



تشخیص گرفتگی در لوله‌های کوره پیش‌گرمکن نفت خام با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان بهینه

علی چائی بخش^{1*}، نسیم انسان صفت²، سید آیدین کیائی جمالی³، علی جمالی⁴، رامین کوهی کمالی⁵

- 1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
 - 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
 - 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
 - 4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
 - 5- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
- * رشت، صندوق پستی 41635-3756، chaibakhsh@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 تیر 1394

پذیرش: 18 مرداد 1394

ارائه در سایت: 03 شهریور 1394

کلید واژگان:

گرفتگی

مدل‌سازی دینامیکی

شناساگر خطا

تشخیص گرفتگی

چکیده

در این تحقیق، استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان برای پیش‌بینی وقوع گرفتگی و همچنین تعیین درصد آن در لوله‌های بخش تابشی کوره پیش‌گرمکن نفت خام مورد مطالعه قرار گرفته است. کوره‌های پیش‌گرمکن نفت خام به عنوان یکی از المان‌های اصلی تأمین حرارت در فرآیند جداسازی مشتقات نفتی، همواره در معرض گرفتگی لوله‌ها و خطرات ناشی از آن هستند. به منظور پیش‌بینی شرایط گرفتگی در لوله‌ها، در بخش اول با توجه به پارامترهای مستقل موثر بر عملکرد کوره و بر اساس مدل‌سازی دینامیکی ارائه‌شده برای یک کوره پیش‌گرمکن نوع کابینتی، رفتار کوره در شرایط غیرایده‌آل شبیه‌سازی شده است. تأثیر تغییر نوع گرفتگی، همچنین تغییر موقعیت آن در لوله‌های مختلف بر شرایط دمایی لوله‌ها و نفت خام خروجی از آن‌ها بررسی شده است. سپس بر اساس نتایج بدست آمده از سناریوها و شرایط مختلف گرفتگی لوله، شناساگر خطا طراحی شده است. شرایط عملکردی کوره شامل افت فشار در لوله‌ها، شرایط دمایی لوله‌ها و نفت خام خروجی از آنها برای تعیین بروز گرفتگی و تعیین میزان تهنشست‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج حاصل دقت و قابلیت روش پیشنهادی برای تعیین میزان گرفتگی لوله‌ها را نشان می‌دهد.

Fouling detection inside the tubes of crude oil preheat furnace using optimized support vector machines

Ali Chaibakhsh*, Nasim Ensansefat, Seyed Aidin Kiaei Jamali, Ali Jamali, Ramin Kouhikamali

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

* P.O.B. 41635-3756, Rasht, Iran, chaibakhsh@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 12 July 2015

Accepted 09 August 2015

Available Online 25 August 2015

Keywords:

Fouling

Dynamic modeling

Fault Detector

Fouling detection

ABSTRACT

In this study, an application of support vector machines is presented for fouling detection and estimating the amount of deposit layer development and tube blockage percentage at the radiation section of the crude oil preheat furnace. Crude oil preheat furnaces are the main elements in processing crude oil in distillation towers, which always suffer from fouling and its consequent risks. In order to predict fouling inside the tubes, first by considering independent input parameters effecting the furnace performance and by using a dynamic model of a particular furnace, the behaviors of the furnace in unusual conditions were simulated. The effects of fouling type and its location inside the tubes were considered on the thermal performances and pressure drops of the furnace. In the second part, based on the different fouling scenarios, a fouling detection mechanism was designed. The operational conditions such as pressure drop inside the tubes, temperatures of the tubes and temperatures of the crude oil were employed for fouling detection and evaluating the thickness of deposits. The obtained results indicated the accuracy and feasibility of the proposed approach.

1- مقدمه

می‌شود [2]. در کوره‌های پیش‌گرمکن نفت خام، این پدیده تابع عوامل مختلفی از جمله نرخ عبور جریان، دمای جریان (دمای جریان وابسته به شرایط احتراق، شرایط نفت خام ورودی به کوره‌ها و غیره است)، ترکیب سیال، ترکیب گرفتگی و غیره است. بنابراین مدل‌سازی دقیق گرفتگی در

یکی از مهم‌ترین مشکلات در صنایع نفت که تأثیری قابل‌توجه بر عملکرد سیستم دارد، گرفتگی در تجهیزات فرایند است [1]. تجمع رسوب (ته‌نشست‌های ناخواسته) روی سطوح مبدل‌های گرمایی، گرفتگی نامیده

Please cite this article using:

A. Chaibakhsh, N. Ensansefat, S. A. Kiaei Jamali, A. Jamali, R. Kouhikamali, Fouling detection inside the tubes of crude oil preheat furnace using optimized support vector machines, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 49-55, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

عددی برای تولید داده و تشخیص گرفتگی [16]. طراحی مشاهده‌گر فازی با ورودی‌های نامعین از نوع چندجمله‌ای، به منظور تشخیص گرفتگی در مبدل گرمایی [17] نیز از جمله برخی روش‌های دیگر است. بررسی رفتار ترمودینامیکی و هیدرودینامیکی رسوب واکس، مطالعه مکانیزم تشکیل آن، تعیین پارامترهای موثر در تشکیل آن و ارائه مدل‌های پیش‌بینی کننده رسوب واکس در نفت خام، نیز یکی از تحقیقات صورت گرفته برای شناخت این پدیده و تعیین مدل مناسب از آن است [18].

علیرغم مطالعات انجام‌شده، تشخیص گرفتگی بر اساس متغیرهای ورودی و خروجی قابل اندازه‌گیری و قابل کنترل، می‌تواند موثر باشد. همچنین بررسی عوامل مختلف موثر بر شرایط خروجی کوره، برای تشخیص به موقع گرفتگی در لوله‌ها لازم است. استفاده از یک مدل دینامیکی مناسب که قادر به پیش‌بینی رفتار کوره در شرایط عملیاتی مختلف باشد، برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه بسیار ارزشمند است. به این منظور، در این تحقیق گرفتگی در لوله‌ها بر اساس شرایط ورودی کوره، افت فشار در لوله‌ها، شرایط دمایی لوله‌ها و نفت خروجی از لوله‌ها، تشخیص داده می‌شود. به این معنی که وقوع گرفتگی و درصد گرفتگی (میزان کاهش شعاع داخلی لوله‌ها) تعیین می‌گردد. با این هدف، در بخش اول شرح مختصری از شبیه‌سازی کوره در شرایط عملیاتی مختلف ارائه می‌شود. سپس در بخش دوم، وقوع گرفتگی و میزان آن با کاربرد روش ماشین‌های بردار پشتیبان پیش‌بینی می‌شود.

2- شبیه‌سازی کوره در شرایط غیر ایده‌آل

در این تحقیق، از مدل‌سازی دینامیکی مربوط به کوره پیش‌گرمکن نفت خام که در منبع [19] ارائه شده است، برای انجام آزمایش و تولید داده استفاده می‌شود. با توجه به اینکه مدل‌سازی انجام‌شده برای کوره مورد بررسی در این منبع در شرایط عملیاتی مطلوب بوده، با انجام تغییراتی رفتار کوره در شرایط عملیاتی مختلف قابل بررسی خواهد بود. کوره مورد بررسی در این تحقیق، از نوع کابینتی با یک محفظه احتراق و 2 بخش جابجایی است که در شکل 1 نمایش داده شده است.

