

## افزایش راندمان بویلر نیروگاه حرارتی ذوب آهن اصفهان با استفاده از داده‌کاوی فازی

محمد باقر نقیبه سیستانی  
naghib@yahoo.com

علی وحیدیان کامیاد  
avkamyad@yahoo.com

مهدی پارسا  
Parsa4mpt@yahoo.com

دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد  
مشهد، ایران

واژه‌های کلیدی: راندمان بویلر، هوای اضافی، داده‌کاوی فازی

### چکیده

امروزه با توجه به افزایش ارزش انرژی در کشور، یکی از دغدغه‌های جدی در صنایع نیروگاه‌حرارتی افزایش راندمان بویلرها به کمک بهینه‌سازی بازده احتراق می‌باشد. مسئله بهینه‌سازی کارکرد سیستم احتراق در یک نیروگاه حرارتی ایجاد یک توازن بین افزایش بازده احتراق و مینیمم‌سازی انتشار گازهای نامطلوب می‌باشد. فرایند احتراق در سیستم بویلر یک فرایند چندورودی چندخروجی، متغیر با زمان و به شدت غیرخطی می‌باشد. به همین خاطر تنظیم پارامترهای کنترل‌پذیر اصلی آن با استفاده از روشهای کلاسیک مبتنی بر مدلسازی مشکل می‌باشد. از آنجایی که سیستم‌های کنترل توزیع شده به طور گسترده در نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، داده‌های مربوط به پارامترهای بویلر جمع‌آوری و ثبت می‌شوند به همین خاطر استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی یک روش بسیار موثر به منظور تنظیم بهینه پارامترهای احتراق می‌باشد. با توجه به اینکه داده‌های موجود، خروجی سنسورهای نصب شده روی سیستم است اغلب، داده‌ها دارای دقت مناسب نبوده و

در بعضی مواقع نویز نیز روی آنها تاثیر می‌گذارد، به همین دلیل استفاده از مجموعه‌های فازی در تحلیل این داده‌ها بسیار مفید می‌باشد. در این مقاله یک روش مبتنی بر تکنیک‌های داده‌کاوی فازی به منظور افزایش راندمان بویلر ارائه شده و سپس کارایی آن با استفاده از یک تست مجازی روی سیستم بویلر نیروگاه حرارتی ذوب آهن اصفهان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. و همانطوریکه از نتایج مشخص است میانگین کمترین افزایش راندمان طی انجام پنج آزمایش برابر با ۰/۶۵۶ درصد است.

### ۱- مقدمه

یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در راندمان بویلر، سیستم احتراق آن می‌باشد. از آنجایی که فرایند احتراق در سیستم بویلر نیروگاه‌های حرارتی یک فرایند چندورودی چند-خروجی، متغیر با زمان و به شدت غیرخطی است تنظیم پارامترهای اصلی و قابل کنترل آن با استفاده از روشهای کلاسیک مبتنی بر مدل ریاضی مشکل می‌باشد زیرا در این

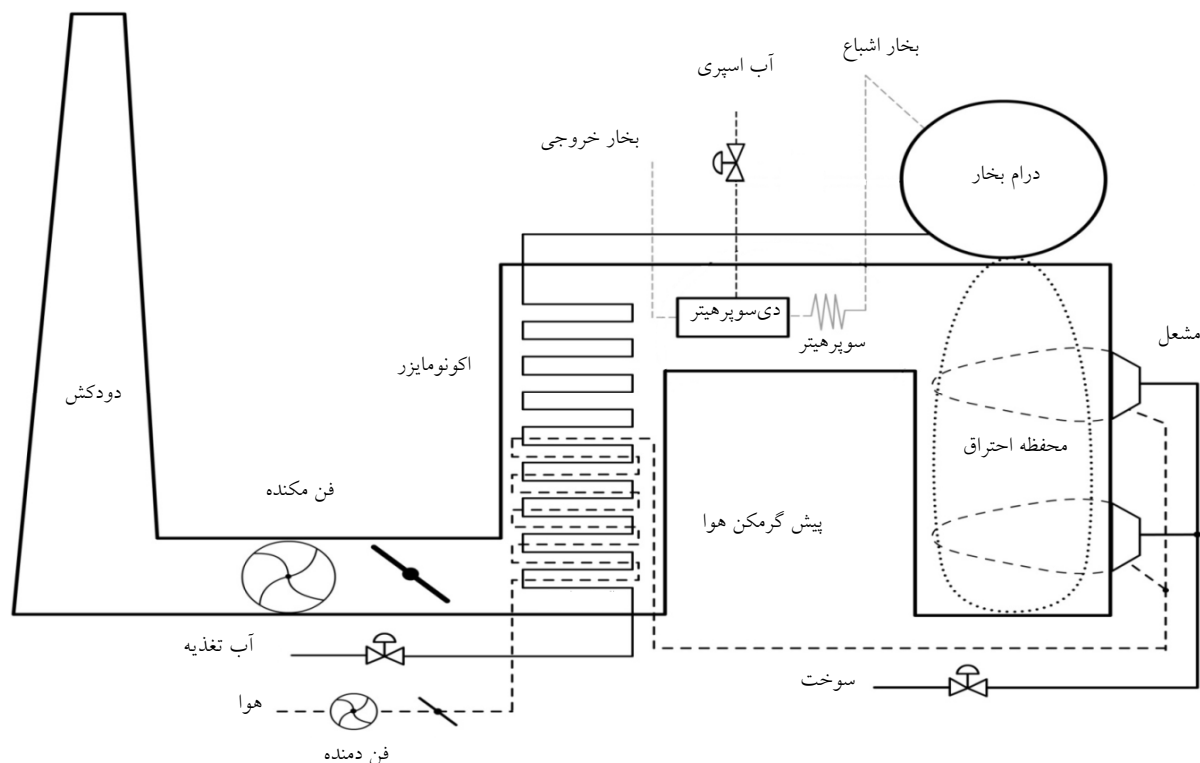
## بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق

