

## طراحی جاروبک پتانسیومتر موتور XU7 و تشخیص معیوب بودن آن با روش پردازش سیگنال

مهدی کریمی\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

حامد شرکائی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

علیرضا شوشتری

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

### چکیده

هدف این مقاله تعیین جنس و ضخامت جاروبک پتانسیومتر موتور XU7 و حل مشکل عدم کارکرد مناسب آن است. مقدار نیروی تماسی پتانسیومتر یک پارامتر مهم در طراحی پتانسیومترها است. از اینرو ابتدا تحلیل استاتیکی با استفاده از جنس‌های مختلف انجام می‌شود تا جنس و ضخامت مناسب جاروبک به گونه‌ای تعیین شود که بتواند نیروی مورد نظر را تامین کند. سپس برای تایید نتایج، از یک روش آزمایشگاهی استفاده می‌شود. با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، نحوه عملکرد پتانسیومتر در حالت دینامیکی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین صورت که سیگنال خروجی تعدادی از قطعات پتانسیومتر سالم و معیوب با جنس‌های مختلف و تحت شرایط کار و تعداد سیکل‌های مختلف ثبت می‌شود. یک بردار ویژگی برای هر سیگنال گرفته شده از آزمایش، تعریف می‌شود. این بردار ویژگی دارای چهار درایه می‌باشد، که اولین درایه با استفاده از آنالیز اجزای اصلی به دست می‌آید، درایه‌های بعدی کورتوسیس، اسکینوس و میانگین هستند. درصدی از این بردارهای ویژگی به همراه کلاس مربوطه برای آموزش توسط بردار پشتیبان استفاده می‌شوند و یک دسته بندی کننده برای تشخیص قطعات سالم و معیوب ایجاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: موتور XU7، پتانسیومتر، تحلیل اجزای اصلی، بردار ویژگی، ماشین بردار پشتیبان.

## Design of Potentiometer Brush of XU7 Engine and Detecting the Faulty Ones by Signal Processing

M. Karimi

Department of Mechanical Engineering, Buali Sina University, Hamedan, Iran

H. Shorakaei

Department of Mechanical Engineering, Buali Sina University, Hamedan, Iran

A. Shooshtari

Department of Mechanical Engineering, Buali Sina University, Hamedan, Iran

### Abstract

Propose of this paper are the determination of material and thickness of brush of potentiometer of XU7 engine and solving the defect of poor functioning. The contact force value of potentiometer is an important design parameter. Hence, the static analysis is performed at first for determination of the material and the thickness of the brush providing the desired force. Then an experimental method is used for verifying the results. Potentiometer functioning is investigated at dynamic mode using signal processing methods. Therefore, the output signal of some of the normal and defective potentiometers with different materials and under different working condition and cycles are recorded. A feature vector is defined for each signal. This feature vector has four elements that the first element is achieved using principle component analysis. The other elements are kurtosis, skewness and mean of the signal. Using these feature vectors and their classes, a classifier is developed for recognition of normal and defective components.

**Keywords:** XU7 Engine, Potentiometer, Principal component analysis, Feature vector, Support vector machine.

XU7 باعث عدم سوخت رسانی صحیح به خودرو شده است.

اجزای اصلی و حساس پتانسیومترهای تماسی، جاروبک و المان مقاومتی می‌باشند. المان مقاومتی باید پایداری کافی در مقابل تغییرات آبی و طولانی محیطی، مانند دما و رطوبت را داشته باشد و باید حداقل سایش را نسبت به حرکت جاروبک داشته باشد. جاروبک نیز باید پایداری شیمیایی لازم در برابر رطوبت و گازهای خورنده مانند NOx و SO2 را داشته باشد، مقدار سطح تماس هنگام لغزش ثابت بماند و همچنین دچار خستگی و خزش که باعث کاهش نیروی تماسی و افزایش مقاومت تماسی می‌شوند، نشود. شاید مهمترین مسائل در طراحی جاروبک انتخاب مواد و هندسه آن باشد. به منظور بهینه سازی و ارتقاء کیفیت جاروبک پتانسیومتر فعالیت‌های مختلفی انجام گرفته است. از جمله دسته بندی‌هایی که می‌توان برای این فعالیت‌ها نام برد،

### ۱- مقدمه

افزایش کارایی کنترلرهای الکترونیکی و کاربرد روز افزون آنها در صنایع مختلف لزوم بررسی آنها را بیش از پیش روشن می‌کند. از این میان طراحی سنسورهایی که در شرایط سخت محیطی و عملکردی استفاده می‌شوند نیازمند تحقیق و بررسی بیشتر می‌باشند. پتانسیومتر های تعیین موقعیت مورد استفاده در صنعت خودرو به واسطه شرایط محیطی کارکرد مانند لرزش‌های موتور و دمای موتور و همچنین شرایط عملکرد طولانی مدت از این دسته هستند. انواع پتانسیومترها دارای اجزایی هستند که با یکدیگر در تماسند. این قسمت‌های تماسی مشکلاتی را برای عدم کارکرد صحیح پتانسیومتر ایجاد می‌کنند. همین مسئله در پروژه ساخت پتانسیومتر برای قسمت سوخت رسانی موتور

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m\_karimi@basu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۲۹

شرح داده شده باشند [۶]. [۷] روشی را برای استخراج ویژگی در مسائل دسته بندی نامتوازن شرح داده است.

## ۲- تحلیل استاتیکی قطعه جاروبک پتانسیومتر

شکل (۱) طرحواره اجزاء مجموعه پتانسیومتر موتور XU7 که در موتورهای خانواده پژو استفاده می‌شود را نشان می‌دهد. اگر تماس بین جاروبک با فیلم نامنظم و ضعیف باشد، ولتاژ مناسب به ECU ارسال نخواهد شد و در نتیجه سیگنال‌ها بصورت یکنواخت در خروجی ظاهر نخواهد شد. یک اغتشاش یا نویز در این ولتاژ سبب ایجاد اشکالات اساسی در فرآیند احتراق موتور و میزان پاشش سوخت شده و باعث سخته و یا به اصطلاح عامیانه ریپ زدن در موتور ایزکتوری می‌گردد. در این بخش جاروبک پتانسیومتر به گونه‌ای طراحی می‌شود که تماس بین جاروبک و فیلم مناسب باشد، به گونه‌ای که سطح فیلم خراش پیدا نکند و همینطور تماس ضعیف باعث عدم ارسال سیگنال مناسب نشود.

### ۱-۲- مدل‌سازی

قطعه جاروبک در مجموعه سنسور موقعیت دریچه گاز بسیار کوچک بوده و بصورت یک تیر بسیار کوچک (Micro Beam) یکسر درگیر می‌باشد که ابعاد آن در حد میلی‌متر و ضخامت آن نیز بین ۶۰ الی ۷۰ میکرون می‌باشد. همچنین چون این قطعه یک مبدل موقعیت به ولتاژ است، به عنوان یک سیستم بسیار کوچک الکترو مکانیکی (MEMS) شناخته می‌شود [۸]. شکل ۲ تصویر ایزومتریک از مدل ساخته شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، قطعه فوق دارای ۶ عدد شاخک در سر قطعه می‌باشد که از نقاط مختلف مدارهای الکتریکی موجود روی فیلم، اطلاعات را جمع آوری می‌نماید تا دقت اندازه گیری ولتاژ خروجی به حداکثر مقدار برسد.