راندمان کوره در شرایط مختلف ثابت نبوده و می‌تواند از رابطه (1) تعیین شود.

$$\eta = \frac{\left((1 + (1 + EA)AF_s)C_{pp}(T_c - T_{ext}) + Q_{lat} \right)}{HHV} \quad (1)$$

در رابطه (1)، T_c دمای آدیاباتیک شعله، T_{ext} دمای گازهای خروجی از کوره، C_{pp} ظرفیت گرمایی ویژه محصولات احتراق، EA درصد هوای اضافی احتراق، AF_s نسبت استوکیومتری هوا به سوخت، HHV ارزش حرارتی بالایی سوخت و Q_{lat} گرمای نهان است. گرمای نهان طی تغییر فاز آزاد می‌شود و با توجه به شرایط دمایی محصولات احتراق که در رابطه (2) نشان داده شده، تعیین می‌گردد [20].

$$Q_{lat} = 0 \quad \text{when } T_{ext} > 140 \text{ }^\circ\text{F} \\ Q_{lat} = HHV - LHV \quad \text{when } T_{ext} < 140 \text{ }^\circ\text{F} \quad (2)$$

همچنین به منظور شبیه‌سازی گرفتگی در لوله‌ها، در این تحقیق شعاع داخلی لوله‌ها با استفاده از رابطه (3)، با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

$$r = r_0 e^{-\tau t} \quad (3)$$

در رابطه (3)، r_0 شعاع اولیه لوله‌ها است. τ ثابت زمانی بوده، در این رابطه مقدار کوچکی در حدود 10^{-7} در نظر گرفته می‌شود. گرفتگی در لوله‌ها از نوع واکس پارافینی در نظر گرفته می‌شود.

شرایط عملیاتی مختلف، بسیار پیچیده است [3]. وقوع گرفتگی سبب بروز مشکلات جدی در کوره‌ها شده که از آن جمله می‌توان به کاهش راندمان، افزایش مصرف سوخت، اتلاف انرژی به دلیل افزایش افت فشار، تولید گازهای آلاینده و از سوی دیگر افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری اشاره نمود. کوره‌های پیش‌گرمکن نفت خام، در شرایط معمول پس از گذشت زمان عملیاتی 2 تا 3 سال، به علت ایجاد درصد بالای گرفتگی در لوله‌ها ناشی از بروز مشکلات مختلف، می‌بایست خاموش شوند. با این وجود، تشکیل نقطه گرم¹ در لوله‌ها به دلیل عدم مدیریت احتراق و یا نقص در سیستم مشعل‌ها نیز یکی از عوامل مهم در گرفتگی سریع لوله‌ها شناخته می‌شود. از خطرات ایجاد این وضعیت، گرمادیدگی سریع لوله‌ها و ترکیدن آنها بوده که می‌تواند سبب نشت نفت خام به داخل کوره و انفجار و آتش‌سوزی‌های عظیم در آنها شود. این شرایط، توجه به وضعیت عملکرد کوره و بررسی انحراف آن از شرایط معمول را ضروری کرده است [5,4].

کنترل موثر متغیرهای موثر بر گرفتگی، می‌تواند امکان رسوب‌گذاری در واحدهای نفت خام را تا حدودی کمینه کند. به دلیل ملاحظات محیطی و اقتصادی ناشی از گرفتگی، در صورت امکان تشخیص و کاهش گرفتگی امری ضروری است. مطالعات درخصوص گرفتگی می‌تواند به سه زمینه مکمل هم تقسیم شود: اصول گرفتگی (شیمی و شرایط جریان)، کاهش گرفتگی (فاز طراحی، تصفیه آب، پردازش سطح و غیره) و نظارت بر گرفتگی (تکنیک‌های مبتنی بر مدل، سنسورها و غیره) [6]. بر این اساس، مطالعات گسترده‌ای به منظور تشخیص گرفتگی و کاهش اثرات ناشی از این پدیده در مبدل‌های گرمایی انجام شده است. از جمله روش‌های ارائه‌شده می‌توان به تکنیک‌های ماوراء صوت، صوتی و نوری (تنها گرفتگی موضعی را بررسی می‌کنند) برای تشخیص آنالین گرفتگی، مدل‌سازی مبدل گرمایی و تشخیص گرفتگی با استفاده از شبکه عصبی، سنجش مقاومت الکتریکی برای تشخیص انباشتگی گرفتگی در مبدل گرمایی و فیلتر کلمن گسترش‌یافته² برای تشخیص گرفتگی اشاره کرد [7].

از جمله روش‌های مورد استفاده برای تشخیص گرفتگی، روش‌های مدل پایه مبتنی بر قوانین پایستگی جرم و انرژی است. این روش‌ها بر اساس تناقض مشاهده شده بین اطلاعات سنسورها و مدل تصادفی پایستگی جرم و انرژی عمل می‌کنند. این روش‌ها به علت وابستگی دمایی جریان به اندازه‌گیری دبی، برای کاربرد در همه شرایط مناسب نیست [8]. همچنین استفاده از مدل‌های آستانه گرفتگی که در طراحی و بررسی عملکرد مبدل‌های گرمایی کاربرد دارد، نیازمند محاسبه انرژی فعال‌سازی، نرخ گرفتگی و برخی خواص فیزیکی نفت، در چندین دمای مختلف فیلم است [10,9]. استفاده از مشاهده‌گرهای تطبیقی به منظور تعیین ضریب انتقال حرارت کلی مبدل گرمایی برای تخمین اقدامات پیشگیرانه موثر است [11]. استفاده از روش‌های آماری و شبکه عصبی برای تعیین راندمان و تعیین نرخ گرفتگی یکی از روش‌های موثر برای کاهش اثرات مخرب گرفتگی است که نیازمند داده‌های عملیاتی ثبت‌شده از پالایشگاه‌ها است [12]. استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی گرفتگی در مبدل‌های گرمایی است. به این ترتیب که بر اساس داده‌های عملیاتی ثبت‌شده توسط سیستم مانیتورینگ پالایشگاه شبکه شکل می‌گیرد [13]. مدل‌سازی گرفتگی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی [14]، استفاده از بازدارنده‌های رسوب [15]، کاربرد روش‌های

1- Hot spot
2- Extended Kalman filter

فولاد کربن استیل بویلر بوده، ماکزیمم دمای طراحی لوله‌ها 922 درجه کلون است. در شکل 2، افزایش دمای لوله با ایجاد گرفتگی در یکی از لوله‌های گذر اول، مشاهده می‌شود. با افزایش میزان گرفتگی در لوله، دمای لوله به شدت افزایش می‌یابد.

با افزایش میزان گرفتگی در لوله‌ها و در نتیجه کاهش نرخ انتقال حرارت به سیال داخل لوله، دمای سیال به تدریج و با افزایش ضخامت گرفتگی، کاهش می‌یابد. در شکل 3، تغییرات دمای سیال با زمان ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، زمانی که گرفتگی تنها در یکی از لوله‌ها شکل بگیرد، به علت تغییر دمای کم سیال در لوله‌های بخش تابشی کوره، تأثیر پارامترهای ورودی و تشخیص گرفتگی در کمترین حالت، افت دما بسیار کم خواهد بود.