## ۲- خصوصیات سیستم مورد نظر

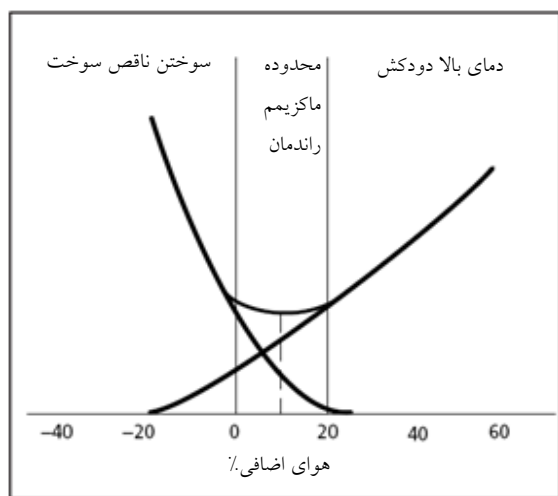
بویلر مورد نظر در نیروگاه حرارتی ذوب آهن اصفهان از نوع لوله آبی درام دار (Water Tube) است. این نمونه از بویلرها معمولاً دارای دو قسمت مجزا هستند. قسمت اول، سیستم آب-بخار می باشد که به آن سیستم سمت آب نیز گفته می شود. در این سیستم آب پیش گرم شده از اکتونومایزر وارد درام بخار می شود سپس در داخل لوله هایی به سمت پایین جریان پیدا می کند. آب در این بین حرارت داده شده تا به حالت اشباع می رسد. مخلوط بخار و آب اشباع دوباره به درام بخار بر می گردد و بخار از آب جدا شده و از درام بخار خارج شده و وارد سوپرهیتر می شود. سوپرهیتر دارای دو مرحله است در دی سوپر هیترها درجه حرارت بخار تنظیم شده و در نهایت بخار وارد کلکتور و از آنجا وارد توربین می شود. سیستم دوم، سیستم سوخت- هوا - گازهای دودکش است که به آن سیستم سمت سوخت بویلر نیز گفته می شود. در این سیستم سوخت و هوایی که قبلاً با عبور از پیش گرمکن های هوا دمایش افزایش پیدا کرده است با هم ترکیب شده و مشعل بویلر را مشتعل می کنند. نتیجه احتراق تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به انرژی گرمایی می باشد. گازهای حاصل از احتراق پس از عبور از سوپر هیتر، لوله های بالابرنده و پایین برنده آب در درام بخار، اکتونومایزر و پیش گرمکن های هوا توسط فن مکنده بویلر را از طریق دودکش ترک می کنند. یک شماتیک از این بویلرها در شکل ۱ نشان داده شده است. نکته مهم در مورد بویلر مورد نظر در این مقاله سیستم احتراق آن می باشد که در این سیستم سه سوخت گاز کوره بلند، گاز طبیعی و گاز کک به طور همزمان مورد استفاده قرار می گیرند که البته در زمانی که تحقیقات مربوط به این مقاله روی این سیستم صورت می گرفت فقط دو گاز کوره بلند و طبیعی در این سیستم مورد استفاده بوده است. گاز کوره بلند یک گاز فرایند می باشد که طی فرایند صورت گرفته در قسمت کوره بلند کارخانه تولید می شود.

روش ها نیاز به مدلسازی دقیق سیستم می باشد و بدست آوردن یک مدل دقیق ریاضی از فرایند احتراق در سیستم بویلر بسیار مشکل می باشد و همچنین در این روش ها نتایج حاصله از روش تئوری دارای دقت لازمه به منظور پیاده سازی در پروسه های صنعتی نمی باشند [۲،۳]. مقالات متعددی به کاربرد روشهای کلاسیک در این زمینه پرداخته اند که از آن جمله می توان به کاربرد روشهای کنترل بهینه [۶]، کنترل پیش بین [۵] و کنترل چند متغیره و رباست [۸] در سیستم احتراق بویلر اشاره کرد. به دلیل اینکه در اکثر نیروگاه های حرارتی از سیستم های کنترل توزیع شده استفاده می شود، بکارگیری روشهای داده کاوی در تنظیم پارامترهای مختلف سیستم احتراق بویلر یک روش کارآمد می باشد زیرا در این روشها همه شرایط کاری واقعی سیستم بدون هیچگونه محدودیتی در نظر گرفته می شود. از جمله مقالات [۲-۴] به کاربرد تکنیکهای داده کاوی در سیستم احتراق بویلر پرداخته اند. در مقالات اشاره شده از روشهای داده کاوی معمولی (کلاسه بندی، خوشه بندی، شبکه عصبی و ...) استفاده شده است. داده های ثبت شده از سیستم کنترل، خروجی سنسورهای نصب شده روی سیستم می باشد و معمولاً همراه با نویز و نادقیق هستند به همین خاطر استفاده از مجموعه های فازی در پردازش این داده ها و بدست آوردن نتایج دقیق تر بسیار مفید می باشد. از این رو در این مقاله یک روش داده کاوی مبتنی بر داده های فازی ارائه شده و سپس از این روش به منظور بدست آوردن میزان هوای اضافی بهینه در بویلر شماره ۷ نیروگاه حرارتی کارخانه ذوب آهن اصفهان استفاده می شود و در نهایت با استفاده از یک تست مجازی عملکرد روش بکار گرفته شده مورد بررسی قرار می گیرد. تفاوت عمده و مهم دیگر سیستم مورد نظر در این مقاله و سایر مقالات، مصرف چند سوخت به طور همزمان در این بویلر می باشد که این امر باعث مشکل تر شدن حل مسئله به روشهای کلاسیک می باشد زیرا سوختهای مورد مصرف دارای ارزش حرارتی بسیار متغیر با زمان می باشند. از مزیت های دیگر روش ارائه شده می توان به پیاده سازی عملی آسان آن با استفاده از سیستم کنترل موجود در نیروگاه اشاره کرد.

### بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق



شکل ۱: شماتیک بویلر



شکل ۲: نمودار مربوط به بازده بویلر بر حسب میزان هوای اضافی

### ۳- شرح مسئله

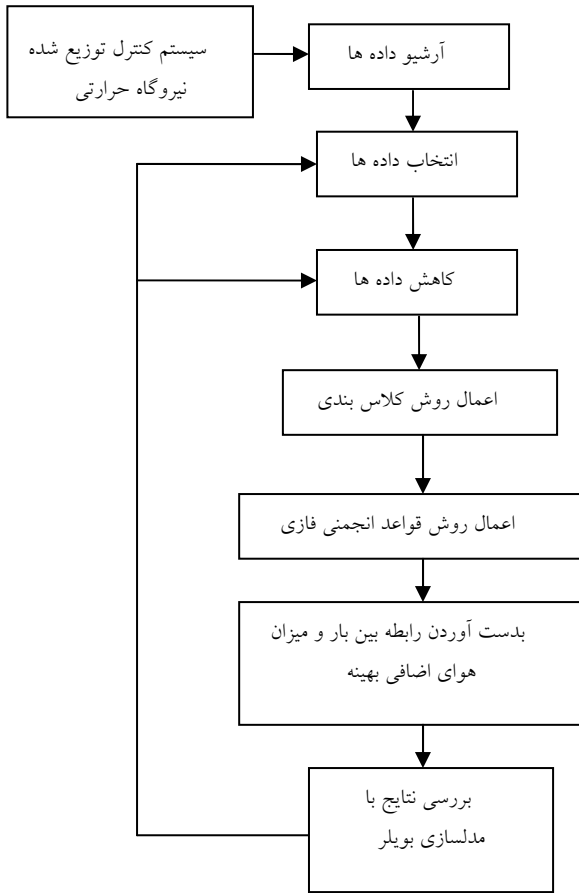
از جمله عوامل بسیار مهم و تاثیر گذار روی بازده بویلر و انتشار گازهای خطرناک در سیستم بویلر، میزان هوای اضافی ترکیب شونده با سوخت می باشد. هوای اضافی به معنای میزان هوایی می باشد که بیش از حد تئوری و برای احتراق کامل سوخت نیاز است.

شکل ۲ رابطه بین درصد هوای اضافی و تلفات بویلر را نشان می دهد. همانطوریکه در این شکل نشان داده شده است ماکزیمم بازده بویلر در یک ناحیه محدودی بدست می آید. در صورتیکه میزان هوای اضافی بیشتر از حد مورد نیاز باشد گرمای جذب شده به وسیله این هوای اضافی به جای قرار گرفتن در خروجی مفید سیستم به تلفات سیستم اضافه می شود و راندمان بویلر را از طریق افزایش دمای دودکش کاهش می دهد. همچنین هنگامی که میزان هوای اضافی کمتر از حد مورد نیاز باشد احتراق به صورت ناقص انجام می گیرد و بخشی از کربن موجود در ترکیب هیدروکربنی سوخت به جای تبدیل به دی اکسید کربن ( $CO_2$ )، به مونواکسید کربن ( $CO$ ) تبدیل خواهد شد.

تبدیل نشدن کامل کربن موجود در ترکیب سوخت به دی اکسید کربن، نوعی تلفات انرژی به شمار آمده و مقدار این تلفات، متناسب با مقدار مونواکسید کربن تولیدی خواهد بود که همراه با محصولات احتراق به محیط پیرامون تخلیه می شود که در این صورت تلفات ناشی از سوختن ناقص سوخت افزایش یافته و باعث کاهش راندمان بویلر می شود. بنابراین میزان هوای اضافی پارامتر بسیار مهمی می باشد که به

## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

وجود اشتباه در مراحل کاهش داده یا انتخاب داده می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳: فلوجارت روش بکارگرفته شده

در مرحله اول زمان نمونه برداری داده‌های را به صورت یکسان و برابر یک ثانیه تنظیم می‌کنیم و داده‌های مربوط به پارامترهای بار بویلر (دبی بخار خروجی بر حسب ton/h)، میزان هوای اضافی (%)، راندمان بویلر (%) و دمای دودکش بویلر (°C) را در طول یک هفته ذخیره می‌کنیم که نمونه‌ای از این داده‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: نمونه‌ای از داده‌های بویلر

بازده	دمای دودکش	بار بویلر	هوای اضافه	زمان
۹۰/۵۸	۱۴۳/۶۷	۱۹۴/۶۵	۳۳/۱۴۳	۱۳۹۰/۳/۴ ۰۰:۰۱
۸۹/۸۴	۱۴۳/۶۸	۱۹۴/۷۴	۳۲/۸۸۵	۱۳۸۹/۳/۴ ۰۰:۰۲
۸۹/۵۳	۱۴۳/۶۰	۱۹۴/۵۱	۳۱/۸۸۲	۱۳۸۹/۳/۴ ۰۰:۰۳

طور مستقیم در میزان تلفات بویلر تاثیر دارد. از این رو کنترل میزان هوای اضافی در پروسه احتراق یکی از مهمترین کنترل‌های موجود در سیستم بویلر است زیرا علاوه بر اثر مستقیم بر راندمان بویلر روی انتشار گازهای خطرناک به محیط نیز موثر می‌باشد.

#### ۴- روش ارائه شده

اساس روش ارائه شده در این مقاله بر تکنیک‌های داده‌کاوای و مجموعه‌های فازی می‌باشد که مراحل کلی آن در شکل ۳ نشان داده شده است و به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

(۱) جمع‌آوری داده‌ها: در این مرحله داده‌های بویلر توسط سیستم کنترل توزیع شده جمع‌آوری و ثبت می‌شود.

(۲) انتخاب ویژگی‌ها: پس از جمع‌آوری داده‌ها ویژگی‌های مهم و تاثیرگذار در سیستم احتراق بویلر به منظور اعمال فرایند داده‌کاوای انتخاب می‌شوند.

(۳) کاهش داده‌ها: به منظور کاهش حجم داده‌ها، محاسبات و فضای مورد نیاز برای ذخیره داده‌ها از تکنیک‌های کاهش داده استفاده می‌شود.

(۴) اعمال روش کلاس‌بندی بر اساس بار بویلر: در این مرحله داده‌ها به کلاس‌های از قبل تعیین شده تقسیم‌بندی می‌شوند که ملاک کلاس‌بندی‌ها بار بویلر می‌باشد.

(۵) اعمال روش داده‌کاوای فازی مورد نظر به داده‌های پیش پردازش شده و بدست آوردن نتیجه مناسب از روی این داده‌ها که روش بکارگرفته شده در اینجا قواعد-انجمنی فازی می‌باشد.

(۶) استفاده از روش رگرسیون به منظور برازش یک منحنی بر روی داده‌های بدست آمده در مرحله ۵ و دستیابی به یک رابطه نهایی بر حسب بار بویلر و میزان هوای اضافی بهینه

(۷) مدلسازی سیستم بویلر و ارزیابی عملکرد میزان هوای اضافی بهینه محاسبه شده بر روی راندمان بویلر.