شکل ۱- طرحواره اجزا تشکیل دهنده پتانسیومتر موتور XU7.

بررسی نوع جنس، جلوگیری از سایش المان مقاومتی و انتخاب روانکار مناسب هستند. انتخاب مواد مناسب و بررسی عملکرد پتانسیومتر با انواع مواد سبب جلوگیری از بروز مشکلات مذکور می‌شود. به طور کلی برای بررسی عملکرد و تشخیص عیب قطعات مکانیکی روش‌های مختلفی وجود دارد از جمله می‌توان به تحلیل استاتیکی، دینامیکی، تحلیل مودال، ایجاد بردار ویژگی و آموزش بردار و استفاده از طبقه بندی کننده‌های مختلف اشاره کرد. [۱] روش‌های تشخیص عیب را که بر اساس اطلاعات ثبت شده قبلی فرآیند جمع آوری شده‌اند بحث می‌کند و روش‌های مختلف را مقایسه و ارزیابی می‌کند. [۲] عملکرد یک سیستم تشخیص زیستی مرکب سبک<sup>۱</sup> (VOC) بر اساس یک حسگر موج صوتی سطحی<sup>۲</sup> (SAW) با چهار المان حسی را گزارش داده است. با استفاده از تغییر فرکانس نسبی به صورت سیگنال خروجی حسگرها با یک شبکه عصبی، می‌توان یک سیستم تشخیص برای VOCها ایجاد کرد. برای استخراج ویژگی از سیگنال‌های خروجی حسگرهای SAW از مولفه دوتایی مخلوطی از پروپانول و متانول و همچنین روش تشخیص الگویی مثل تحلیل اجزای اصلی<sup>۳</sup> (PCA) استفاده کرده است. از شبکه عصبی چند لایه بازخورد با یک لایه مخفی که به وسیله یک الگوریتم پس انتشار<sup>۴</sup> آموزش دیده است برای دسته بندی و تشخیص الگوهای VOC استفاده می‌کند. [۳] از یک روش کاربردی MSPC که کارهای اخیر در این حوزه، شامل PCA چند راهه، PCA بازگشتی، آشکارسازی خطا با استفاده از یک مشخصه مرکب و سهم خطای<sup>۵</sup> گرفته شده از آمار هاتلینگ<sup>۶</sup> را با هم ترکیب می‌کند استفاده کرده است. در [۴] پردازش سیگنال چند بعدی و چارچوب تحلیلی برای EEG پیشنهاد شده است. در این چارچوب، سیگنال‌ها در زیر باندهای فرکانسی، با استفاده از DWT و مجموعه‌ای از ویژگی‌های آماری، تجزیه می‌شوند. PCA، تحلیل اجزای مستقل (ICA)، و تحلیل جدا کننده خطی (LDA) برای کاهش ابعاد داده‌ها استفاده شده است. سپس این ویژگی‌ها به عنوان یک ورودی بردار پشتیبان<sup>۷</sup> (SVM) با دو خروجی استفاده می‌شوند. در [۵] یک روش پایش دسته‌ای با استفاده از PCA کرنل چند مسیره<sup>۸</sup> برای تشخیص عیب پیشنهاد شده است. [۶] یک روش آشکارسازی و تشخیص عیب برای سیستم‌هایی که در فرآیندهای چندگانه کار می‌کنند را پیشنهاد می‌کند. در این روش از PCA برای اکتساب ویژگی‌های عمده داده‌های اندازه گیری شده استفاده می‌شود و سپس با میانگین‌های K برای دسته کردن فرآیندهای مختلف برای آشکارسازی موارد غیر عادی ترکیب می‌شود. وقتی که عیب آشکار شد، یک شبکه عصبی پس انتشار برای تشخیص و عایق کردن عیوب ساخته می‌شود. آشکارسازی نو یک تکنیک تشخیص الگو است و زمانی استفاده می‌شود که یک حالت مشخصه عادی و حالت‌های غیر عادی

<sup>1</sup> volatile organic compounds

<sup>2</sup> surface acoustic wave

<sup>3</sup> principal component analysis

<sup>4</sup> back-propagation

<sup>5</sup> Fault contribution

<sup>6</sup> Hotelling

<sup>7</sup> Support vector machine

<sup>8</sup> Multiway kernel PCA

مقدار این تغییر مکان اولیه با توجه به تفرانس ساخت و مونتاژ برای موتور XU7 می‌تواند بین ۲/۱۷ تا ۳/۱۵ میلیمتر تغییر کند. شکل ۳ نقاط بحرانی را نشان می‌دهد. شکل ۴ نمونه‌ای از توزیع تنش‌های بدست آمده از تحلیل و نقاطی که در آن تنش بیشینه بدست آمده است را نشان می‌دهد. با توجه به مدارک فنی بدست آمده مقدار نیروی تماسی مناسب برای اینگونه پتانسیومترها در حدود ۲۴ گرم یا ۰/۲۳۵ نیوتن می‌باشد. زیرا اگر مقدار این نیرو خیلی از این مقدار کمتر باشد، تماس بین جاروبک و فیلم برقرار نخواهد شد و اگر مقدار خیلی بزرگتر باشد سبب آسیب دیدگی و خراشیده شدن سطح فیلم خواهد شد. از طرف دیگر قابل قبول بودن از نظر اطمینان بستگی به مقدار فاکتور خدمات<sup>۲</sup> دارد که از روابط زیر بدست می‌آید.

$$n = \frac{\sigma_{\max}}{S_y}, S.F = \frac{1}{n} \quad (1)$$

که  $\sigma_{\max}$  حداکثر تنش ایجاد شده در قطعه و  $S_y$  تنش تسلیم می‌باشند. با توجه به مدارک فنی ارائه شده توسط سازندگان معتبر پتانسیومتر در صورتیکه مقدار این فاکتور مساوی یا بزرگتر از ۱/۲ باشد، در انصورت جاروبک در برابر عواملی چون آزادی تنش<sup>۳</sup> و خزش<sup>۴</sup> که امکان دارد در دماهای عملکردی جاروبک اتفاق بیافتد مقاومت نماید. در این حال مقادیر نیروی تماسی تقریباً ثابت خواهد بود و با کارکرد مجموعه کاهش نخواهد یافت.