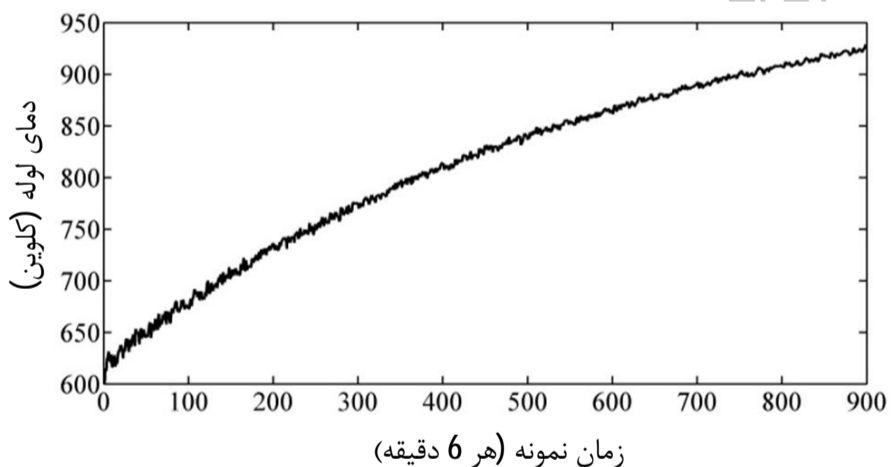
همچنین با ایجاد گرفتگی در لوله‌ها، افت فشار در لوله‌های بخش تابشی افزایش می‌یابد. در شکل 4، تغییرات فشار خروجی از لوله مشاهده می‌شود که با توجه به توضیحات گفته شده افت فشار بسیار ناچیز است.

2-1- تغییر نوع گرفتگی و موقعیت آن در لوله‌ها

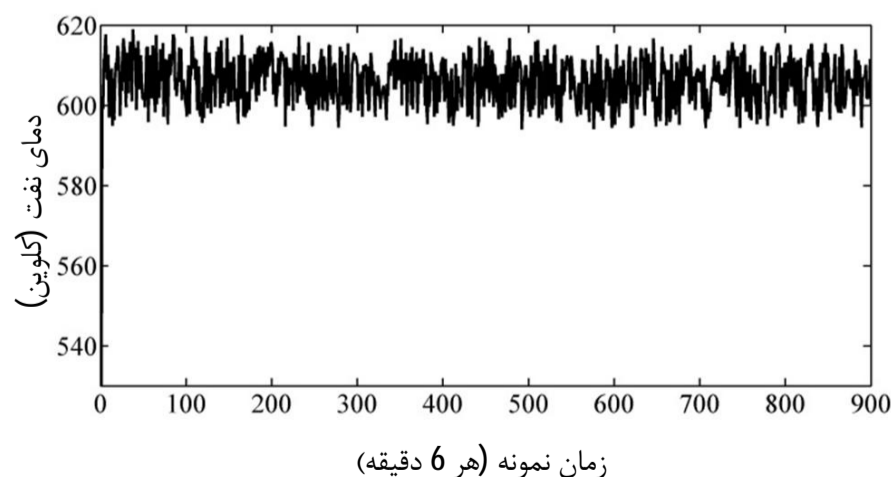
با تغییر نوع گرفتگی، ضریب هدایت آن تغییر یافته، مدت زمان عملکرد کوره تا رسیدن به موقعیت بحرانی تغییر می‌یابد.

به این ترتیب که با کاهش رسانندگی گرمایی، مقاومت گرمایی مربوط به گرفتگی افزایش می‌یابد. در نتیجه دمای لوله‌ها سریعتر افزایش یافته و دمای نفت سریعتر افت می‌کند. از طرفی با افزایش ضریب رسانندگی، مقاومت گرمایی کاهش یافته، دمای لوله‌ها با سرعت کمتری افزایش یافته و دمای نفت به تدریج افت می‌کند.

در صورت ایجاد گرفتگی در چندین لوله به صورت همزمان، افت دمای نفت و افت فشار در لوله‌ها افزایش یافته، محسوس‌تر خواهد بود. افت فشار و دما به ترتیب در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده است.



شکل 2 افزایش دمای لوله با افزایش درصد گرفتگی



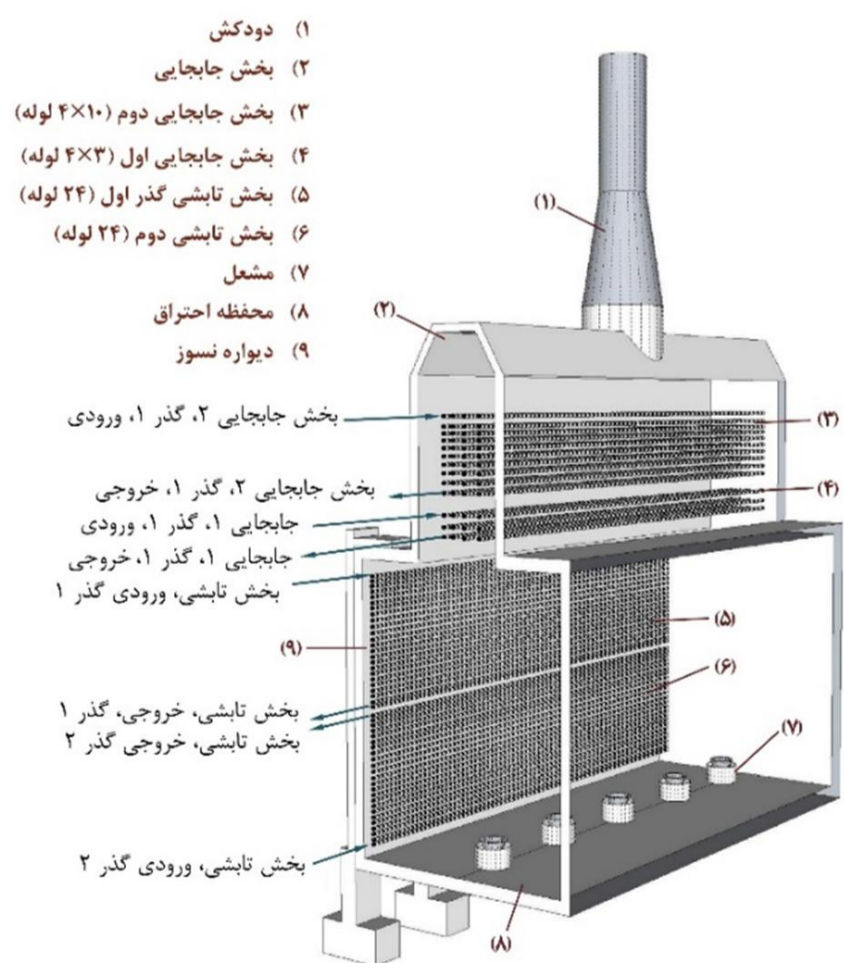
شکل 3 تغییرات دمای نفت خروجی از کوره با افزایش میزان گرفتگی

از جمله متغیرهای عملیاتی تأثیرگذار بر عملکرد کوره، مکش، درصد هوای اضافی، دبی و فشار سوخت، دبی و فشار هوای احتراق، دمای سوخت، دمای گازهای خروجی از دودکش است [21]. باید به این نکته توجه نمود که در این تحقیق، تغییر ترکیب نفت خام و ترکیب سوخت در یک بازه زمانی معین، تقریباً ثابت در نظر گرفته شده است. در این شرایط می‌توان متغیرهای دمای نفت ورودی به کوره، دبی نفت ورودی به کوره، دبی هوای ورودی، دبی سوخت و میزان گرفتگی را به عنوان متغیرهای مستقل موثر بر عملکرد کوره در نظر گرفت. مسئله بررسی گرفتگی در کوره صرفاً در شرایط حالت پایای آن میسر بوده، به این معنی که تغییرات ناگهانی و شدید پارامترهای ورودی موثر بر عملکرد کوره نباید در نظر گرفته شود. به منظور شبیه‌سازی شرایط عملیاتی نامطلوب در مدل‌سازی، متغیرهای ورودی مستقل و موثر بر عملکرد کوره، با تغییرات اندک (بین بیشینه 2 و کمینه 3 درصد) از شرایط مطلوب، مغشوش می‌شوند. با کاهش شعاع داخلی لوله، مقاومت گرفتگی که به صورت رابطه (4) پیشنهاد شده، افزایش می‌یابد.

