



تشخیص عیب خروج از مرکز موتور القایی با استفاده از درخت تصمیم

مهسا عباسی^۱، مسعود صباغی^{۲*}گروه کامپیوتر و مکترونیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران^۱پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران^۲

چکیده

در تشخیص عیب مبتنی بر سیگنال، روش‌های پردازش سیگنال یکی از موارد اساسی محسوب می‌شوند. این روش‌ها که پایه و اساس مرحله استخراج ویژگی در عیب‌یابی را تشکیل می‌دهند، در سه حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس انجام می‌شوند. در این مقاله به تشخیص عیب گریز از مرکز موتور القایی با استفاده از درخت تصمیم در حوزه زمان-فرکانس پرداخته شده است. بدین‌صورت که با استفاده از ویژگی‌های آماری، ویژگی‌های سیگنال ولتاژ کوئل استخراج شده و مراحل کشف عیب و دسته‌بندی عیوب با استفاده از روش المان محدود دنبال می‌شود. با توجه به هدف تشخیص می‌توان سه استراتژی را دنبال کرد. در ابتدا حالت سالم را از تمام حالات معیوب، سپس سه حالت سالم و عیب گریز از مرکز دینامیک و عیب گریز از مرکز استاتیک و در نهایت هر یک از ۷ حالت سیستم (سالم، دینامیک ۱۰ درصد، دینامیک ۳۰ درصد، دینامیک ۵۰ درصد، استاتیک ۱۰ درصد، استاتیک ۳۰ درصد، استاتیک ۵۰ درصد) را جداسازی کرد که برای هر کدام صحت تشخیص عیب متفاوتی حاصل خواهد شد.

کلمات کلیدی: تشخیص عیب، موتور القایی، درخت تصمیم، خروج از مرکز

Email: msabaghi@aeoi.org.ir

Eccentricity Fault Diagnosis of the Induction Motor using the Decision Tree

Mahsa Abbasi¹ and Masoud Sabaghi^{2*}¹Department of Computer and Mechatronics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran² Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), Tehran, Iran

تاریخچه مقاله:

تاریخ ارسال: ۹۷/۱۲/۲۰

تاریخ اصلاحات: ۹۸/۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۱۵

تاریخ انتشار: ۹۸/۵/۱۵

Keywords:

Fault diagnosis
Induction motor
Decision tree

Abstract

In signal based fault diagnosis signal processing plays a key role. Signal processing techniques include the time domain, frequency domain and time-frequency area techniques. In this project, eccentricity fault diagnosis of the induction motor using the decision tree and coil voltage is investigated. With respect to diagnosis goal, three strategies can be followed. Isolation of faulty and healthy states, isolation of healthy, dynamic eccentricity and static eccentricity, and isolation of seven states of system (healthy, dynamic 10%, dynamic 30%, dynamic 50%, static 10%, static 30%, static 50%).

روش ارجاع به مقاله:

م. عباسی، م. صباغی، تشخیص عیب خروج از مرکز موتور القایی با استفاده از درخت تصمیم، دو فصلنامه محاسبات و سامانه‌های توزیع شده، سال دوم، شماره اول، شماره پیاپی ۳، سال ۱۳۹۸، ص ۱۱۲-۱۲۰