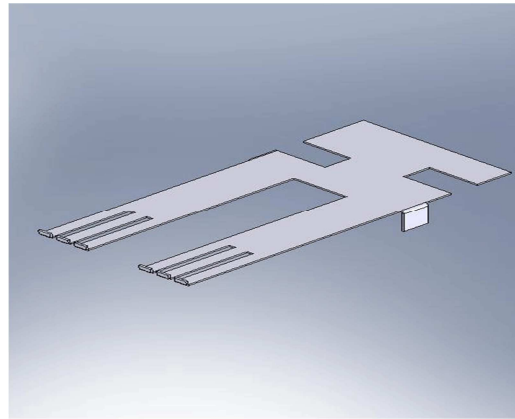
با توجه به تحلیلهای انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که جنس C72900 با ضخامت ۰/۶۶ میلیمتر و تغییر مکان اولیه ۲/۱۷ میلیمتر از نظر استاتیکی می‌تواند قابلیت و ضریب اطمینان لازم را احراز نماید و از این نظر مناسب می‌باشد. جدول ۱ خلاصه نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی را در حالات مختلف جاروبک نشان داده است. مشاهده می‌گردد که جاروبک از نوع نقره مس (C72900) با ضخامت ۰/۶۶ میلیمتر، دارای نیروی تماسی بزرگتر از ۲۴ گرم و فاکتور خدمات بزرگتر از ۱/۲ است.

### ۳-۲-۳- تحلیل تجربی

در این قسمت به منظور صحت گذاری نتایج بدست آمده از تحلیل نرم افزاری در بخش قبل به بررسی آزمایشگاهی مقدار نیروهای تماسی انتهایی جاروبک بر اثر تغییر شکلهای مورد نظر پرداخته می‌شود.

#### ۳-۲-۱-۳- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش شامل یک عدد کولیس پایه دار دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلیمتر، یک عدد ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم، یک عدد بلوک صلب<sup>۵</sup> و یک تیوپ چسب قطره‌ای می‌باشد. دستگاه آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. روش کلی آزمایش به این صورت است که با پایین آوردن زبانه کولیس، مقدار تغییر مکان مورد نظر را وارد نموده و مقدار نیروی تماسی وارد شده از روی ترازوی دیجیتال



شکل ۲- مدل گرافیکی جاروبک پتانسیومتر.

### ۳-۲-۲- تحلیل اجزا محدود

در این قسمت به تحلیل استاتیکی قطعه جاروبک پتانسیومتر پرداخته می‌شود. به همین منظور با توجه به اطلاعات بدست آمده از شرکت‌های سازنده خارجی [۹]، استانداردهای معتبر ارائه شده استخراج گردیده، و تحلیل استاتیکی قطعه برای دو ضخامت مناسب و مواد مورد نظر انجام گردیده و تنش‌های ایجاد شده بر اثر بارگذاری بر روی این قطعه، تحلیل شده و با تنش حداکثر مجاز مقایسه گردیده است. همچنین با توجه به تنش‌های بدست آمده مقدار نیروی ایجاد شده در سر شاخک‌ها (نیروی تماسی) محاسبه گردیده است و بر اساس آن بهترین حالت از نظر نوع ماده، ضخامت و تغییر مکان اولیه تعیین گردیده است.

عوامل موثر بر تحلیل استاتیکی عبارتند از:

- ۱- مقدار نیروی مورد نیاز جهت برقراری تماس مناسب بین جاروبک و فیلم بر اساس استانداردها حدود ۲۴ گرم مناسب است.
  - ۲- انتخاب ماده‌ای که بتواند در شرایط مورد نظر با یکی از ضخامتهای مورد نظر (۰/۰۷ یا ۰/۰۶ میلیمتر) ضریب اطمینان قابل قبولی ارائه کند.
  - ۳- انتخاب ماده‌ای که با توجه به خمکاری ازدیاد طول نسبی<sup>۱</sup> لازم را داشته باشد.
- در نهایت با توجه به خواص مناسب الکتریکی مواد این نوع جاروبک‌ها، شرایط اقتصادی، قیمت و استانداردهای عملکردی مناسب برای این قطعه، آلیاژهای زیر انتخاب گردیدند و برای تحلیل استاتیکی خواص مکانیکی آنها استفاده شد [۱۰].

(الف) فسفر برنز با کد (ASTM C51900 (Phosphor Bronze 6% Sn 94 Cu 6 Sn)

(ب) مس نقره با کد (ASTM C72900 (77 Cu 15 Ni 8 Sn)

(ج) نیکل نقره با کد (ASTM C75200 (65Cu 17Zn 18Ni)

با توجه به شرایط عملکرد قطعه جاروبک در مجموعه پتانسیومتر، بارگذاری این قطعه بصورت یک تغییر مکان اولیه در انتهای آن (انتهای شاخک‌ها و محل درگیری با فیلم الکتریکی) در نظر گرفته می‌شود.

<sup>1</sup> Elongation

<sup>2</sup> Service Factor

<sup>3</sup> Relaxation

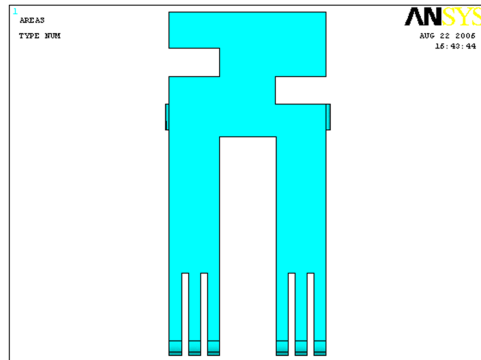
<sup>4</sup> Creep

<sup>5</sup> Gage Block



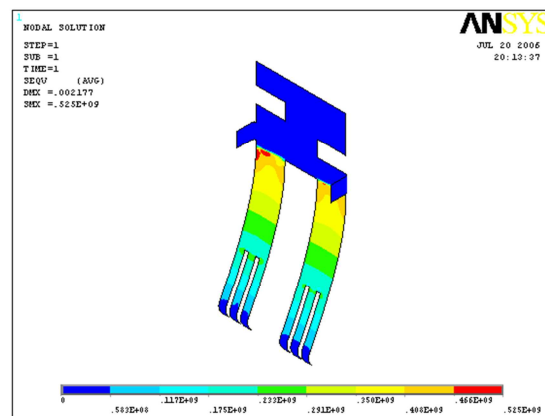
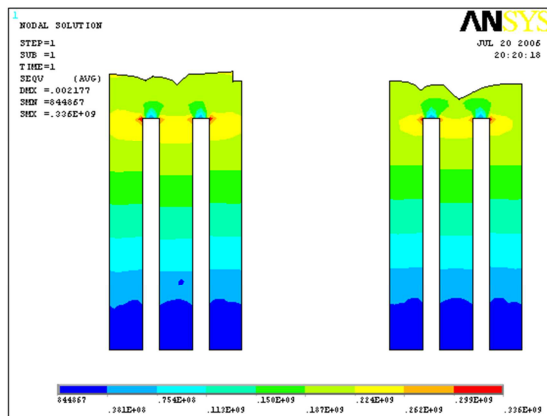
شکل ۵- دستگاه آزمایش تحلیل استاتیکی.