نکته قابل توجه این است که در مرحله‌ای که نتایج بررسی می‌شود در صورت مناسب نبودن نتایج حاصله امکان

## بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق

Y مجموعه ای از ویژگیها هستند. قوانین وابستگی را با استفاده از معیارهایی مانند پشتیبانی (*support*) و اطمینان (*confidence*) ارزیابی می کنند. از این رو کشف قوانین وابستگی مسئله کشف همه قوانین  $X \rightarrow Y$  است که دارای حداقل پشتیبان و اطمینان تعریف شده باشند. پشتیبان  $(X, Y)$  نشان دهنده درصد یا تعداد مجموعه از نمونه هایی است که شامل هر دو ویژگی  $X, Y$  باشد و اطمینان یک قاعده میزان وابستگی یک ویژگی به ویژگی دیگر را نشان می دهد و طبق رابطه (۱) محاسبه می گردد.

$$confidence(X \rightarrow Y) = \frac{support(X, Y)}{support(X)} \quad (1)$$

این شاخص درجه وابستگی بین دو ویژگی  $X, Y$  را نشان می دهد و به عنوان شاخصی برای اندازه گیری توان یک قاعده در نظر گرفته می شود و غالباً قانونی انتخاب می شود که عدد اطمینان بزرگتری داشته باشد.

الگوریتم های کاوش قواعد انجمنی کلاسیک (*crisp*) فقط روی ویژگی های دودویی (باینری) اعمال می شود [۱۰]. در این صورت نیاز است که هر ویژگی عددی به صورت یک ویژگی باینری تبدیل شود. روشهایی که تاکنون به صورت معمول برای این تبدیل مورد استفاده قرار می گیرد از بازه ها استفاده می کنند. این روشها بر اساس برآزش کردن مقادیر عددی ویژگی ها در بازه ها کار می کنند. که این امر باعث بوجود آمدن یک عدم قطعیت بخصوص در مرزهای دامنه های مشخص شده می شود. و همچنین باعث عدم دقت نتایج و از بین رفتن اطلاعات اصلی پایگاه داده می شود. علاوه بر این یک تغییر کوچک در داده های بین رنجها باعث نتایج بسیار متفاوتی خواهد شد از این رو باعث بوجود آمدن خطاهای بزرگی در نتایج استخراجی از پایگاه داده می شود. یک روش مناسب برای غلبه بر مشکل عنوان شده این است که مقادیر ویژگی ها را به جای تبدیل به دو مقدار صفر و یک به بازه  $[0, 1]$  تبدیل کنیم که در این روش نمونه های مربوط به

راندمان بویلر در هر لحظه با توجه به روابط و جداول [۱] محاسبه می گردد. تعداد داده ها برای هر پارامتر در طول یک روز برابر ۸۶۴۰۰ است که با اعمال روش میانگین گیری از هر ۶۰ داده، بازه نمونه برداری به بازه های ۱ دقیقه تبدیل می - گردد تا علاوه بر کاهش حجم محاسبات و فضای مورد نیاز، تاثیر داده های اشتباه و همراه با نویز در خروجی کاهش یابد. پس از انجام پیش پردازش های عنوان شده با استفاده از روش کلاس بندی، داده ها بر اساس بار بویلر مطابق جدول ۲ در ۶ کلاس تقسیم می گردند. پس از کلاس بندی داده ها برای هر کلاس به طور جداگانه الگوریتم قواعد انجمنی فازی به شرحی که در بخش ۴-۱ توضیح داده خواهد شد بکار گرفته شده و برای هر یک از کلاسها متناسب با بار بویلر و سایر پارامترها میزان هوای اضافی بهینه محاسبه می گردد.

جدول ۲: کلاس های در نظر گرفته شده

شماره کلاس	محدوده بار
کلاس ۱	$load \geq 195$
کلاس ۲	$190 \leq load < 195$
کلاس ۳	$185 \leq load < 190$
کلاس ۴	$180 \leq load < 185$
کلاس ۵	$175 \leq load < 180$
کلاس ۶	$load < 175$

## ۴-۱- الگوریتم کاوش قواعد انجمنی فازی

کشف قوانین انجمنی یکی از مهمترین مسائل تحقیقاتی مطرح شده در زمینه داده کاوی است. تکنیک قوانین انجمنی یکی از رایج ترین تکنیک های علم داده کاوی است که طی سالیان اخیر، کاربرد آن در حوزه های مختلف علمی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

قوانین انجمنی، الگوهای پنهان میان اقلام موجود در پایگاه داده های بزرگ را شناسایی می کند. با داشتن یک پایگاه داده که شامل نمونه های زیادی از ویژگیهای مختلف می باشد یک قانون وابستگی عبارتی است به شکل  $X \rightarrow Y$  که در آن X و

## بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق

$$f_p^j = \frac{\mu_p^j(R_1^p)}{R_1^p} + \frac{\mu_p^j(R_2^p)}{R_2^p} + \dots + \frac{\mu_p^j(R_k^p)}{R_k^p} \quad (3)$$

(۲) تشکیل یک مجموعه میانی  $C_1$  به طوریکه جفت  $(R_s^p, \mu_p^j(R_s^p))$  برای هر داده در آن قرار می گیرد و برای هر تابع تعلق ذخیره شده در این مجموعه، برای هر ویژگی وزن مربوطه از طریق رابطه (۴) محاسبه می گردد:

$$weight_{p,s}^j = \sum_{j=1}^n \mu_p^j(R_s^p) \quad (4)$$

که در اصل این پارامتر وزن کلی ویژگی  $p$  ام در توابع عضویت مربوط به آن می باشد.

(۳) در این مرحله ماکزیمم وزن ویژگی  $p$  ام در توابع عضویتی که برای آن تعریف کرده ایم به صورت (۵) محاسبه می گردد:

$$weight_p^{\max} = \max_{s=1}^k (weight_{p,s}^j), p = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

(۴) در این مرحله شرط بزرگتر یا مساوی بودن وزن محاسبه شده در مرحله قبل از مینیمم پشتیبان تعریف شده بررسی می گردد. در صورتیکه این شرط برآورده شود تابع تعلق مربوطه در مجموعه مکرر  $L_1$  قرار می گیرد. بنابراین مجموعه  $L_1$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$L_1 = \left\{ R_p^{\max} \mid weight_p^{\max} \geq \min \sup port, 1 \leq p \leq m \right\}$$

به عبارت دیگر در این مرحله تابع عضویت با بیشترین وزن برای ویژگی  $p$  ام در مجموعه  $L_1$  قرار می گیرد.