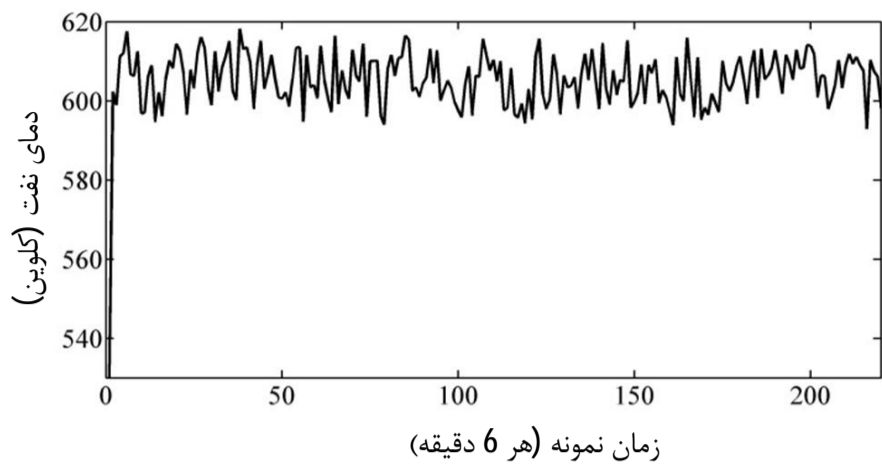
$$R_f = \frac{1}{2\pi K_c L_t} \ln \left(\frac{r_{in}}{r_{in} - \delta} \right) \quad (4)$$

در رابطه (4)، R_f مقاومت گرفتگی، K_c رسانندگی گرمایی گرفتگی، L_t طول لوله، r_{in} شعاع داخلی لوله و δ ضخامت گرفتگی است.

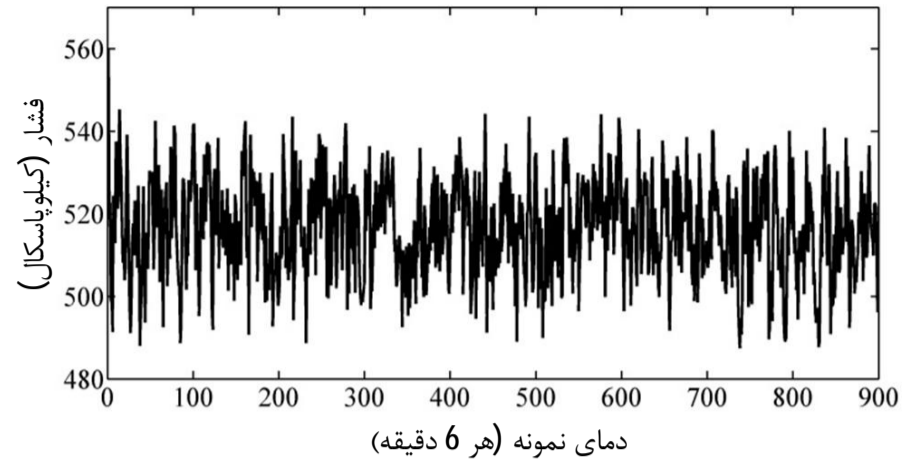
با افزایش مقاومت گرفتگی، نرخ انتقال حرارت منتقل شده از لوله‌ها به سیال داخلی با گذشت زمان، به شدت کاهش می‌یابد. این پدیده موجب افزایش شدید دمای لوله، افزایش افت فشار و انحراف دمای سیال از نقطه مطلوب می‌گردد. با رسیدن دمای لوله به بیشینه دمای طراحی آن، کوره می‌بایست خاموش شود. در این صورت تعیین موقعیت بحرانی لوله بسیار مهم خواهد بود. این موقعیت مکانی در نظر گرفته می‌شود که در آن حداکثر ضخامت گرفتگی مجاز بر سطوح داخلی لوله، حداقل باشد. در این حالت، ماکزیمم درصد گرفتگی مجاز در لوله‌ها بین 3 تا 4 درصد بوده، به این معنی که با شکل‌گیری این مقدار گرفتگی بر روی سطح داخلی لوله، لوله به بیشینه دمای طراحی رسیده، ادامه کار کوره خطرناک خواهد بود [22]. جنس لوله‌ها،



شکل 1 ساختار کوره مورد بررسی [19]



شکل 6 افزایش افت دمای نفت خروجی از کوره با ایجاد گرفتگی در تعداد لوله‌های بیشتر



شکل 4 تغییرات فشار خروجی از کوره با افزایش میزان گرفتگی

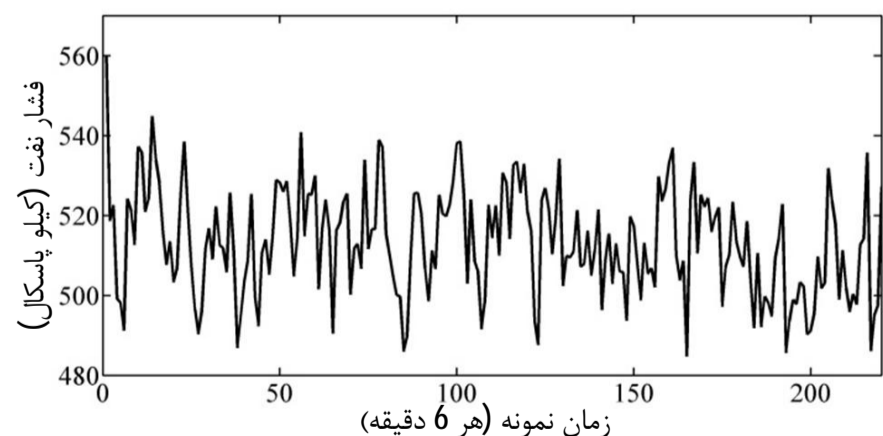
3- تشخیص گرفتگی

پیش‌بینی وقوع گرفتگی بر اساس مشخصه‌های ورودی و خروجی کوره، همچنین تعیین درصد گرفتگی در لوله‌ها برای کنترل به موقع این پدیده، بهبود موثر کیفیت محصولات خروجی و در نتیجه پیشگیری از بروز خسارت‌های جبران‌ناپذیر، ضروری است. استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان به عنوان یکی از راهکارهای کلیدی در شناسایی و کلاسه‌بندی انواع خطا در سیستم‌های صنعتی مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرد. بر این اساس، به منظور شناسایی گرفتگی و کلاسه‌بندی درصد گرفتگی بر اساس داده‌های عملکرد کوره در این تحقیق از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. در این بخش، بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی و با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان، وقوع گرفتگی و درصد گرفتگی در لوله‌ها تعیین می‌گردد.