خوانده می‌شود. بدین ترتیب در نهایت می‌توان مقادیر نیروی تماسی ناشی از تغییر مکان مورد نظر را بدست آورد و با مقادیر بدست آمده از



شکل ۳- نواحی بحرانی که دارای حداکثر تنش می باشند.

تحلیل نرم افزاری مقایسه نمود.

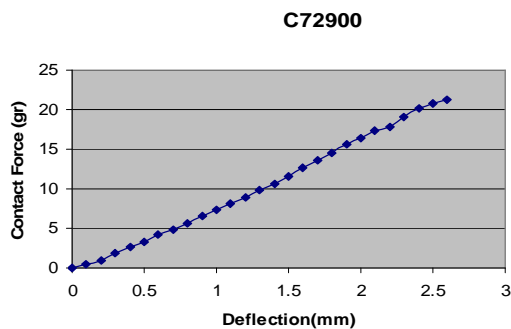


شکل ۴- نتایج تحلیل تنش برای ماده فسفر برنز (C51900) با ضخامت ۰/۶ میلیمتر و تغییر مکان اولیه ۲/۱۷ میلیمتر.

جدول ۱- خلاصه نتایج تحلیل برای حالات مختلف جاروبک در نقاط بحرانی

ردیف	نوع ماده	ضخامت (mm)	تغییر مکان اولیه (mm)	مقدار SF در A	مقدار SF در B	مقدار نیروی تماس (gr)	قابل قبول از نظر اطمینان	قابل قبول از نظر نیرو
۱	C51900	۰/۶	۲/۱۷	۱/۷	۱/۰۹	۱۴/۶۹	خیر	خیر
۲	C72900	۰/۶	۲/۱۷	۲/۴	۱/۶	۱۴/۷۴	بلی	خیر
۳	C72500	۰/۶	۲/۱۷	۱/۷۴	۱/۱۲	۱۶/۴	بلی	خیر
۴	C51900	۰/۶۶	۲/۱۷	۱/۶	۱/۱۲	۲۳/۱	خیر	خیر
۵	C72900	۰/۶۶	۲/۱۷	۱/۳۵	۲/۱۵	۲۶/۴	بلی	بلی
۶	C72500	۰/۶۶	۲/۱۷	۱/۵	۰/۹۴	۲۵/۸	خیر	بلی
۷	C51900	۰/۶	۳/۱۵	۱/۱۷	۰/۷۵	۲۱/۳	خیر	خیر
۸	C72900	۰/۶	۳/۱۵	۱/۷۲	۱/۱	۲۴/۴	خیر	بلی
۹	C72500	۰/۶	۳/۱۵	۱/۲	۰/۷۷	۲۳/۴	خیر	بلی
۱۰	C51900	۰/۶	۳/۱۵	۱	۰/۶۳	۳۳/۵	خیر	خیر
۱۱	C72900	۰/۶۶	۳/۱۵	۱/۴۸	۰/۹۳	۳۸/۳	خیر	خیر
۱۲	C72500	۰/۶۶	۳/۱۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۳۷	خیر	خیر

روش آنالیز اجزای اصلی طی پنج مرحله اصلی زیر، بر یک مجموعه‌ی داده اعمال می‌شود.



شکل ۶- تغییرات نیرو بر حسب تغییر مکان برای جاروبک مس نقره.

مرحله ۱: جمع آوری داده‌ها: در این مرحله، داده‌های مورد نظر به صورت مناسب جمع آوری و ذخیره می‌گردند. در این مقاله، این مرحله همان جمع آوری سیگنال‌های نمونه‌برداری شده از پتانسیومترها است. با توجه به تحلیل‌های آزمایشگاهی و نرم افزاری انجام شده، برای سه قطعه جاروبک با جنس‌های فسفر برنز (C51900)، نیکل نقره (C75200) و مس نیکل (C72900)، جنس C72900 با ضخامت ۰/۶۶ میلی‌متر و تغییر مکان اولیه ۲/۱۷ میلی‌متر داده‌های مورد نظر از پتانسیومتر جمع آوری گردید.

مرحله ۲: صفر کردن میانگین داده‌ها. برای آنکه تحلیل اجزای اصلی بطور صحیح کار کند، لازم است میانگین داده‌ها در هر بعد از داده‌ها کم شود. در نتیجه میانگین داده‌ها در هر بعد صفر خواهد شد.

مرحله ۳: محاسبه ماتریس هم‌وردایی داده‌ها. در این مرحله هم‌وردایی بین تمامی ابعاد داده‌ها با توجه به رابطه (۲) محاسبه شده و در ماتریسی مانند (۳) قرار داده می‌شود.

مرحله ۴: محاسبه بردارهای مشخصه و مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس. از آنجا که ماتریس هم‌وردایی یک ماتریس مربعی است می‌توان مقادیر ویژه و بردارهای مشخصه را برای آن ماتریس حساب کرد. مقادیر ویژه و بردارهای مشخصه اطلاعات مفیدی درباره داده‌ها می‌دهند.

مرحله ۵: کاهش ابعاد. در این مرحله، ابعاد داده‌ها کاهش می‌یابد. قابل اثبات است که بردار مشخصه‌ای با بیشترین مقدار ویژه، جزء اساسی مجموعه داده‌ها است. در مرحله قبل، بردارهای مشخصه‌ی ماتریس هم‌وردایی محاسبه شدند. در این مرحله، بردارهای مشخصه به ترتیب از بردار مشخصه نظیر بزرگترین مقدار ویژه به کوچکترین مرتب می‌شوند. در این صورت، می‌توان تصمیم گرفت که از اجزای کم اهمیت تر صرف‌نظر شود. در این صورت هر چند مقداری از اطلاعات از دست داده می‌شوند، اما اگر مقدار ویژه حذف شده کوچک باشد، اطلاعات زیادی از دست نرفته است. سرانجام یک مجموعه با بعد به مراتب کمتر از داده‌های اصلی به دست خواهد آمد. اگر داده‌های اصلی  $n$  بعدی باشند،  $n$  بردار مشخصه و  $n$  مقدار ویژه وجود دارد. حال اگر  $p$  بردار مشخصه اول انتخاب شوند، مجموعه داده‌های نهایی فقط  $p$  بعد دارد.

## ۲-۲-۳ نتایج به دست آمده از آزمایش

با توجه به تحلیل‌های انجام شده قسمت قبل، برای سه قطعه جاروبک با جنس‌های فسفر برنز (C51900)، مس نیکل (C72500) و مس نقره (C72900) آزمایش‌های مربوطه انجام گرفت و مقادیر نیروی تماسی برای تغییر مکان‌های مختلف برای مواد فوق بدست آمد. برای جاروبک از نوع نقره مس (C72900) با ضخامت ۰/۶۶ میلی‌متر آزمایش انجام گردید که نمودار تغییر مکان جابجایی آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

مشاهده می‌گردد که ماده دارای رفتار خطی است و مقدار بدست آمده از تحلیل نرم افزاری با مقادیر تجربی بدست آمده مطابقت مناسبی دارد که بیانگر صحت تحلیل و درستی روش آزمایش است. با توجه به موارد گفته شده و مطابقت نتایج آزمایش با تحلیل نرم افزاری می‌توان گفت که نتایج بدست آمده از تحلیل نرم افزاری قابل اعتماد است. یعنی جنس C72900 با ضخامت ۰/۶۶ میلی‌متر و تغییر مکان اولیه ۲/۱۷ میلی‌متر از نظر استاتیکی می‌تواند قابلیت و ضریب اطمینان لازم را احراز نماید و مناسبترین خصوصیات برای جاروبک پتانسیومتر می‌باشد.