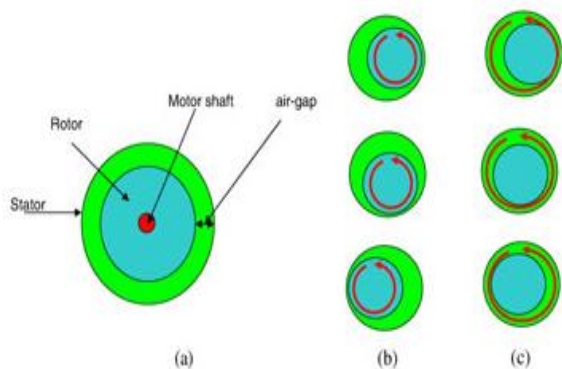
۱ - مقدمه

امروزه، موتورهای القایی به علت قابلیت اطمینان و سادگی در ساخت، در صنایع تولیدی، فرایندی و حمل و نقل کاربرد فزاینده‌ای دارند. اگرچه موتورهای القایی قابل اطمینان هستند، امکان وقوع عیوب غیرمنتظره در آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی برای دستیابی به عملکرد مناسب، مسئله‌ی مقاوم بودن و قابلیت اطمینان بسیار مهم است. بنابراین در سال‌های اخیر پایش وضعیت موتورهای القایی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. موتورهای القایی به دلیل ارزانی، تنوع و سرسختی‌شان کاربرد وسیعی در صنعت دارند. بنابراین وقوع خطا در این موتورها می‌تواند موجب ایجاد وقفه در فعالیت‌های صنعتی، افزایش هزینه، کاهش کیفیت تولید و یا حتی کاهش ایمنی برای اپراتور گردد. تشخیص زودهنگام عیب می‌تواند موجب کاهش خرابی تجهیز و زمان نگهداری و افزایش قابلیت اطمینان آن گردد که این امر موجب اهمیت عیب‌یابی موتورهای القایی می‌شود.

در سال ۲۰۰۱ کاربرد درخت تصمیم در جداسازی عیب یک موتور القایی مورد بررسی قرار گرفت [۱]. در سال ۲۰۰۷ آنالیز گذرای المان محدود یک موتور قفسه‌سنجابی سه فاز با خروج از مرکز استاتیکی انجام شد [۲]. در سال ۲۰۰۹ تشخیص عیب موتور القایی بر اساس درخت تصمیم و استنتاج عصبی-فازی تطبیقی مورد بررسی قرار گرفت [۳]. در سال ۲۰۰۹ تشخیص عیب خروج از مرکز در موتور القایی با استفاده از المان محدود انجام شد [۴]. در سال ۲۰۱۱ تشخیص عیب خروج از مرکز دینامیک در موتور سنکرون مورد بررسی قرار گرفت [۵]. در سال ۲۰۱۲ کشف عیب خروج از مرکز استاتیکی در ماشین‌های

مغناطیس دائم شار محوری یک روتور-تک استاتور مورد بررسی قرار گرفت [۶]. در سال ۲۰۱۵ تشخیص انواع مختلف عیب خروج از مرکز در موتورهای سویچ رلوکتانس با استفاده از روش المان محدود گذرا انجام شد [۷]. در سال ۲۰۱۶ آنالیز ارتعاشی میله شکسته روتور در موتور القایی تحت بارهای مختلف و با استفاده از DWT بررسی شد [۸]. در سال ۲۰۱۷ آنالیز عیب استاتور موتور القایی سه فاز با استفاده از شبکه‌های عصبی تحلیل شد [۹].

از تحلیل مؤلفه‌های اساسی و درخت تصمیم و شبکه عصبی پس انتشار برای تشخیص عیب توربین و کمپرسور استفاده شده است [۱۱]. با توجه به نتایج به دست آمده درخت تصمیم و PCA دقت دسته‌بندی بالاتری نسبت به شبکه عصبی پس انتشار دارند [۱۲]. از درخت تصمیم برای شناسایی بهترین شاخصه یک مجموعه داده استفاده شده است و از PSVM برای طبقه‌بندی داده‌ها استفاده شده است. نتایج نسبت به ماشین بردار پشتیبان دقت بسیار بالاتری را دارند [۱۳]. یک روش هیبریدی برای دسته بندی بیماری‌های پوستی ارائه داد که این روش بر مبنای درخت تصمیم و الگوریتم یکی علیه بقیه است. ابتدا داده‌ها با درخت تصمیم طبقه بندی شده‌اند که دارای دقت ۸۷٪ است. سپس الگوریتم هیبریدی داده‌ها را با دقت ۹۴٪ طبقه بندی کرده است [۱۴]. از درخت تصمیم برای پایش وضعیت یاتاقان غلتکی استفاده شده است. شاخصه‌های آماری نظیر حداقل مقدار، خطای معیار، کورتوزیس از سیگنال ارتعاش استخراج شده و یک مجموعه قوانین فازی برای طبقه بندی کننده ایجاد شده است. همچنین از درخت



(شکل-۱): موتور القایی (a) موتور سالم، (b) عیب خروج از مرکز استاتیک، (c) عیب خروج از مرکز دینامیک [۲].