3-1- ماشین بردار پشتیبان¹

ماشین بردار پشتیبان یک روش یادگیری با نظارت است که در طبقه‌بندی، رگرسیون و تخمین تابع کاربرد دارد. مزیت اصلی این روش، استفاده از تابع‌های کرنل، نبود مینیمم‌های محلی، پراکندگی راه‌حل و قابلیت تعمیم حاصل از بهینه‌سازی حاشیه است. به طور خلاصه، ماشین بردار پشتیبان با نگاشت داده‌های آموزشی (با استفاده از توابع کرنل) به فضای با ابعاد بالاتر، یک مرز تصمیم‌گیری ایجاد کرده، سپس ابرصفحه با حاشیه بیشینه را در آن فضا می‌یابد. در نهایت این ابرصفحه می‌تواند به عنوان یک طبقه‌بندی‌گر باشد. راه حل به صورت مجموع وزنی نقاط داده ارائه می‌شود، که در آن نقاط داده با وزن‌های غیر صفر، بردارهای پشتیبان نامیده می‌شوند [23].

در ماشین‌های بردار دو کلاسه، داده‌ها به دو کلاس طبقه‌بندی می‌شوند. در صورتی که داده‌ها به صورت خطی جداپذیر باشند، طبقه‌بندی کننده



شکل 5 افزایش افت فشار با ایجاد گرفتگی در تعداد لوله‌های بیشتر

با حل مسئله بهینه‌سازی رابطه (5) و با در نظر گرفتن قید رابطه (6) بدست می‌آید.

$$\min(Q(W)) = \frac{1}{2} \|W\|^2 \quad (5)$$

$$y_i(W^T X_i + b) \geq 1 \text{ for } i = 1, \dots, M \quad (6)$$

در رابطه‌های (5) و (6)، Q تابع، y پاسخ سیستم و X ورودی سیستم است. همچنین W بردار نرمال و b جمله خطا است که به ترتیب از روابط (7) و (8) تعیین می‌شوند.

$$W = \sum_{i=1}^M \alpha_i y_i X_i \quad (7)$$

در رابطه (7)، α_i ضرایب می‌باشند.

$$b = \frac{1}{|S|} \sum_{i \in S} (y_i - W^T X_i) \quad (8)$$

که در آن، S مجموعه شاخص‌های بردار پشتیبان است.

زمانی که داده‌ها به صورت خطی جداپذیر نیستند، ماشین بردار حاشیه نرم² مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت، ابرصفحه بیشتر داده‌ها را جدا می‌کند نه همه آن‌ها را. برای منظور کردن جداناپذیری، متغیرهای نامنفی کمکی ($\xi_i > 0$) به همراه پارامتر جریمه C به رابطه (5) اضافه می‌شود که در رابطه (9) آورده شده است:

$$\min(Q(W, \xi)) = \frac{1}{2} \|W\|^2 + C \sum_i \xi_i \quad (9)$$

$$y_i(W^T X_i + b) \geq 1 - \xi_i \text{ for } i = 1, \dots, M \quad (10)$$

در یک ماشین بردار پشتیبان، ابرصفحه بهینه به منظور بیشینه کردن قابلیت تعمیم تعیین می‌شود. اما زمانی که داده‌های آموزشی به صورت خطی جداپذیر نباشند، حتی با بهینه‌سازی ابرصفحه‌ها، طبقه‌بندی‌گر بدست آمده ممکن است قابلیت تعمیم بالایی نداشته باشد. بنابراین به منظور افزایش تفکیک‌پذیری خطی، فضای ورودی اصلی به یک فضای ضرب نقطه‌ای با ابعاد بالا که فضای مشخصه نامیده می‌شود، نگاشت می‌گردد. با استفاده از تابع برداری غیرخطی $g(X) = (g_1(X), \dots, g_l(X))^T$ بردار ورودی m بعدی X به فضای مشخصه l بعدی نگاشت می‌شود. تابع تصمیم خطی در فضای مشخصه به صورت رابطه (11) می‌باشد.

$$D(X) = W^T g(X) + b \quad (11)$$

بر اساس تئوری هیلبرت، نگاشت $g(X)$ که X را به فضای مشخصه ضرب نقطه‌ای نگاشت می‌کند، رابطه (12) را برآورده می‌کند.

$$H(X, \hat{X}) = g^T(X) g(\hat{X}) \quad (12)$$

2- soft-margin support vector machine

1- Support vector machine (SVM)

جدول 2 دقت شناساگر خطا با در نظر گرفتن فشار و دمای نفت به عنوان پاسخ

گذر	خروجی	تابع شعاعی واحد گوسی	تابع پرسپترون چندلایه
	فشار در خروجی لوله	0/6253	0/399
گذر اول	دمای نفت در خروجی لوله	0/5718	0/5158
	فشار در خروجی گذر	0/5036	0/4842
	فشار در خروجی لوله	0/6107	0/4337
گذر دوم	دمای نفت در خروجی لوله	0/4672	0/5182
	فشار در خروجی گذر	0/5304	0/5304

به اینکه در این تحقیق هدف تشخیص گرفتگی در کمترین حالت است، محدوده کوچک تغییرات فشار و دمای نفت، برای عیب‌یابی و تشخیص گرفتگی از دقت پایین‌تری برخوردار هستند.

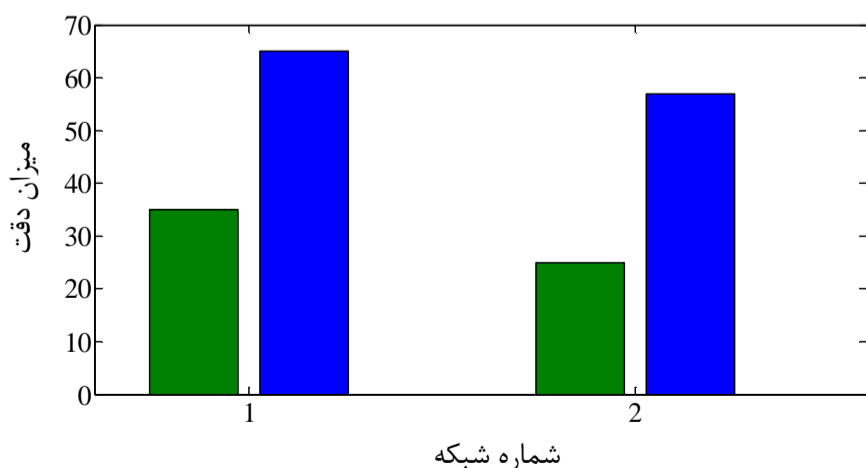
3-3- تشخیص درصد گرفتگی

3-3-1- ماشین بردار پشتیبان معمولی

به منظور کلاسه‌بندی درصد گرفتگی بر اساس داده‌های عملکردی کوره، از روش ماشین بردار پشتیبان چند کلاسه و روش دوجفتی مبتنی بر درخت تصمیم استفاده شده است. به این ترتیب درصد گرفتگی به 6 کلاس طبقه‌بندی می‌شود.