## ۳- پردازش سیگنال برای تشخیص قطعات معیوب

دقت طراحی استاتیکی بالای جاروبک نیز نمی‌تواند مانع از عدم کارکرد مناسب پتانسیومتر شود، چرا که این قطعه تحت شرایط دینامیکی و محیط کاری با انواع تنش‌های مکانیکی کار می‌کند. از اینرو بهتر است که قبل از سوار کردن پتانسیومتر روی موتور، این قطعه را تحت شرایط آزمایشگاهی بررسی کرد. بنابراین به جای بررسی تنش‌های ایجاد شده در قطعه از یک روش آزمایشگاهی ترکیب شده با روش‌های محاسباتی که منجر به یک دسته بندی کننده قطعات معیوب و سالم می‌شود، استفاده شده است. برای تشخیص قطعات معیوب، پتانسیومتر تحت شرایط کار در آزمایشگاه قرار داده می‌شود و با معرفی یک بردار ویژگی مبتنی بر تحلیل اجزای اصلی و با استفاده از یک دسته بندی کننده قطعات معیوب کشف می‌شوند. از این رو در ابتدا تحلیل اجزای اصلی و نحوه استفاده از آن در این کار و چگونگی نمونه برداری توضیح داده خواهد شد و سپس بردار ویژگی و درایه‌های مختلف دیگر آن معرفی می‌شوند.

### تحلیل اجزای اصلی

تحلیل اجزای اصلی یکی از روش‌های تشخیص و شناسایی در یک مجموعه اطلاعات است. در این روش اطلاعات را بر اساس شباهت‌ها و تفاوت‌هایشان بیان می‌کنند. از آنجا که در اطلاعات از نوع چند بعدی، پیدا کردن نقشه و طرح خاصی بسیار سخت می‌باشد، در حقیقت تحلیل اجزای اصلی ارتباط بین داده‌ها را کشف می‌کند و در جایی که نعمت نمایش گرافیکی در دسترس نیست، تحلیل اجزای اصلی یک ابزار نیرومند برای تحلیل اطلاعات می‌باشد. یکی دیگر از مزایای تحلیل اجزای اصلی این است که پس از بدست آمدن الگوی داده‌ها، چنانچه این اطلاعات فشرده شود مقدار زیادی از اطلاعات از بین نخواهد رفت. هدف اصلی در استفاده از تحلیل اجزای اصلی خلاصه کردن داده‌ها است و چندان به عنوان یک دسته کننده اطلاعات مورد توجه نیست.

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1} \quad (2)$$

$$C = \begin{bmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \\ \text{cov}(y, x) & \text{cov}(y, y) & \text{cov}(y, z) \\ \text{cov}(z, x) & \text{cov}(z, y) & \text{cov}(z, z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

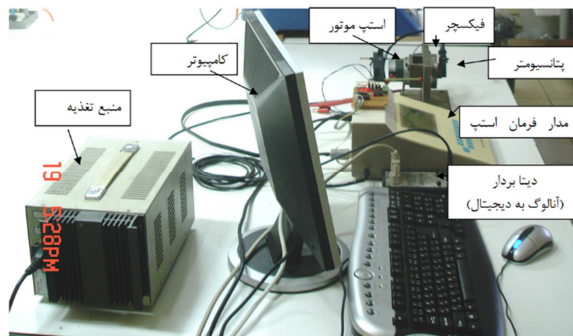
### ۳-۱- نمونه برداری از سیگنال ولتاژ پتانسیومتر دریچه هوا

در این بخش نحوه نمونه برداری از سیگنال ولتاژ پتانسیومتر دریچه هوا موتور XU7 تشریح می‌گردد. پارامتر مورد نظر برای نمونه برداری، سیگنال ولتاژ خروجی ترمینال پتانسیومتر می‌باشد. بدین منظور، جاروبک پتانسیومتر توسط یک استپ موتور فرعی در آزمایشگاه به حرکت در آمده تا شرایط واقعی حرکت خودرو در جاده شبیه سازی شود و ولتاژ دو سر آن اندازه گیری می‌شود. سیگنال ولتاژ اندازه گیری شده با استفاده از یک کارت A/D (مبدل آنالوگ به دیجیتال<sup>1</sup>) نمونه برداری می‌گردد. نمونه‌های جمع‌آوری شده به وسیله پورت موازی به یک کامپیوتر ارسال می‌گردد. این داده‌ها در یک فایل ذخیره شده و در مرحله بعد پروژه به منظور تشخیص پتانسیومتر معیوب مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. در ادامه، نحوه اتصال پتانسیومتر به دستگاه‌های اندازه‌گیری به منظور نمونه برداری سیگنال ولتاژ بیان می‌گردد.

پتانسیومتر دارای سه ترمینال می‌باشد. به دو ترمینال آن ولتاژ ثابت ۰/۵ ولت اعمال گردیده و ترمینال دیگر آن توسط یک کابل هم محور به کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال وصل می‌شود. به منظور حرکت جاروبک پتانسیومتر، از یک استپ موتور استفاده می‌شود. با حرکت جاروبک، سیگنال ولتاژ بین ۰ تا ۰/۵ ولت تغییر خواهد کرد. شکل ۷ یک نمای کلی از تجهیزات جانبی را نشان می‌دهد. اتصال کابل هم محور از کارت A/D خارج شده و به ترمینال دیگر پتانسیومتر وصل می‌گردد.