RMS، واریانس و ... از داده‌ها استخراج می‌شود. سپس در مرحله اول تشخیص داده می‌شود که کدام ویژگی‌ها مهم‌تر بوده و سپس الگوریتم تشخیصی به دست آورده می‌شود.

۲- خروج از مرکز موتور القایی

محورهای استاتور و روتور باید بر هم و همچنین محور چرخان موتور منطبق باشد در غیر این صورت عیب خروج از مرکز رخ می‌دهد. اگر محور استاتور را محور اول و محور روتور را محور دوم در نظر بگیریم، در موتور سالم محورهای اول و دوم بر هم منطبق هستند و اگر بر هم منطبق نباشند و محور دوم، مرکز چرخش قرار گیرد، عیب خروج از مرکز استاتیک و اگر محور اول مرکز چرخش باشد عیب خروج از مرکز و در صورتی که محور چرخش موتور هرجایی بین این دو محور باشد عیب خروج از مرکز مختلط رخ داده است که این سه حالت در شکل ۱ نمایش داده شده است [۲].

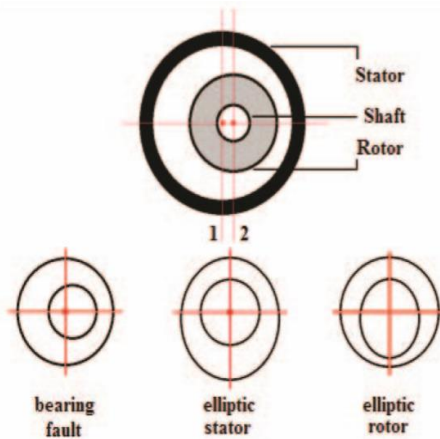
توزیع فاصله هوایی غیر یکنواخت در موتور القایی به فرآیند ساخت، ویژگی‌های طراحی و شرایط کاری موتور بستگی دارد. عدم تقارن موتور می‌تواند به دلیل عدم قرار دادن محور روتور روی محور استاتور باشد (خطای یاتاقان‌ها) و یا استاتور و یا روتور شکل کاملاً

تصمیم و الگوریتم شبکه عصبی-فازی برای تشخیص عیب در آلات دوار استفاده شده است [۱۵].

با مرور بررسی‌های پیشین، مطالعه جامعی در مورد انواع عیوب خروج از مرکز شامل دینامیکی و استاتیکی و درصد‌های مختلف از شدت وقوع این عیوب با استفاده از درخت تصمیم که دارای شماتیک قابل درک و توصیفی خوبی است، صورت نگرفته است. از سوی دیگر، استفاده از سیگنال ولتاژ که نسبت به سیگنال‌های ارتعاشی (رایج در صنایع برای عیب‌یابی) قابل دسترسی بیشتر و ارزان قیمت است.

یکی از عیوبی که ممکن است در موتور اتفاق بیفتد خطای خروج از مرکز روتور است که هدف این مقاله تشخیص این نوع عیب است. برای این منظور با استفاده از روش المان محدود و ولتاژ تست کویل مربوط به موتور سالم و معیوب نمونه برداری می‌شود. عیوب شامل ۶ دسته است. عیوب شبیه سازی شده شامل عیوب ۱۰٪، ۳۰٪ و ۶۰٪ در دو گروه استاتیک و دینامیک است.

