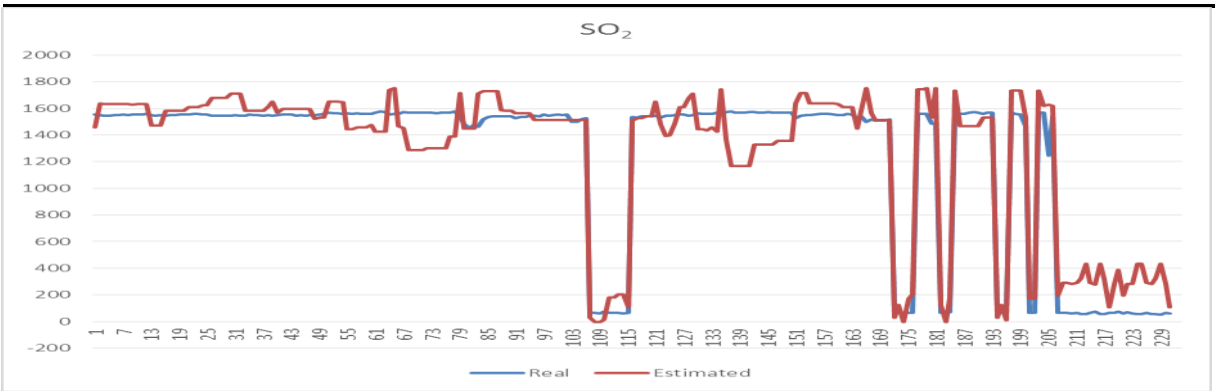
شکل ٥- مقادیر واقعی و مدل سازی شده گاز CO_2 بر حسب vol٪