برای خواندن ولتاژ از تمامی سطح فیلم نیاز به چرخاندن پتانسیومتر است. همچنین نیاز است که این چرخش به صورت یکنواخت و معین صورت گیرد تا اطلاعات به دست آمده قابل پردازش باشند. بهترین گزینه برای رسیدن به چنین منظوری استفاده از استپ موتور می‌باشد. به منظور چرخش صحیح قطعه توسط استپ موتور نیاز به فیکسچر نگهدارنده موتور و قطعه می‌باشد تا هم شرایط نصب قطعه در واقعیت را شبیه سازی کرده و هم موجب چرخش درست جاروبک پتانسیومتر شود. به این منظور نیاز به دستگاه فرمانی به استپ موتور می‌باشد که قطعه را تحت زاویه و سرعت دلخواه بچرخاند. در کارکرد واقعی مقدار مشخصی ولتاژ به دو سر ترمینال‌ها وارد شده و با توجه به چرخش صورت گرفته مقدار ولتاژ ایجاد شده از سر دیگر خوانده می‌شود در نتیجه اولاً به یک منبع تغذیه و ثانیاً به وسیله‌ای برای خواندن ولتاژ نیاز است. به منظور پردازش مقدار ولتاژهای خوانده شده این اطلاعات باید به صورت دیجیتال باشد. از اینرو از یک مبدل آنالوگ به

دیجیتال استفاده می‌شود. البته این مبدل باید در صورت نیاز قادر به برداشت اطلاعات با سرعت‌های بالا نیز باشد. استپ موتور دارای یک مدار فرمان می‌باشد که شامل یک منبع تغذیه، مدار الکترونیکی، به همراه یک میکروکنترلر است. به وسیله نرم‌افزار میکرو، امکان چرخش استپ موتور در سرعت‌های متفاوت بوجود می‌آید. از این طریق می‌توان سیگنال‌های ولتاژ متفاوت مورد نظر شبیه سازی را نمونه برداری کرد. شکل ۷ تجهیزات تست عملکرد و دوام پتانسیومتر شامل فیکسچر، استپ موتور، کامپیوتر، منبع تغذیه، پتانسیومتر، مدار فرمان استپ موتور و دیتا بردار آنالوگ به دیجیتال را نشان می‌دهد.



شکل ۷- تجهیزات تست عملکرد و دوام پتانسیومتر.

### ۳-۲- تهیه پایگاه داده از نمونه‌های جمع‌آوری شده

ابتدا با توجه به تطبیق شرایط عملی با شرایط شبیه سازی شده در آزمایشگاه، از سیگنال ولتاژ پتانسیومتر باید نمونه برداری انجام شود و در نهایت اطلاعات به وسیله مبدل آنالوگ به دیجیتال به کامپیوتر منتقل شود. نکته‌ای که در اینجا باید در نظر گرفت، این است که وجود سایش تأثیر زیادی بر روی عملکرد پتانسیومتر دارد. پتانسیومترهای تماسی به علت ارتباط مکانیکی اجزا در کارکردهای طولانی امکان کاهش کیفیت اولیه را دارند. یکی از مشخصه‌های شناسایی و کنترل این موضوع خطای خطی بودن می‌باشد. خطای خطی بودن به عنوان انحراف ولتاژ خروجی نسبت به منحنی تئوری می‌باشد. به منظور تست دوام فرمان، استپ موتور طوری تنظیم می‌شود که به تعداد سیکل مشخص طول فیلم را طی کرده و به ابتدا باز گردد. پس از گذشت تعداد مشخصی سیکل که برای کارکرد هر پتانسیومتر متفاوت است (برای مثال یک میلیون سیکل) مقدار خطی بودن آن نشان دهنده درصد معیوب شدن قطعه می‌باشد. خطی بودن یعنی باید یک رابطه خطی بین حرکت پدال گاز و ولتاژ خروجی از پتانسیومتر در تمام مسیر حرکت جاروبک بر روی نوار فیلم برقرار باشد. یک سیگنال مرجع که حاصل میانگین‌گیری از ده نمونه‌ی سالم می‌باشد مطابق شکل ۸ تهیه گردیده است.

<sup>1</sup> Analog-to-Digital Converter - ADC

بردار ویژگی حاصل از هر سیگنال شامل چهار عضو به صورت (۴) می- باشد.

$$FV = [EV \ k \ s \ m] \quad (۴)$$

که  $FV$  بردار ویژگی،  $EV$  عنصر دوم مقدار ویژه حاصل از تحلیل اجزای اصلی است،  $k$  کورتوسیس سیگنال است و مطابق با (۵) به دست می-آید،  $s$  اسکینوس سیگنال را نشان می-دهد و به وسیله رابطه (۶) به دست می-آید.  $m$  میانگین اختلاف با سیگنال مرجع و مطابق با (۷) می-باشد.

$$k = \frac{E[x - \bar{x}]^4}{\sigma^4} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^2} \quad (۵)$$

$$s = \frac{E[x - \bar{x}]^3}{\sigma^3} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^{3/2}} \quad (۶)$$

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i), y = x - x_{ref} \quad (۷)$$

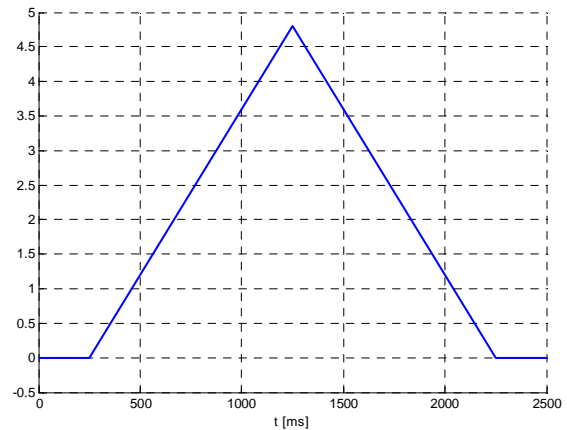
که در روابط فوق  $\bar{x}$  میانگین داده‌های سیگنال،  $n$  تعداد نمونه-های سیگنال و  $x_i$  داده  $i$ ام سیگنال است.

#### ۴- شناسایی قطعه معیوب توسط بردار پشتیبان

پس از ایجاد بردار ویژگی، با توجه به سیگنال‌های نمونه برداری برای قطعات، نوبت به آموزش داده‌ها می‌رسد. از ۷۰ درصد ویژگی‌های موجود برای آموزش بردار پشتیبان و از ۳۰ درصد برای تست نتیجه حاصل از بردار پشتیبان استفاده می‌شود. ورودی بردار پشتیبان ۳ (SVM)، بردارهای ویژگی به دست آمده در مراحل قبل به همراه کلاس هر بردار است. در اینجا تعداد کلاس‌ها دو تا است. یک کلاس مربوط به قطعات معیوب با برچسب "notok" و دیگری برای قطعات سالم هستند که با "ok" نشان داده شده است. SVM سعی می‌کند که یک منحنی را ایجاد کند که فاصله بین دو کلاس را حداقل کند. اگر بردارهای ویژگی با  $x$  و کلاس آنها با  $y$  نشان داده شود و بردار  $y$  به صورت  $\{-1, 1\}$  نشان داده شود که ۱ برای قطعات سالم و -۱ برای قطعات معیوب به کار برود، آنگاه منحنی دسته بندی کننده طبق رابطه زیر به دست می-آید.

$$f(x) = \sum_{i=1}^m y_i a_i k(x, x_i) + b \quad (۱)$$

که در رابطه فوق،  $k(x_i, x)$  تابع کرنل است،  $f(x)$  برچسب بردار قطعه مجهول از نظر سالم یا معیوب بودن را می‌دهد،  $b$  و  $a_i$  پارامترهای آموزش SVM هستند که در [۱۱] به تفصیل شرح داده شده است. قابل ذکر است که در این کار از نرم افزار MATLAB برای پیاده سازی بردار پشتیبان استفاده شده است. در این کار دوازده سیگنال مختلف ثبت شده است که ۵ سیگنال دارای کلاس سالم و ۵



شکل ۸- نمونه سیگنال فرم مثلثی

### ۳-۳- نتایج اعمال روش آنالیز اجزای اصلی بر سیگنال‌های نمونه برداری شده

در این مرحله، روش آنالیز اجزای اصلی بر سیگنال‌های نمونه برداری شده که در مرحله قبل پروژه تهیه شده‌اند، اعمال می‌گردد و امکان جداسازی قطعات معیوب و سالم با استفاده از این روش بررسی می‌شود.