با گسترش سیستم‌های پایگاهی و حجم بالای داده‌ها ذخیره‌شده در این سیستم‌ها نیاز به ابزاری است تا این سیستم‌های ذخیره شده را پردازش کنند و در اختیار کاربران بگذارند. وقتی که حجم داده‌ها بالا می‌رود، کاربران نمی‌توانند حجم انبوه داده‌ها را از یکدیگر تشخیص دهند به همین دلیل به داده‌کاوی روی می‌آورند تا بتوانند به هدفی مشخص برسند یکی از روش‌های داده‌کاوی که به الگوریتمی قابل تفسیر منجر می‌شود درخت تصمیم است. در این مقاله ویژگی‌های آماری در دو حوزه زمان (میانگین، RMS، آنتروپی، واریانس) و فرکانس (فرکانس



(شکل-۲): نمایش عیب خروج از مرکز [۱۰].

درخت تصمیم از یک ریشه تشکیل شده است. سپس برای این ریشه شاخه‌هایی در نظر گرفته می‌شود و برای شاخه S ویژگی X به‌عنوان تفکیک‌کننده انتخاب می‌شود. سپس از شاخه S شاخه‌های جدید S_1, \dots, S_L ایجاد می‌شود و بر روی گره مربوط به شاخه S برچسب ویژگی X می‌خورد. در شاخه‌های S_1, \dots, S_L نیز به‌صورت بازگشتی تقسیم بندی انجام می‌شود. این تقسیم بندی تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تمام داده‌های یک شاخه دارای برچسب یکسان باشند و در نتیجه تبدیل به یک برگ می‌شود. ساختار درخت تصمیم به نحوه انتخاب ویژگی X بستگی دارد. در C4.5 بهره اطلاعات بر مبنای آنتروپی به‌عنوان معیار انتخاب استفاده می‌شود. یک نمونه درخت تصمیم که مربوط به تشخیص عیب به کمک شاخه‌های سیگنال ارتعاش است در شکل ۳ نشان داده شده است. روند تشکیل درخت تصمیم و مراحل مربوطه آن در زیر آمده است:

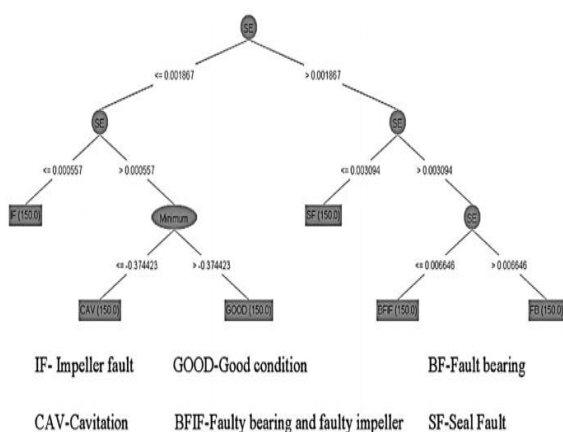
- ا. در مرحله اول آنتروپی داده‌ها محاسبه می‌شود.
- ب. در مرحله دوم بهره اطلاعات محاسبه می‌شود. بهره اطلاعات یک ویژگی، عبارت است از مقدار

استوانه‌ای نداشته باشند که این موارد در شکل ۲ نشان داده شده است.

گریز از مرکز استاتیکی یک پدیده ناشی از ناهمگونی فاصله هوایی بین استاتور روتور است که معمولاً به دلیل وجود saft foot در فونداسیون فاهمر استایی بلبرینگ یا یک تنظیم نادرست فاصله هوایی بلبرینگ به وجود می‌آید. گریز از مرکز دینامیکی پدیده‌ای ناشی از فاصله هوایی متغیر روتور و استاتور است که عموماً به دلیل فرسودگی در هویلینگ بلبرینگ‌ها یا پوشش‌های انتهایی رخ می‌دهد. این پدیده یک مشکل و سبب مهم است چراکه می‌تواند باعث تخریب سریع بلبرینگ و هویلینگ آن و در دراز مدت باعث بروز سایش روتور با استاتور شود.