شکل ٦- مقادیر واقعی و مدل سازی شده گاز CO بر حسب ppm_v



شکل ۷- مقادیر واقعی و مدل سازی شده گاز NO بر حسب ppm_v

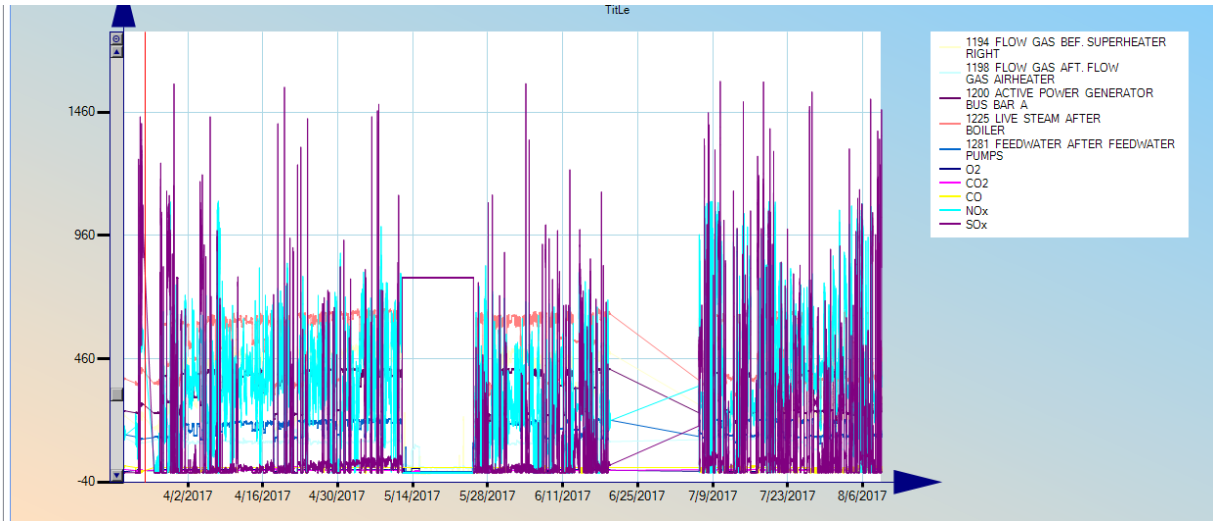


شکل ۸- مقادیر واقعی و مدل سازی شده گاز SO_2 بر حسب

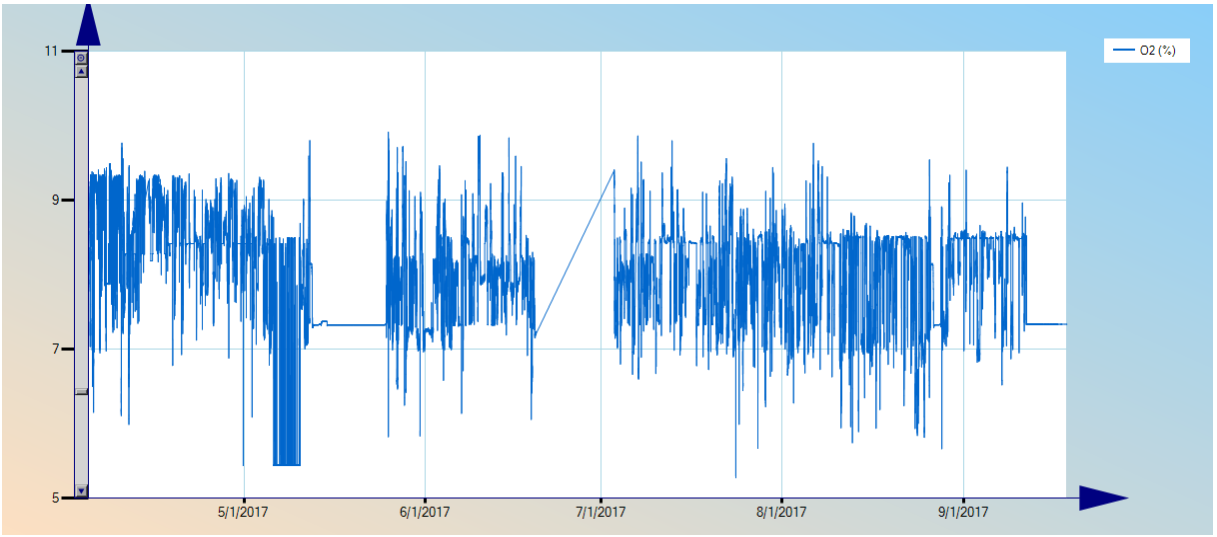
۵- استقرار،راه اندازی و بهره برداری سیستم PEMs

- **نتایج بهره برداری سیستم PEMs با استفاده از مدل سازی شبکه عصبی- فازی با ورودی های ترکیبی**

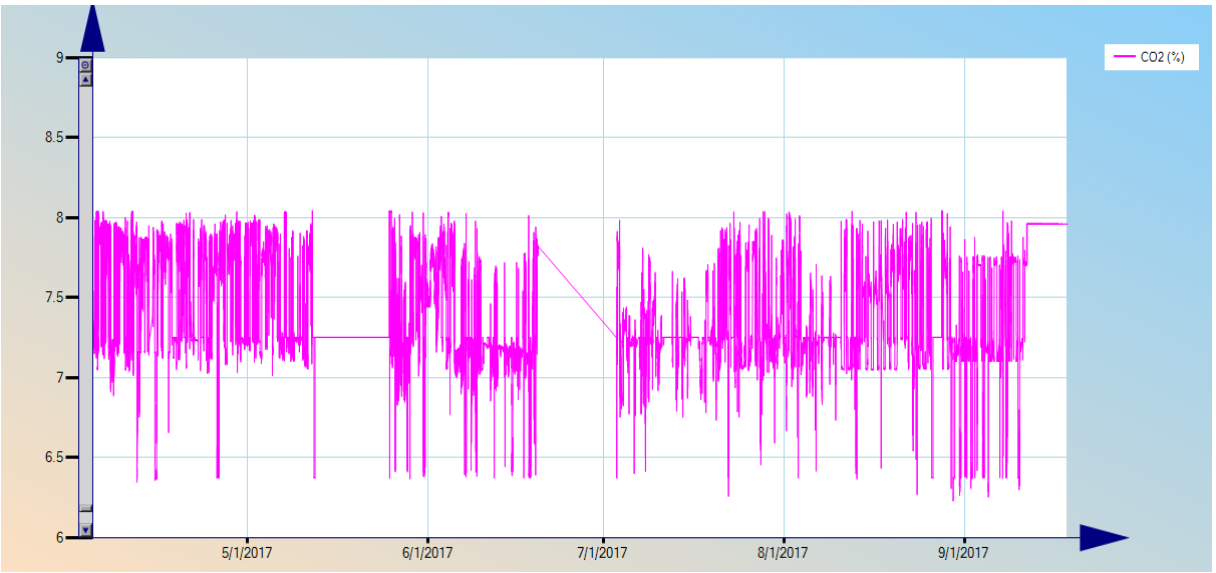
پس از اتمام فعالیت ۶ ماهه نرم افزار PEMs نصب شده در نیروگاه منتخب مقادیر ورودی و خروجی این دوره به طور یکجا در شکل ۴ قابل مشاهده می باشد. مقدار غلظت گاز O_2 در مدت حدود شش ماه بین ۵ تا ۱۱ درصد تغییر کرده است. غلظت گاز CO_2 در بازه شش ماهه بین ۶ تا ۸ درصد متغیر بوده است. همچنین غلظت گاز CO بین ۰ ppm_v تا ۲۵ ppm_v تغییر کرده است. غلظت گاز NO در این بازه بین ۰ ppm_v تا ۱۰۰۰ ppm_v متغیر بوده است. غلظت گاز SO_2 بین در این بازه بین ۰ ppm_v تا ۱۵۰۰ ppm_v متغیر بوده است (نظری،۱۳۹۶).