در اینجا سیگنال‌های سالم را با اندیس‌هایی از  $ok$  (مثلا  $ok1$ ) و سیگنال‌های معیوب را با اندیس‌هایی از  $notok$  (مثلا  $notok1$ ) نشان می‌دهیم. اگر آنالیز اجزای اصلی را روی دو سیگنال  $[ok1, ok2]$  و سپس روی دو سیگنال  $[notok1, ok1]$  انجام دهیم بردارهای مشخصه به ترتیب به صورت  $[4.0809, 0.0000]$  و  $[4.0929, 0.0017]$  به دست می-آیند. در واقع عدد  $0.0017$  نشان دهنده تفاوت بین دو سیگنال  $notok1$  و  $ok1$  می‌باشد و عدد  $0.0000$  نشان می‌دهد که هیچ تفاوتی بین دو سیگنال  $ok1$  نمی‌باشد. از این خصوصیت بردار ویژه استفاده می‌شود و بر اساس این معیار، تفاوت بین سیگنال‌های معیوب و سالم و حتی بین خود سیگنال‌های سالم نشان داده می‌شود. در واقع از این خصوصیت به عنوان یکی از اعضای بردار ویژگی که در ادامه توضیح شده است، استفاده می‌شود.

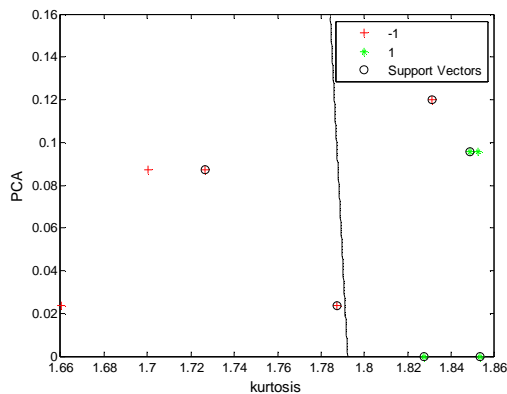
### ۳-۴- استخراج بردار ویژگی

در قسمت قبل نحوه اجرای تحلیل اجزای اصلی شرح داده شد و توضیح داده شد که غیر صفر بودن عنصر دوم بردار ویژه نشان دهنده معیوب بودن قطعه است. ولی این عامل به تنهایی نمی‌تواند یک مقایسه دقیق را فراهم کند، از این رو علاوه بر عنصر دوم بردار ویژه حاصل از تحلیل اجزای اصلی سیگنال‌های موجود در پایگاه داده با سیگنال مرجع، از کورتوسیس ۱ و اسکینوس ۲ هر کدام از سیگنالها نیز به عنوان دو عضو دیگر بردار ویژگی استفاده می‌شود. همچنین میانگین اختلاف هر کدام از سیگنال‌های موجود در پایگاه داده با سیگنال مرجع نیز به عنوان عضو چهارم بردار ویژگی انتخاب شده است. پس به طور خلاصه

<sup>1</sup> Kurtosis

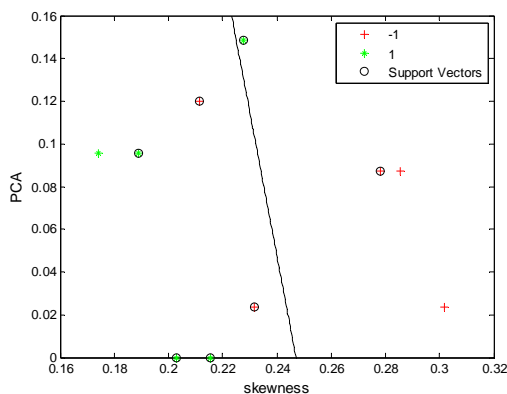
<sup>2</sup> Skewness

<sup>3</sup> Support vector machine



شکل ۱۲- نمودار دسته بندی کننده SVM با استفاده از دو ویژگی کرتوسیس و آنالیز اجزای اصلی

با توجه به جدول (۲) و استفاده از سیگنال‌های تست برای آزمایش دسته بندی کننده‌های طراحی شده، مشخص می‌شود هرچا از اسکینوس برای طراحی دسته بندی کننده استفاده شده است، دسته بندی کننده طراحی شده دقت پایینی دارد و در واقع کاربرد چندانی ندارد، در عوض کرتوسیس تاثیر بالایی روی دقت دسته بندی کننده دارد.



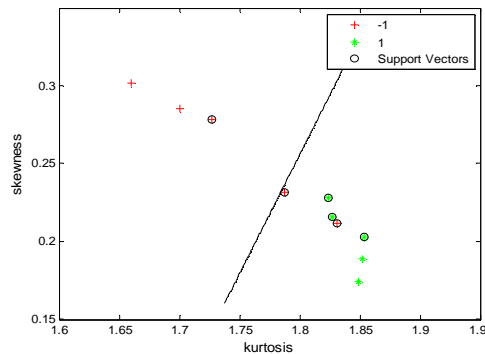
شکل ۱۳- نمودار دسته بندی کننده SVM با استفاده از دو ویژگی اسکینوس و آنالیز اجزای اصلی

جدول ۲- درصد صحت حدس ویژگی‌های مختلف

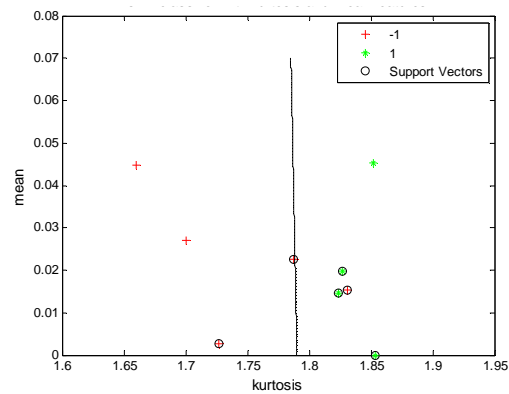
درصد حدس صحیح	ویژگی‌های مورد استفاده برای SVM
۵۰	کرتوسیس- اسکینوس
۱۰۰	کرتوسیس- میانگین
۰	اسکینوس- میانگین
۱۰۰	کرتوسیس- PCA
۵۰	اسکینوس- PCA
۵۰	میانگین- PCA