(۵) قرار دادن  $r=1$ ، بطوریکه  $r$  تعداد آیت های قرار گرفته در مجموعه اقلام مکرر  $L_1$  می باشد.

(۶) در این مرحله مجموعه کاندید  $C_{r+1}$  با به کارگیری الگوریتم پیوند  $L_r$  با  $L_r$  تشکیل می شود. دو مجموعه از  $L_r$  با یکدیگر قابل پیوند می باشند اگر  $r-1$  عضو اول آنها با یکدیگر برابر باشند و مجموعه ترکیب شده دارای  $r+1$  عضو خواهد بود که عنصر آخر از مجموعه دوم خواهد بود.

ویژگیهای مختلف بر اساس دامنه  $[0, 1]$  بیان می شوند. در این روش ویژگیهای باینری به وسیله مجموعه های فازی بیان می شوند که بسیار مطلوبتر است [۷]. فرم کلی یک قاعده انجمنی فازی به صورت رابطه (۲) می باشد.

$$\text{if } X \text{ is } \tilde{A} \text{ and } y \text{ is } \tilde{B} \text{ then } z \text{ is } \tilde{C} \quad (2)$$

که در این قاعده  $z, y, x$  مجموعه از ویژگیهای موجود در پایگاه داده می باشد و  $\tilde{C}, \tilde{B}, \tilde{A}$  مجموعه های فازی هستند که به ترتیب توصیف کننده ویژگی های تعریف شده هستند.

در روش ارائه شده از تئوری مجموعه های فازی به منظور کاوش قوانین از داده های کمی استفاده می شود. در این الگوریتم ابتدا هر مقدار کمی توسط توابع تعلق به مجموعه های فازی با مفاهیم زبانی تبدیل می شود. سپس مقادیر اسکالر هر نمونه را محاسبه کرده و در یک مجموعه میانی ذخیره می کند. سپس پروسه استخراج قوانین فازی برای یافتن قواعد انجمنی فازی بکار گرفته می شود. در این الگوریتم ورودی ها شامل یک پایگاه داده شامل  $n$  نمونه از  $m$  ویژگی مختلف (یک پایگاه داده  $n \times m$  از داده)، یک مجموعه از توابع تعلق فازی و مینیمم پشتیبان و اطمینان تعیین شده می باشد.  $p$  امین ویژگی در نمونه  $n$  ام بوسیله  $k$  تابع عضویت بصورت  $\mu_p^j(R_s^p)$  بیان می شود که در آن  $j=1, 2, \dots, n$  تعداد نمونه ها،  $s=1, 2, \dots, k$  تعداد توابع تعلق و  $R_s^p$  توابع تعلق مربوط به ویژگی  $p$  ام را نشان می دهد. همچنین خروجی این روش یک مجموعه از قوانین انجمنی فازی با پشتیبان و اطمینان بزرگتر یا مساوی مینیمم اطمینان و پشتیبان از قبل تعیین شده می باشد.

## ۴-۱-۱- مراحل الگوریتم

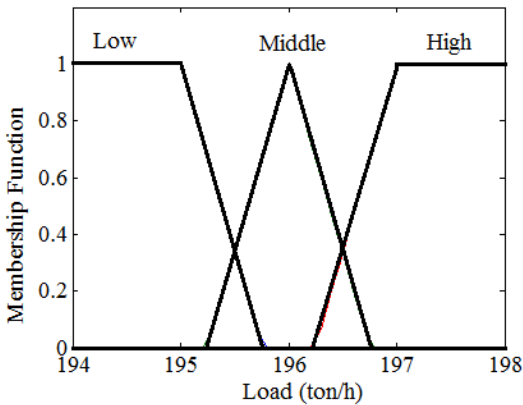
(۱) تبدیل مقدار کمی  $t_i^j$  در هر تراکنش  $T_i$  به مجموعه فازی  $f_i^j$  به طوریکه  $i=1, 2, \dots, m$  ویژگی و  $j=1, 2, \dots, n$  نمونه می باشد.  $t_i^j$  با استفاده از رابطه (۳) به مجموعه های فازی تبدیل می گردد:

### بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

خروجی الگوریتم قواعدی دارای مقدار اطمینان بزرگتر یا مساوی مینیمم اطمینان می‌باشد. به منظور اعمال روش داده‌های فازی به کلاس‌های مختلف ابتدا باید توابع تعلق فازی مربوط به هر یک از پارامترها را مشخص کنیم. در اینجا برای کلاس ۱ طبق شکل ۴ برای هر یک از ویژگیها سه تابع تعلق Low, Middle, High در نظر می‌گیریم. با اعمال روش ارائه شده به داده‌های بویلر قانون فازی به صورت (۱۰) بدست می‌آید

*if LOAD is HIGH and EXCESS AIR is middle then EFFICIENCY is high* (۱۰)

این قاعده نشان دهنده این است که اگر بار بویلر در بازه ماکزیمم و میزان هوای اضافی نیز در بازه متوسط تعریف شده قرار داشته باشند آنگاه بازده بویلر در بازه ماکزیمم قرار می‌گیرد. در نهایت با استفاده از یکی از غیر فازی سازهای ماکزیمم، میانگین مراکز یا مرکز ثقل می‌توان مقدار بهینه میزان هوای اضافی را برای دستیابی به ماکزیمم راندمان در بارهای مختلف بدست آورد.



شکل ۴: توابع عضویت مربوط به بار خروجی

در اینجا با استفاده از غیر فازی ساز میانگین مراکز خروجی‌های ۱۹۵/۹۳۳۴ برای بار بویلر، ۳۰/۱۶۱۱ برای میزان هوای اضافی بهینه و ۹۰/۴۶۱۳ برای راندمان بویلر بدست می‌آید. با اعمال روش فوق به سایر کلاس‌ها نتیجه کلی جدول ۳ حاصل می‌شود.