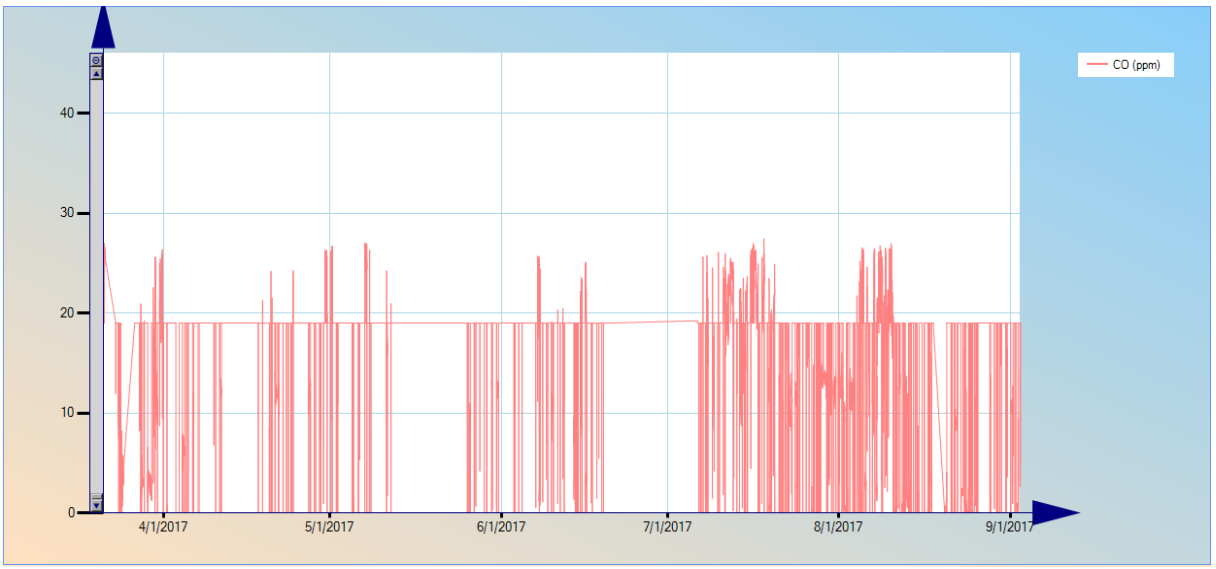
شکل ۹- نمایی از فرم کلیه نمودارها در شش ماه



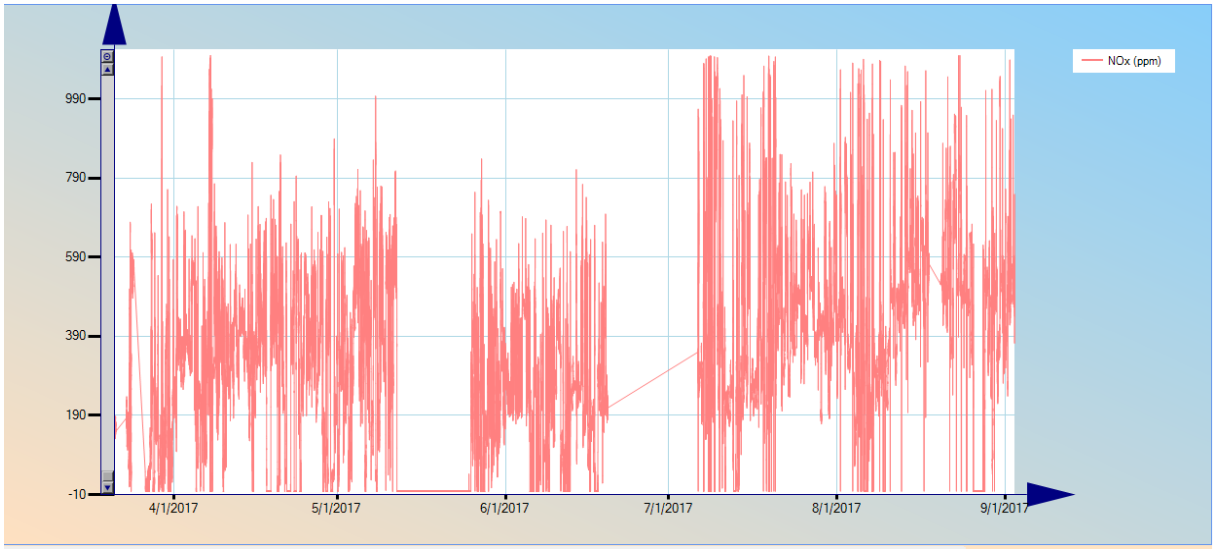
شکل ۱۰- مقدار خروجی O_2 (%)