با توجه به موارد گفته شده، ویژگی اسکینوس از بردارهای ویژگی برای طراحی دسته بندی کننده SVM حذف می‌شود و دسته بندی کننده نهایی SVM با استفاده از سه ویژگی کرتوسیس، میانگین و آنالیز اجزای اصلی طراحی می‌شود. از آنجا که بردار ویژگی ما سه بعدی است

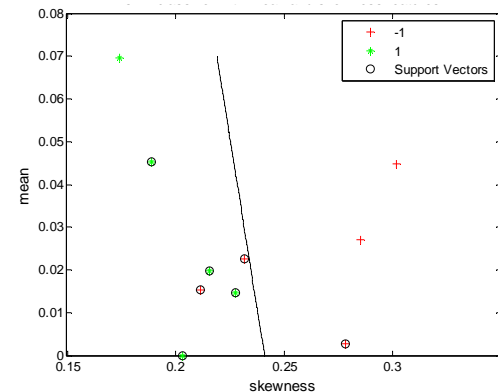
سیگنال دارای کلاس معیوب می‌باشند. و دو سیگنال هم برای تست دسته بندی کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تشخیص اینکه کدام یک از ویژگی‌ها برای طراحی دسته بندی کننده نهایی مناسب است، دسته بندی کننده‌های SVM مختلف با ترکیب دو به دو ویژگی- های مختلف طراحی شده است که در شکل‌های (۹) تا (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۹- نمودار دسته بندی کننده SVM با استفاده از دو ویژگی کرتوسیس و اسکینوس



شکل ۱۰- نمودار دسته بندی کننده SVM با استفاده از دو ویژگی کرتوسیس و میانگین



شکل ۱۱- نمودار دسته بندی کننده SVM با استفاده از دو ویژگی اسکینوس و میانگین



- IEEE Transactions on, Vol.19, No.2, pp.159-172, May 2006.
- [4] Abdulhamit Subasi, M. Ismail Gursoy, EEG signal classification using PCA, ICA, LDA and support vector machines, Expert Systems with Applications, Vol. 37, Issue 12, Pages 8659-8666, December 2010.
- [5] Jong-Min Lee, ChangKyoo Yoo, In-Beum Lee, Fault detection of batch processes using multiway kernel principal component analysis, Computers & Chemical Engineering, Vol. 28, Issue 9, Pages 1837-1847, 15 August 2004.
- [6] Jing Zhou, Aihuang Guo, Branko Celler, Steven Su, Fault detection and identification spanning multiple processes by integrating PCA with neural network, Applied Soft Computing, Vol. 14, Part A, Pages 4-11, January 2014.
- [7] Jordan McBain, Markus Timusk, Feature extraction for novelty detection as applied to fault detection in machinery, Pattern Recognition Letters, Volume 32, Issue 7, Pages 1054-1061, 1 May 2011.
- [8] Liu H.K., Pan C.H., Dimension effect on mechanical behavior of silicon micro-cantilever beams, Measurement, 2008.
- [9] Design Center of Brush Wellman, www.brushwellman.com
- [10] Metal Propertis guide/tech papers, www.technicalmaterials.com
- [11] Martin Brown, Steve R. Gunn, Hugh G. Lewis, Support vector machines for optimal classification and spectral unmixing, Ecological Modelling, Volume 120, Issues 2-3, Pages 167-179, 17 August 1999.

نمایش صفحه جدا کننده کلاس‌ها امکان پذیر نیست. دسته بندی کننده طراحی شده با استفاده از این سه ویژگی قادر به تشخیص ۱۰۰ درصد سیگنال‌های تست را داشت. این امر بیان می‌کند که این روش قادر است با دقت بالایی قطعه سالم از معیوب را تشخیص دهد. لازم به ذکر است هرچه تعداد داده‌های تست بیشتر شود، می‌توان دقت دسته بندی کننده را افزایش داد.

## ۵- نتیجه گیری

عدم تماس بین قطعه جاروبک پتانسیومتر موتور با فیلم در موتور XU7، سبب می‌شود که ولتاژ مناسب به ECU ارسال نشود. برای بررسی مشکل عدم تماس، قطعه پتانسیومتر تحت تحلیل‌های مختلف قرار گرفت تا اولاً جنس مناسب انتخاب شود و ثانیاً روشی برای تشخیص قطعات معیوب از سالم پیدا شود. در تحلیل استاتیکی قطعات با جنس‌ها و ضخامت مختلف تحت بار استاتیکی قرار گرفتند. بار استاتیکی به صورت تغییر شکل بر قطعات وارد شد. در مرحله بعد، آزمایشی تجربی برای به دست آوردن نمودار نیرو بر حسب تغییر شکل و همچنین صحه گذاری بر نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی طراحی و انجام شد.

نتیجه هر دو تحلیل یکسان بود و در نهایت مشخص کرد که قطعه با جنس C72900 با ضخامت ۰/۶۶ میلی‌متر و تغییر مکان اولیه ۲/۱۷ میلی‌متر می‌تواند قابلیت و ضریب اطمینان لازم را احراز کند. اما از آنجا که پتانسیومتر در شرایط دینامیکی کار می‌کند نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی نمی‌تواند تضمین کننده کارکرد صحیح پتانسیومتر باشد. از اینرو از روش‌های پردازش سیگنال برای تشخیص قطعات سالم و معیوب استفاده شد. به این صورت که پتانسیومتر توسط یک استپ موتور در آزمایشگاه به حرکت در می‌آید تا شرایط واقعی حرکت خودرو را شبیه سازی کند و ولتاژ دو سر آن اندازه‌گیری می‌شود. پس از نمونه‌گیری، از جنس‌های مختلف و تحت سیکل‌های متفاوت برای هر نمونه یک بردار ویژگی تشکیل می‌شود. این بردارهای ویژگی به همراه برچسب‌هایشان (سالم یا معیوب) توسط SVM آموزش داده می‌شوند. دسته بندی کننده‌ها مختلفی با استفاده از ترکیب ویژگی‌های مختلف ایجاد شد و نتیجه گیری شده که ویژگی اسکینوس موجب ایجاد مشکل در دسته بندی کننده طراحی شده می‌شود، از این رو دسته بندی کننده نهایی با استفاده از سه ویژگی کرتوسیس، میانگین و آنالیز اجزای اصلی ایجاد شد که قادر به پیش بینی صحیح صد درصد قطعات سالم و معیوب بود.

## ۶- مراجع

- [1] Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Surya N. Kavuri, Kewen Yin, A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods, Computers & Chemical Engineering, Vol. 27, Issue 3, 15 March 2003.
- [2] Penza M., Cassano G., Application of principal component analysis and artificial neural networks to recognize the individual VOCs of methanol/2-propanol in a binary mixture by SAW multi-sensor array, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 89, Issue 3, 269-284, 1 April 2003.
- [3] Cherry G.A.; Qin S.J., Multiblock principal component analysis based on a combined index for semiconductor fault detection and diagnosis, Semiconductor Manufacturing,