(۷) برای مجموعه  $r+1$  آیتی  $C_{r+1}$  با اعضای  $t_\epsilon$  بطوریکه  $\epsilon=1,2,\dots,r+1$  می‌باشد سه زیر مرحله  $1-7$  و  $2-7$  و  $3-7$  به ترتیبی که عنوان خواهد شد انجام می‌گیرد:

(۱-۷) مقدار فازی مربوط به هر یک از  $t_\epsilon$  را به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$\mu_{t_\epsilon}^j = \mu_{p1}^j(R_{p1}^{\max}) \wedge \mu_{p2}^j(R_{p2}^{\max}) \wedge \dots \wedge \mu_{pr+1}^j(R_{pr+1}^{\max}) \quad (6)$$

اگر به جای عملگر اشتراک از مینیمم استفاده کنیم خواهیم داشت:

$$\mu_{t_\epsilon}^j = \min_{\epsilon}^{r+1} \mu_{p_\epsilon}^j(R_{p_\epsilon}^{\max})$$

(۲-۷) وزن هر یک از  $t_\epsilon$  را با استفاده از رابطه (۷) حساب می‌کنیم:

$$weight_{t_\epsilon} = \sum_{j=1}^n \mu_{t_\epsilon}^j \quad (7)$$

(۳-۷) اگر وزن محاسبه شده ( $weight_{t_\epsilon}$ ) بزرگتر یا برابر مینیمم پشتیبان بود، ( $t=t_1, t_2, \dots, t_{r+1}$ ) در مجموعه  $L_{r+1}$  قرار می‌گیرد.

(۸) اگر  $L_{r+1}$  تهی بدست آمد به مرحله ۹ بازگشته و در غیر اینصورت  $r=r+1$  قرار داده و مراحل ۶ تا ۸ را تکرار می‌کنیم.

(۹) قواعد انجمنی را برای مجموعه  $q$  آیتی  $t$  با آیت‌های ( $t_1, t_2, \dots, t_q$ ) به صورت زیر بدست می‌آوریم:

(۱-۹) فرم همه قواعد انجمنی که احتمال وجود آنها هست به صورت رابطه (۸) می‌باشد:

$$t_1 \wedge \dots \wedge t_{k-1} \wedge t_{k+1} \wedge \dots \wedge t_q \Rightarrow t_k, \quad k=1,2,\dots,q \quad (8)$$

(۲-۹) پارامتر اطمینان قوانین انجمنی بدست آمده به صورت (۹) محاسبه می‌شود:

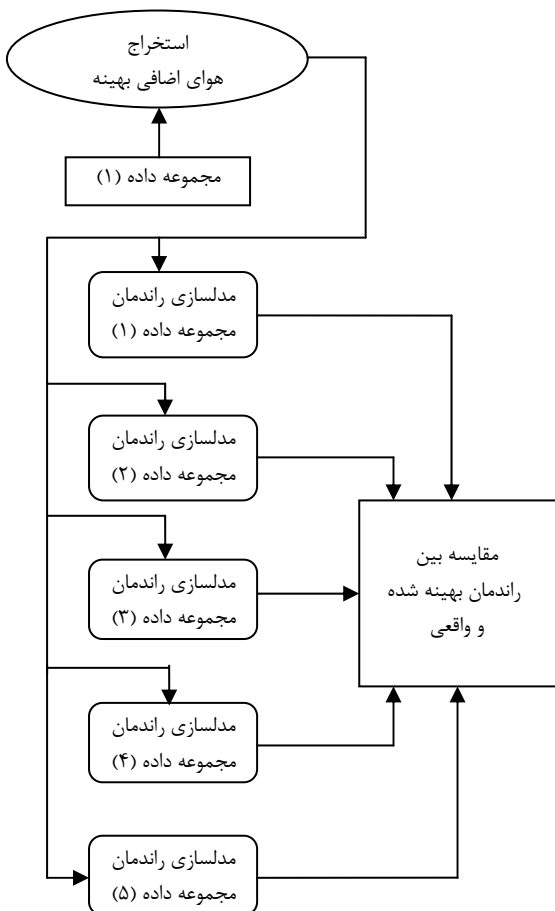
$$\frac{\sum_{j=1}^n \mu_{t_\epsilon}^j}{\sum_{j=1}^n (\mu_{t_1}^j \wedge \dots \wedge \mu_{t_{k-1}}^j \wedge \mu_{t_{k+1}}^j \wedge \dots \wedge \mu_{t_q}^j)} \quad (9)$$

### بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

میزان هوای اضافی بهینه، از یک تست مجازی بر روی سیستم بویلر که در شکل ۶ نشان داده شده است استفاده می‌گردد. در این تست ابتدا با اعمال روش شرح داده شده، رابطه بین میزان هوای اضافی بهینه و بار بویلر را از مجموعه داده (۱) استخراج می‌گردد (که در بخش ۴ محاسبه شد)، در مرحله بعد علاوه بر مجموعه داده (۱) چهار مجموعه داده دیگر بطور جداگانه در نظر گرفته و برای هر یک از آنها مدل راندمان سیستم را بر حسب سایر پارامترها بدست می‌آوریم، سپس با اعمال رابطه میزان هوای اضافی بهینه و بار بویلر به هر کدام یک از مجموعه داده‌ها راندمان بهینه شده (راندمان به‌دست آمده با میزان هوای اضافی بهینه) را بدست آورده و با راندمان واقعی مقایسه می‌کنیم. هر مجموعه داده، مربوط به داده‌های کاری یک روز بویلر می‌باشد.

جدول ۳: میزان هوای اضافی بهینه در کلاس‌های مختلف

کلاس ۱	بار	۱۹۵/۹۳۳۵
	هوای اضافه	۳۰/۱۶۱۱
	راندمان	۹۰/۴۶۱۳
کلاس ۲	بار	۱۹۳/۹۰۴۵
	هوای اضافه	۳۲/۰۹۶۵
	راندمان	۸۹/۹۳۰۶
کلاس ۳	بار	۱۸۹/۰۹۵۷
	هوای اضافه	۳۶/۸۳۳۲
	راندمان	۸۹/۰۵۷۳
کلاس ۴	بار	۱۸۴/۴۷۱۳
	هوای اضافه	۳۹/۹۳۷۸
	راندمان	۸۸/۸۸۳۸
کلاس ۵	بار	۱۷۹/۳۱۴۶
	هوای اضافه	۴۴/۰۰۳۰
	راندمان	۸۸/۷۲۵۶
کلاس ۶	بار	۱۷۴/۳۲۶۶
	هوای اضافه	۵۲/۵۲۷۲
	راندمان	۸۸/۶۵۱۸