- کلاس اول، درصد گرفتگی کمتر از 0/03 درصد (سالم)،
- کلاس دوم، درصد گرفتگی بین 0/03 تا 1/1 درصد،
- کلاس سوم، درصد گرفتگی بین 1/1 تا 2/1 درصد،
- کلاس چهارم، درصد گرفتگی بین 2/1 تا 3/1 درصد،
- کلاس پنجم، درصد گرفتگی بین 3/1 تا 4/2 درصد
- کلاس ششم با درصد گرفتگی بیشتر از 4/2 درصد،

فشار نفت در خروجی از لوله مورد نظر و دمای لوله، هر یک همراه با دمای ورودی نفت، فشار ورودی نفت، دبی سوخت و دبی هوای ورودی احتراق به عنوان متغیرهای ورودی و درصد گرفتگی در لوله به عنوان خروجی، در نظر گرفته می‌شوند. به این ترتیب، شبکه‌ای با 5 ورودی و یک خروجی، آموزش داده شده، عملکرد آن در پیش‌بینی درصد گرفتگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نمونه نتایج برای یکی از لوله‌ها در گذر اول آورده شده است؛ یعنی فرض شده است گرفتگی بر سطح داخلی این لوله تشکیل شود. در شکل 7، دقت عملکرد شناساگر طراحی شده برای 6 کلاس گرفتگی، با در نظر گرفتن دمای لوله، همچنین فشار خروجی از لوله مورد بررسی به عنوان یکی از ورودی‌های شبکه، داده شده است. ستون‌های سمت چپ در هر مورد، مربوط به فشار و ستون‌های سمت راست مربوط به دمای لوله است. برای 6



شکل 7 میزان دقت شناساگر با در نظر گرفتن دمای لوله و فشار خروجی به عنوان ورودی

به این ترتیب، از $H(X, \hat{X})$ برای آموزش و طبقه‌بندی به جای $g(X)$ استفاده می‌شود. توابعی که شرط فوق را برآورده می‌کنند، توابع کرنل نامیده می‌شوند [24]. توابع متعددی می‌توانند به عنوان تابع کرنل انتخاب شوند. از آنجا که جمع دو تابع معین مثبت بصورت معین و مثبت خواهد بود، می‌توان با جمع توابع با یکدیگر، توابع کرنل پیچیده‌تری نیز بدست آورد. بنابراین انتخاب تابع کرنل مناسب یکی از پارامترهای مهم در تعیین نحوه عملکرد ماشین بردار پشتیبان است که باید با توجه به ساختار مسئله و داده‌های ورودی تعیین گردد. هر یک از توابع کرنل دارای پارامترهای تنظیم کننده‌ای بوده، تعیین درست مقادیر آن‌ها منجر به بهبود عملکرد تابع کرنل می‌گردد.

برای مسائل چند کلاسه، ماشین‌های بردار پشتیبان چند کلاسه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق، از ماشین بردار پشتیبان دو جفتی مبتنی بر درخت تصمیم¹ برای تشخیص درصد گرفتگی در لوله‌ها استفاده شده است. در ماشین‌های بردار پشتیبان دو جفتی، در حالت معمول، توابع تصمیم برای تمام ترکیبات دوتایی کلاس‌ها تعیین می‌شود. در تعیین یک تابع تصمیم برای یک جفت کلاس، از داده‌های آموزشی مربوط به آن دو کلاس استفاده می‌شود؛ بنابراین در هر دوره آموزش، تعداد داده‌های آموزشی کاسته می‌شود. برای رفع نواحی غیرقابل طبقه‌بندی در ماشین‌های بردار پشتیبان دوجفتی، تیلور و همکاران ماشین‌های بردار پشتیبان دو جفتی مبتنی بر درخت تصمیم را پیشنهاد دادند. در این روش مشابه با روش مرسوم، $\frac{n(n-1)}{2}$ تابع تصمیم برای یک مسئله n کلاسی تشکیل می‌شود. مزیت این روش، سرعت بالاتر آن در مقایسه با روش مرسوم است [24].

3-2- تشخیص وقوع گرفتگی

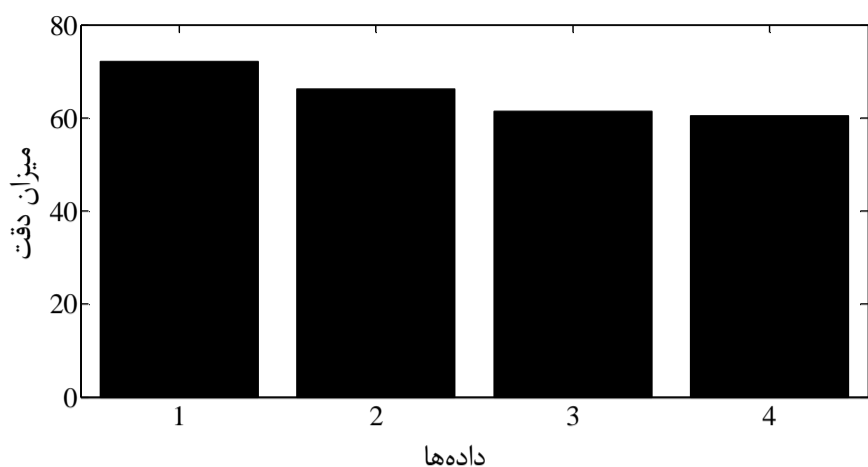
در این تحقیق، برای تشخیص وقوع گرفتگی بر اساس داده‌های عملکردی کوره، از روش ماشین بردار پشتیبان دو کلاسه استفاده می‌شود. با مغشوش کردن پارامترهای ورودی مستقل کوره، شامل دمای نفت در ورودی کوره، دبی نفت ورودی، دبی هوای ورودی و دبی سوخت (با تغییرات بین بیشینه 2 درصد و کمینه 3 درصد نسبت به مقادیر نامی)، همچنین ایجاد گرفتگی در لوله، دما و فشار نفت در خروجی لوله، دمای لوله، دما و فشار نفت در خروجی از گذر به عنوان پاسخ‌های مورد نظر ثبت می‌شوند. سپس شبکه‌ای با 5 ورودی و یک خروجی برای هر خروجی تشکیل شده، با تعیین محدوده مطلوب هر یک از خروجی‌ها، ماشین بردار پشتیبان دو کلاسه آموزش داده می‌شود. شناساگر خطای طراحی شده، به منظور طبقه‌بندی داده‌ها به دو کلاس مطلوب و غیر مطلوب، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه نتایج برای یکی از لوله‌ها در گذر اول و گذر دوم با تابع‌های کرنل مختلف در جدول 1 آورده شده است. پارامترهای مربوط به توابع کرنل برابر با مقادیر تعریف شده در متلب در نظر گرفته شدند.