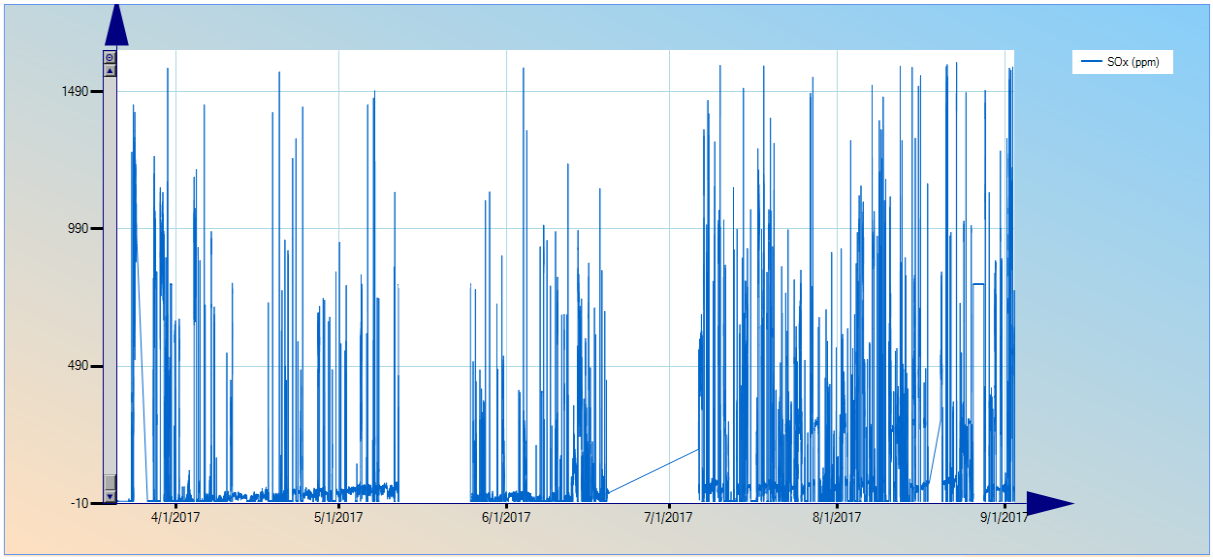
شکل ۱۱- مقدار خروجی CO_2 (%)



شکل ۱۲- مقدار خروجی CO (ppm_v)



شکل ۱۳- مقدار خروجی NO (ppm_v)



شکل ١٤- مقدار خروجی SO_2 (ppm_v)

٦- محاسبه عدم قطعیت

در این بخش به محاسبه عدم قطعیت هر کدام از متغیرهای خروجی می پردازیم. عدم قطعیت یک عامل همراه نتیجه اندازه گیری است که محدوده مقادیری را معین میکند که نتیجه اندازه گیری می تواند داشته باشد X±U و مقدار آن نشان دهنده سطح اطمینانی است که مقدار واقعی مورد اندازه گیری شده در محدوده تعیین شده قرار می گیرد. علت اهمیت عدم قطعیت این است که عدم قطعیت نمود کمی کیفیت نتیجه اندازه گیری است. یعنی تا چه حد اندازه گیری نشان دهنده مقدار واقعی مورد اندازه گیری شده است. عدم قطعیت بصورت ± یک مقدار یعنی فاصله ای در اطراف نتیجه اندازه گیری بیان می گردد. عدم قطعیت یک جزء غیر قابل اجتناب در اندازه گیری است و زمانی بسیار مهم می شود که نتایج اندازه گیری نزدیک حدود مشخصه باشد (نظری،۱۳۹۶). در اینجا خلاصه ای از محاسبات عدم قطعیت بیان می شود. طبق مرجع فرمول محاسبه عدم قطعیت در سیستمهای PEMs به شکل رابطه ۱ است (نظری،۱۳۹۶).

$$U_{PEMs} = \sqrt{u_{input}^2 + u_{modeling}^2 + u_{analyser}^2}$$

رابطه (۱)

- u_{input} عدم قطعیت مربوط به متغیرهای ورودی می باشد.
- $u_{modeling}$ عدم قطعیت مربوط به خطای مدل سازی و مقدار خوبی برازش (goodness of fit) می باشد.
- $u_{analyzer}$ عدم قطعیت مربوط به اندازه گیری دستگاه می باشد.