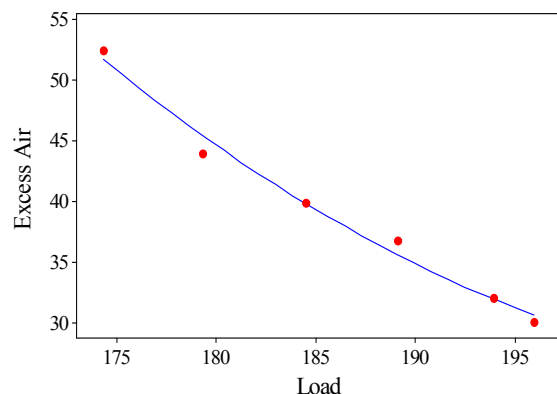


شکل ۶: تست مجازی

در نهایت با استفاده از روش رگرسیون و داده‌های جدول ۳ به رابطه (۱۱) بین بار بویلر (L) و میزان هوای اضافی بهینه (E) بدست می‌آید.

$$E = 798.2 - 7.225L + 0.0168L^2 \quad (11)$$

شکل ۵ نیز منحنی مربوط به این رابطه و داده‌های اصلی را نشان می‌دهد.



شکل ۵: رابطه بین میزان هوای اضافه بهینه و بار بویلر

#### ۴- تست مجازی

به منظور ارزیابی عملکرد رابطه بدست آمده برای محاسبه



## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

به منظور یک بررسی کلی دو معیار، درصد تعداد افزایش راندمان و درصد تعداد کاهش راندمان به صورت روابط (۱۳) تعریف می‌گردند [۲]:

$$\text{PIIE} = (\text{تعداد کل داده‌ها} / \text{تعداد افزایش راندمان}) \times 100$$

$$\text{PIDE} = (\text{تعداد کل داده‌ها} / \text{تعداد کاهش راندمان}) \times 100 \quad (13)$$

PIIE : percentage of instances with improved efficiency  
PIDE : percentage of instances with decreased efficiency

با توجه به مدل‌سازی انجام شده و طبق نتایج جدول ۴ معیار PIDE برای همه مجموعه داده‌ها برابر صفر و معیار PIIE برابر با دقت مدل می‌باشد زیرا در هیچ کدام از مجموعه داده‌ها کاهش راندمان رخ نداده است بنابراین روش ارائه شده نسبت به سایر کارهای انجام شده قبلی [۲، ۱۱] توانسته است به طور موثرتری راندمان بویلر را افزایش دهد.

## ۴-۱- شبیه‌سازی زمانی راندمان بهینه شده

در این بخش به منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد روش ارائه شده در افزایش راندمان بویلر، یک شبیه‌سازی زمانی ارائه می‌گردد به طوری که در زمانهای مختلف راندمان بهینه شده را با راندمان واقعی در آن لحظه بتوان به صورت دقیق مقایسه کرد. خروجی مدل به کار گرفته شده در این شبیه‌سازی طبق رابطه (۱۴) راندمان در زمان حال و ورودی‌های آن همان پارامترهای ورودی مدل (۱۲) به اضافه راندمان یک زمان قبل  $y(t-1)$  می‌باشد.

$$y(t) = b_0 + b_1 x_1(t) + b_2 x_2(t) + \dots + b_{10} x_{10}(t) + y(t-1) \quad (14)$$

که در این رابطه  $b_i$  ها به ازای  $i = 1, 2, \dots, 10$  ثابت‌ها هستند که با به‌کارگیری روش مدل‌سازی PLS محاسبه می‌شوند. به طور نمونه نتایج این شبیه‌سازی برای دقیقه ۵۲ تا ۸۲ در شکل ۷ و برای دقیقه ۵۰ ام و ۳ دقیقه بعد از آن در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵: نتایج شبیه‌سازی برای  $t=52$  و سه دقیقه بعد از آن

	t=52	t=53	t=54	t=55
راندمان (t-1)	۹۱/۶۵	۹۱/۵۵	۹۱/۷۷	۹۲/۸۷
راندمان (t)	۹۱/۵۵	۹۱/۷۷	۹۲/۸۷	۹۱/۲۸
راندمان واقعی	۸۸/۷۰۳	۸۸/۶۸	۹۰/۰۰۱	۸۸/۳۴

در هر مجموعه داده، راندمان بویلر در هر لحظه  $y(t)$  با استفاده از پارامترهای درصد هوای اضافی  $(x_1)$ ، دبی بخار خروجی  $(x_2)$ ، دبی گاز کوره بلند  $(x_3)$ ، دبی گاز طبیعی  $(x_4)$ ، دبی آب تغذیه  $(x_5)$ ، فشار آب تغذیه  $(x_6)$ ، درجه حرارت آب تغذیه  $(x_7)$ ، درجه حرارت بخار خروجی  $(x_8)$ ، فشار بخار خروجی  $(x_9)$  و دبی آب اسپری  $(x_{10})$  در همان لحظه مدل می‌شود. روشی که به منظور مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد رگرسیون کمترین مربعات جزئی (partial least-square regression (PLS)) است. روش PLS به طور گسترده به منظور تحلیل پیشگویانه، تحلیل رگرسیون چندگانه و تحلیل مدل‌سازی در حوزه‌های مهندسی، بیوشیمی و دیگر حوزه‌ها به خصوص هنگامی که تعداد متغیرها زیاد باشد و برخی از آنها دارای همبستگی چندگانه باشند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. به دلیل این‌که بسیاری از داده‌های عملی بویلر دارای همبستگی چندگانه هستند مدل‌سازی با روش PLS دارای مزایای زیادی نسبت به روشهای رگرسیون معمولی و سایر روشهای داده‌کاوی در این سیستم می‌باشد. مدل‌های بدست آمده با استفاده از روش PLS به فرم رابطه (۱۲) است.

$$y(t) = a_0 + a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t) + \dots + a_{10} x_{10}(t) \quad (12)$$

که در این رابطه  $x_i$  ها و  $a_i$  ها به ازای  $i = 1, 2, \dots, 10$  متغیرهای ورودی و ثابت‌ها،  $t$  زمان و  $y$  هم خروجی مدل (راندمان بویلر) است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی و مقایسه‌های انجام شده بین راندمان واقعی و راندمان بهینه‌شده در جدول ۴ است.