در جدول 2، دقت شناساگر طراحی شده در پیش‌بینی وقوع گرفتگی بر اساس فشار خروجی از لوله، دمای نفت در خروجی از لوله و فشار در خروجی از گذر و با استفاده از تابع‌های کرنل مختلف، نشان داده شده است. با توجه

جدول 1 دقت شناساگر خطا با در نظر گرفتن دمای لوله به عنوان پاسخ

گذر	خروجی	تابع شعاعی واحد گوسی	تابع درجه دوم	تابع پرسپترون چندلایه
گذر اول	دمای لوله	0/9	0/96	0/59
گذر دوم	دمای لوله	0/91	0/96	0/59

1- Decision Directed Acyclic Graph Support Vector Machines (DDAG)



شکل 9 میزان دقت برای داده‌ها با در نظر گرفتن فشار خروجی از لوله به عنوان ورودی

جدول 3 پارامترهای بهینه ماشین بردار پشتیبان

پارامتر جریمه (C)	پارامتر تابع کرنل (σ)	تابع کرنل	دما
58/9950	9/6995	تابع شعاعی واحد گوسی	دمای لوله
36/7369	26/7715	تابع شعاعی واحد گوسی	فشار نفت

پیش‌گرمکن نفت خام مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی، کوره در شرایط عملیاتی نامطلوب شبیه‌سازی و داده‌های عملیاتی تولید شد. پارامترهای مستقل موثر بر عملکرد کوره، دبی نفت ورودی، دمای نفت ورودی، دبی سوخت، دبی هوای ورودی و میزان گرفتگی در لوله‌ها در نظر گرفته شدند. با معشوش کردن پارامترهای ورودی، رفتار کوره در شرایط عملیاتی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

با انحراف پارامترهای ورودی موثر بر عملکرد کوره از مقادیر نامی و با گذشت زمان، شرایط دمایی نفت و لوله‌ها تغییر می‌یابد. در نتیجه، به تدریج کک بر سطوح داخلی لوله‌ها شکل می‌گیرد. با ایجاد گرفتگی در لوله‌های مختلف در بخش تابشی کوره، لایه عایقی ایجاد شده که نرخ انتقال حرارت از لوله به سیال داخلی را به شدت کاهش می‌دهد، در نتیجه دمای لوله به شدت افزایش یافته و دمای نفت به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین با ایجاد گرفتگی در لوله افت فشار افزایش می‌یابد. با رشد گرفتگی، کاهش در دما و فشار نفت محسوس‌تر خواهد بود. از طرفی با شکل‌گیری گرفتگی در چندین لوله به صورت همزمان، کاهش دما و فشار در خروجی از کوره، محسوس‌تر بود.

به منظور تشخیص وقوع گرفتگی در لوله‌ها، شناساگر خطا در 5 حالت مختلف طراحی شد. در این حالت‌ها، دمای لوله، دما و فشار نفت خروجی از لوله و فشار نفت خروجی از گذر، به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. با ارزیابی دقت عملکرد شناساگرها، نتیجه گرفته شد که تشخیص گرفتگی بر اساس دمای لوله‌ها از دقت بالایی برخوردار است. در تحقیق، هدف تشخیص گرفتگی در شرایطی است که حداکثر مقدار مجاز گرفتگی در لوله کمینه باشد؛ در این شرایط، حداکثر درصد گرفتگی مجاز در لوله‌ها 3 تا 4 درصد است.

همچنین برای تعیین درصد گرفتگی در لوله‌ها، با تعیین محدوده درصد گرفتگی، 6 کلاس مختلف در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از ماشین‌های بردار چند کلاسه و روش دوجفتی مبتنی بر درخت تصمیم، پانزده شبکه ماشین بردار پشتیبان دو کلاسه تشکیل شد. با ارزیابی عملکرد این شبکه، نتیجه گرفته شد که تعیین درصد گرفتگی در لوله‌ها بر اساس دمای لوله از

کلاس، پانزده شبکه ماشین بردار پشتیبان دو جفتی تشکیل می‌شود. تابع کرنل (1)، تابع پرسپترون چندلایه و تابع کرنل (2)، از نوع تابع شعاعی واحد گوسی است. پارامترهای مربوط به توابع کرنل برابر با مقادیر تعریف‌شده در مطلب در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل، دقت قابل قبول شبکه در تشخیص میزان گرفتگی بر اساس شرایط ورودی کوره و دمای لوله را نشان می‌دهد. از آنجا که در این تحقیق، هدف تشخیص گرفتگی در مراحل اولیه بوده، همچنین با ایجاد گرفتگی در تنها یک لوله در بخش تابشی، افت فشار در خروجی لوله ناچیز است، به این ترتیب، دقت عملکرد شناساگر خطا به علت محدوده کوچک تغییرات فشار خروجی از لوله، در مقایسه با حالت قبل کمتر است.

3-2-3- ماشین بردار بهینه‌سازی شده

همانطور که اشاره شد، انتخاب تابع کرنل مناسب و پارامتر آن و همچنین تعیین مقدار پارامتر جریمه منجر به بهبود عملکرد ماشین بردار پشتیبان می‌گردد. بدین منظور برای یافتن به دقت کلاسه‌بندی بهتر، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. در واقع اثبات شده که مقدار احتمال کلاسه‌بندی اشتباه $E\{P(e)\}$ با نسبت تعداد بردارهای پشتیبان (SVs) به تعداد کل بردارهای آموزش (TV) مرتبط است [25].

$$E\{P(e)\} \leq B_{sv} = \frac{SVs}{TV + 1} \quad (13)$$

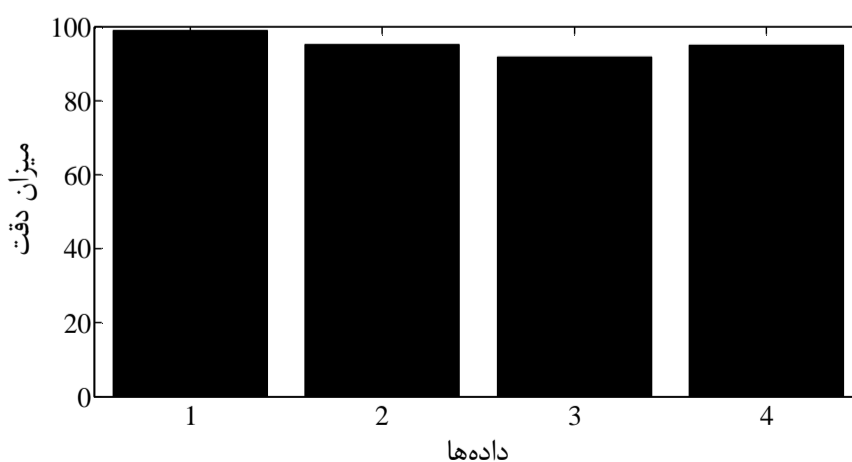
بنابراین انتظار می‌رود که تعداد بردار پشتیبان کمتر به طبقه‌بندی کننده‌ای با بیشترین پراکندگی و کمترین خطای کلاسه‌بندی منجر گردد. از این رو برای بهینه‌سازی ماشین بردار پشتیبان از تابع هدفی بصورت ترکیب وزنی دقت طبقه‌بندی (SV_a) و تعداد بردار پشتیبان (SVs) استفاده شد.

$$fit_{svm} = (\beta \times SV_a) + ((1 - \beta)/SVs) \quad (14)$$

در رابطه (14)، fit_{svm} تابع هدف ماشین بردار پشتیبان و β پارامتر تنظیم‌کننده تابع هدف است که در این تحقیق 0/8 در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی ماشین بردار پشتیبان نمونه 1 برای آموزش، نمونه 2 برای اعتبارسنجی و نمونه‌های 3 و 4 برای تست طبقه‌بندی کننده در نظر گرفته شد. پارامترهای بهینه شناساگر طراحی شده در جدول 3 و دقت عملکرد آن برای 6 کلاس گرفتگی با در نظر گرفتن دمای لوله، همچنین فشار خروجی از لوله به ترتیب در شکل‌های 8 و 9 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با بهینه‌سازی پارامترهای ماشین بردار پشتیبان، دقت طبقه‌بندی کننده به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مطالعه حاضر، گرفتگی بر سطوح داخلی لوله‌ها در بخش تابشی کوره



شکل 8 میزان دقت برای داده‌ها با در نظر گرفتن دمای لوله به عنوان ورودی

دقتی قابل قبول برخوردار است.
 در پایان با بهینه‌سازی پارامترهای ماشین بردار پشتیبان، دقت شناساگر به میزان قابل توجه افزایش یافت.