عدم قطعیت مدل سازی با محاسبه انحراف استاندارد نتایج خروجی از سیستم PEMs محاسبه شده است.

در مورد مقادیر اندازه گیری شده در نیروگاه با توجه به خطای اندازه گیری در ابزار دقیق حداکثر میزان عدم قطعیت برابر ۲± درصد در نظر گرفته شد. در مورد مدل سازی، پس از به کارگیری داده های مدل سازی و محاسبه مقادیر لازم، عدم قطعیت محاسبات سیستم PEMs مطابق جدول ۳ قابل ارائه است.

جدول ۳- عدم قطعیت محاسبات سیستم PEM

variable name	$U_{modeling}$	$U_{analyzer}$	U_{PEMs}
O_2	± 0.29%	±0.2 %	±4.06%
CO_2	± 0.28%	±0.3 %	±4.08%
CO	±0.000036%	±0.001 %	±4.00%
NO	±0.0045%	±0.01%	±4.00%
SO_2	±0.0037%	±0.01%	±4.00%

۷- نتیجه‌گیری

سیستم PEMS ارائه شده از لحاظ تجهیزات، نصب، بهره برداری و تعمیر و نگه داری بسیار ارزان تر از سیستم های پایش مداوم متداول می باشد. این نیازی به نصب هیچ سنسوری بر روی دودکش نمی باشد و فقط باید ارتباط اطلاعاتی بین سیستم کنترل موجود و یک کامپیوتر برقرار باشد. نصب راحت و بدون مشکل از فواید استفاده از این سیستم PEMs می باشد. بعد از نصب سیستم PEMs ، مقادیر واقعی نشر اندازه گیری شده و با نتایج حاصل از سیستم مذکور مقایسه شد. در شرایط بهره برداری عادی میزان انتشار پیش بینی شده کلیه اجزا گازی بجز گاز CO دارای انحراف کمتر از ۱۰٪ نسبت به مقادیر واقعی و اندازه گیری شده می باشد. میزان عدم قطعیت سیستم PEMs برای کلیه گازهای حاصل از احتراق در حدود ۴ ± درصد بوده است.

منابع

- نظری کودهی، س.، ۱۳۹۶. پروژه طراحی، پیاده سازی و استقرار سیستم پایش پیش بینی کننده انتشار گاز دودکش نیروگاه ها. گزارشات مراحل ۱ تا ۶، پژوهشگاه نیرو، کارفرما: دفتر امور تحقیقات برق شرکت توانیر.

- Netherlands technical agreement. 2012. NTA 7379 Guidelines for Predictive emission
- U.S Federal Register. 2015. Performance specification 16 for predictive emission monitoring systems and amendments to testing and monitoring provisions 40 CFR (Protection of Environment) Appendix B to Part 60 - Performance Specifications (Vol. 40 CFR Part 60 PS 16)
- BS.EN.14181. 2004. Stationary source emissions–Quality assurance of Automated Measuring Systems, British Standards Institute.
- WEEL-SANDVIG.2015. Offshore oil and gas production platform in the North Sea. From http://www.weel-sandvig.dk/?m=4&h=0&la=uk
- CMC Solutions, 2015. https://cmcpems.com/products-and-services/#product-more
- ABB.2015.https://new.abb.com/products/measurement-products/analytical/continuous-gas analyzers/predictive-emissions-monitoring-systems
- ROCKWELL.AUTOMATION. 2013. Software-based, continuous emissions monitoring system for reporting and optimization. www.rockwellautomation.com, Rockwell Automation
- GENERAL.ELECTRIC. 2015. Pems package for ge lm gas turbines. 1631 Bently Parkway South Minden, NV USA 89423-4119, General Electric.
- TECNATOM. 2015. Design and implementation of process monitoring and control systems from http://www.tecnatom.es/en/home/activity-areas/process-engineering/environmental-engineering/design-and-implementation-of-process-monitoring-and-control-systems
- BP.CONSULTANCY.(2015).Predictive emission monitoring system (pems).from http://www.bpckuwait.com/BPCProfile.html