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی برای پنج مجموعه داده

میانگین افزایش راندمان	ماکزیمم افزایش راندمان	مینیمم افزایش راندمان	دقت مدل (%)	مجموعه داده
۰/۴۶۱۶	۰/۶۳۷۵	۰/۰۱۷۱	۹۹/۹۵	مجموعه داده (۱)
۰/۳۸۲۳	۰/۴۴۵۳	۰/۱۵۷۷	۹۹/۹۶	مجموعه داده (۲)
۱/۱۰۰۹	۱/۲۵۳۴	۰/۷۵۳۶	۹۹/۹۳	مجموعه داده (۳)
۲/۹۹۶۹	۳/۱۳۵۵	۱/۹۶۸۶	۹۹/۹۴	مجموعه داده (۴)
۰/۴۶۷۶	۰/۵۱۸۴	۰/۳۸۳۲	۹۹/۹۸	مجموعه داده (۵)
۱/۰۸۱۸۶	۱/۱۹۸۰۲	۰/۶۵۶۰۴		میانگین

## بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق

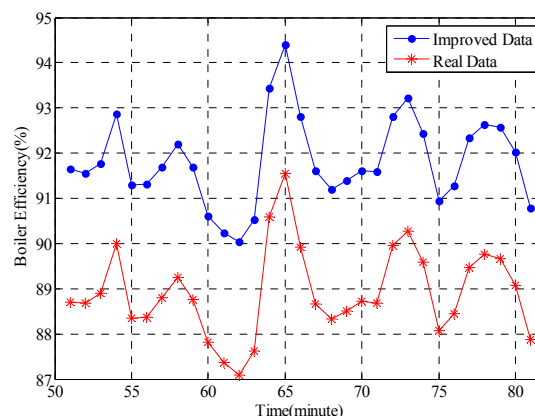
آزمایش برابر با ۶۵۶/۰ درصد بوده است. یکی از مهمترین مزیت‌های دیگر روش ارائه شده پیاده سازی عملی آسان آن با استفاده از نرم افزار کنترلی موجود در نیروگاه حرارتی ذوب آهن اصفهان می باشد.

## سپاسگزاری

در نهایت از مدیریت پژوهش و فناوری و سرپرست و کارکنان نیروگاه حرارتی کارخانه ذوب آهن اصفهان که ما را در انجام این پژوهش یاری کردند تقدیر و تشکر می نمایم.

## مراجع

- [1] Taplin. H, *Combustion Efficiency Tables*. Lilburn, GA: Fairmont Press, 1991.
- [2] Kusiak. A and Song. Z, "Combustion Efficiency Optimization and Virtual Testing: A Data-Mining Approach," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 2, no. 3, pp.176-184, Aug.2006.
- [3] Jin. T and Fu. Z, "Data Mining for Complex Thermal System Modeling", *Int. Conf. Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, pp. 560-564, 2008.
- [4] Ming. L, Baoling. L and Jun. H, "Data Mining In Conditions Analysis At A Coal-Fired Utility Boiler," *Int. Conf. Inf. Eng and Computer*, pp. 1-4, 2009.
- [5] Havlena. V and Findejs. J, "Application of model predictive control to advanced combustion control," *Control Eng. Practice*, vol. 13, no. 6, pp. 671-680, 2005.
- [6] Kuprianov. V. I, "Applications of a cost-based method of excess air optimization for the improvement of thermal efficiency and environmental performance of steam boilers," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 9, no. 5, pp. 474-498, 2005.
- [7] Krishna. G and Krishna. P, "A novel approach for statistical and fuzzy association rule mining on quantitative data", *Journal of scientific & industrial Research*, Vol.67, July 2008, pp.512-517.
- [8] Pellegrinetti. G and Bentsman. J, "H<sub>∞</sub> controller design for boilers," *Int. J. Robust Nonlinear Contr.*, vol. 4, pp. 645-671, 1994.
- [9] I.N. Wakingling, J.J. Morris, "A test of significance for partial least squares regression", *Journal of Chemometrics*, 1993, No.7, pp. 291-304.
- [10] Agrawel. R, Srikant. R, "Fast Algorithms for Mining Association Rules", *In proc of the VLDB Conference*, 1994.
- [11] Shieh. S. S, Chang. Y. H, Jang. S. S, Ma. M. D, Huang. T. S, "Statistical key variable analysis and model-based control for the improvement of thermal efficiency of a multi-fuel boiler," *journal of fuel and energy science and technology*, Vol. 89, no. 5, pp. 1141-1149, 2010.



شکل ۷: پاسخ زمانی بویلر

(نقطه: راندمان بهینه سازی شده، ستاره: راندمان واقعی)

همانطوریکه از نتایج جداول (۴) و (۵) و شکل (۷) مشخص است با به کارگیری روش پیشنهادی در تنظیم میزان هوای اضافی در سیستم بویلر، راندمان بویلر در همه زمان‌ها بهبود پیدا کرده است که این امر باعث تنظیم شدن سیستم احتراق و کاهش مصرف سوخت بویلر و کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی خواهد شد.

## ۵- نتیجه

در این مقاله با به کارگیری تکنیک‌های مختلف داده کاوی و مجموعه‌های فازی راندمان بویلر نیروگاه حرارتی کارخانه ذوب آهن اصفهان بهبود می یابد. ابتدا با استفاده از تکنیک کلاس بندی، داده‌ها بر اساس بار بویلر در ۶ کلاس قرار گرفته و سپس برای هر یک از کلاس‌ها به طور جداگانه قواعد انجمنی فازی به کار گرفته شده و میزان هوای اضافی بهینه به منظور رسیدن به راندمان ماکزیمم برای هر یک از کلاس‌ها و در اصل در بارهای مختلف بویلر بدست می آید سپس با استفاده از رگرسیون رابطه بین بار بویلر و میزان هوای اضافی بهینه به طور کلی محاسبه می گردد. در نهایت هم با به کارگیری یک تست مجازی که در آن راندمان بویلر بر اساس سایر پارامترها به روش رگرسیون کمترین مربعات جزئی مدل سازی شده است عملکرد روش ارائه شده در افزایش راندمان بویلر مورد بررسی قرار می گیرد به طوری که میانگین کمترین افزایش راندمان بویلر در طی انجام پنج