6- مراجع

- [1] B. Lakghomi, F. Taghipour, D. Posarac, A. Watkinson, CFD simulation and experimental measurement of droplet deposition and hydrocarbon fouling at high temperatures, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 172, No. 1, pp. 507-516, 2011.
- [2] C.-M. Astorga-Zaragoza, V.-M. Alvarado-Martínez, A. Zavala-Río, R.-M. Méndez-Ocaña, G.-V. Guerrero-Ramírez, Observer-based monitoring of heat exchangers, *ISA transactions*, Vol. 47, No. 1, pp. 15-24, 2008.
- [3] X. Wang, D.-Z. Zheng, Difference control of parallel streams temperatures, *Journal of process control*, Vol. 15, No. 5, pp. 531-536, 2005.
- [4] P. Schreier, P. Fryer, Heat exchanger fouling: a model study of the scaleup of laboratory data, *Chemical engineering science*, Vol. 50, No. 8, pp. 1311-1321, 1995.
- [5] J. Booman, M. Gonzalez, J. Otegui, Failures in cabin type hydrocarbon heaters due to inadequate fuel control, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 21, pp. 31-39, 2012.
- [6] H. Ingimundardóttir, S. Lalot, Detection of fouling in a cross-flow heat exchanger using wavelets, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 32, No. 3-4, pp. 349-357, 2011.
- [7] O. Guðmundsson, Detection of fouling in heat exchangers, 2011.
- [8] A. Berton, D. Hodouin, Linear and bilinear fault detection and diagnosis based on mass and energy balance equations, *Control engineering practice*, Vol. 11, No. 1, pp. 103-113, 2003.
- [9] G. Polley, D. Wilson, B. Yeap, S. Pugh, Use of crude oil fouling threshold data in heat exchanger design, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, No. 7, pp. 763-776, 2002.
- [10] M. R. Jafari Nasr, M. Majidi Givi, Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units, *Applied thermal engineering*, Vol. 26, No. 14, pp. 1572-1577, 2006.
- [11] C.-M. Astorga-Zaragoza, A. Zavala-Río, V. Alvarado, R.-M. Méndez, J. Reyes-Reyes, Performance monitoring of heat exchangers via adaptive observers, *Measurement*, Vol. 40, No. 4, pp. 392-405, 2007.
- [12] V. Radhakrishnan, M. Ramasamy, H. Zabiri, V. Do Thanh, N. Tahir, H. Mukhtar, M. Hamdi, N. Ramli, Heat exchanger fouling model and preventive maintenance scheduling tool, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 17, pp. 2791-2802, 2007.
- [13] S. Lingfang, Z. Yingying, Z. Xinpeng, Y. Shanrang, Q. Yukun, Research on the fouling prediction of heat exchanger based on support vector machine, in *Proceeding of, IEEE*, pp. 240-244, 2008.
- [14] J. Aminian, S. Shahhosseini, Evaluation of ANN modeling for prediction of crude oil fouling behavior, *Applied thermal engineering*, Vol. 28, No. 7, pp. 668-674, 2008.
- [15] A. R. Zahiri, Investigating the mechanism of precipitation and deposition inhibitors of heat exchangers with liquid water, *Journal of heat exchanger*, Vol. 5, No. 28, 2010. (In Persian)
- [16] S. Lalot, H. Pálsson, Detection of fouling in a cross-flow heat exchanger using a neural network based technique, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 4, pp. 675-679, 2010.
- [17] S. Delrot, T. M. Guerra, M. Dambrine, F. Delmotte, Fouling detection in a heat exchanger by observer of Takagi-Sugeno type for systems with unknown polynomial inputs, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 25, No. 8, pp. 1558-1566, 2012.
- [18] T. Jafari, Investigation on thermodynamic and hydrodynamic behavior of wax precipitation in pipe lines, *Farayandno Journal*, Vol. 9, No. 48, pp. 5-17, 2014. (In Persian)
- [19] A. Chaibakhsh, N. Ensanefat, A. Jamali, R. Kouhikamali, H. Najafi, Crude oil direct fired furnace model, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 83, pp. 57-70, 2015.
- [20] T. H. Durkin, Boiler system efficiency, *ASHRAE Journal*, Vol. 48, No. 7, pp. 51-58, 2006.
- [21] A. Bakhtiari, B. Maghbuli, H. R. Najafi, *Process fired heaters - basic computations and optimal operation*, Jahan Afrooz, 2012. (In Persian)
- [22] A. Cross, Direct-Fired Heaters: Evaluate Thermal Performance And the Effects of Fouling, *Chemical engineering*, Vol. 116, No. 12, pp. 47-51, 2009.
- [23] K.-Y. Chen, L.-S. Chen, M.-C. Chen, C.-L. Lee, Using SVM based method for equipment fault detection in a thermal power plant, *Computers in Industry*, Vol. 62, No. 1, pp. 42-50, 2011.
- [24] S. Abe, Support Vector Machines for Pattern Classification, *Advances in Pattern Recognition*, 2005.
- [25] V. N. Vapnik, V. Vapnik, *Statistical learning theory*. Wiley New York, 1998.

5- فهرست علائم

نسبت استوکیومتری هوا به سوخت	AF_s
جمله خطا	b
پارامتر جریمه	C
ظرفیت گرمایی ویژه محصولات احتراق (J/KgK)	C_{pp}
تابع تصمیم	$D(X)$
مقدار احتمال کلاسه‌بندی اشتباه	$E\{P(e)\}$
درصد هوای اضافی در احتراق	EA
تابع هدف ماشین بردار پشتیبان	fit_{SVM}
تابع برداری غیرخطی	$g(X)$
ارزش حرارتی بالایی سوخت (J/Kg)	HHV
رسانندگی گرمایی (W/mK)	K
طول (m)	L
تابع	Q
گرمای نهان (J/Kg)	Q_{lat}
مقاومت گرمایی گرفتگی (K/W)	R_f
شعاع (m)	r
شعاع اولیه لوله (m)	r_o
مجموعه شاخص‌های بردار پشتیبان	S
دقت طبقه‌بندی	SV_a
تعداد بردارهای پشتیبان	SV_s
دما (K)	T
تعداد کل بردارهای آموزش	TV
دمای آدیاباتیک شعله (K)	T_c
زمان (s)	t
بردار نرمال	W
ورودی‌های آموزشی	X
پاسخ سیستم	y
علائم یونانی	
ضرایب	α
پارامتر تنظیم‌کننده تابع هدف	β
ضخامت گرفتگی	δ
راندمان	η
ثابت زمانی	τ
زیر نویس‌ها	
گرفتگی	c
خروجی	ext