۳- روش درخت تصمیم

درخت تصمیم یکی از ابزارهایی است که در علم داده‌کاوی برای طبقه‌بندی داده‌ها استفاده می‌شود. این درخت یک الگوریتم بازگشتی است که ساختاری از بالا به پایین دارد. این الگوریتم ابتدا توسط کونیان و همکاران تحت عنوان تکرار دوتایی (ID3) مطرح گردید [۱۶]. بعدها الگوریتم کامل‌تری تحت عنوان C4.5 ارائه گردید که نقایص ID3 را برطرف کرد. این الگوریتم با این سؤال شروع می‌شود که کدام ویژگی باید در ریشه مورد آزمایش قرار گیرد. برای یافتن جواب از یک آزمون آماری در میان داده‌ها استفاده می‌شود که بررسی می‌کند کدام شاخصه می‌تواند بیشترین تمایز را بین داده‌ها ایجاد کند.



(شکل-۳): درخت تصمیم برای تشخیص عیب به کمک شاخصه‌های سیگنال ارتعاش.

۴ - نتایج

در این مقاله، ۷ سری داده مربوط به ۷ موتور را در اختیار داریم. داده سری اول مربوط به ولتاژهای کوپل تست ۱ و ۲ مربوط به موتور سالم است. داده سری دوم مربوط به موتور معیوب با عیب شماره ۱ (استاتیک ۱۰٪) است. داده سری سوم مربوط به موتور معیوب با عیب شماره ۲ (استاتیک ۳۰٪) است و به همین ترتیب که سری داده هفتم مربوط به موتور معیوب با عیب شماره ۶ (دینامیک ۶۰٪) است. نمونه برداری با زمان نمونه برداری ۰/۲۵ میلی ثانیه برای زمان‌های ۰ تا ۱/۵ ثانیه انجام شده است که در مجموع ۶۰۱ داده داریم. سیگنال ولتاژ کوپل ۱ و ۲ در حالت سالم را در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. ویژگی‌های استخراج شده آماری سیگنال‌های ولتاژ کوپل ۱ و ۲ را بعنوان ورودی به درخت تصمیم داده می‌شود تا عملیات تشخیص انجام شود. در اینجا سه استراتژی تشخیص عیب را در نظر گرفته می‌شود:

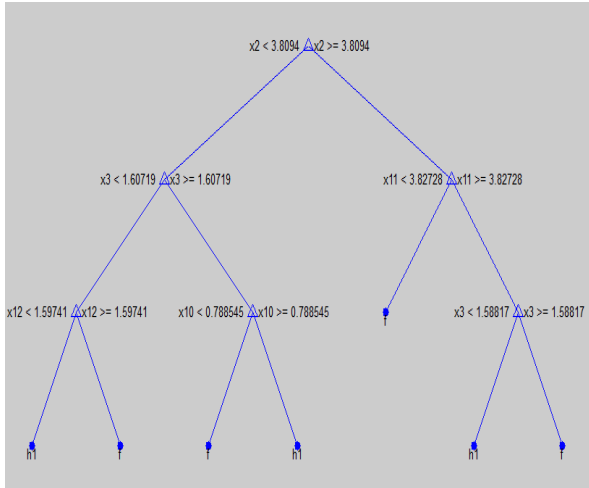
- (استراتژی شماره ۱) آشکارسازی عیب؛ جداسازی حالت سالم از سایر حالت‌ها

کاهش آنتروپی که به واسطه جداسازی به وسیله این ویژگی حاصل می‌شود.

ج. در این مرحله اطلاعات جداسازی تعریف می‌شود.

د. در مرحله آخر نسبت بهره محاسبه می‌شود. ویژگی‌ای که بیشترین مقدار بهره را داشته باشد بعنوان ریشه انتخاب می‌شود.

در روش‌های تشخیص عیب سیگنال-مبنا پس از یافتن تأثیر عیب در سیگنال نیاز به الگوریتم‌های طبقه‌بندی کننده است تا علاوه بر تشخیص عیب، نوع عیب را نیز مشخص کند. به‌طورمعمول شاخصه‌هایی از سیگنال استخراج می‌شوند و این شاخصه‌ها به الگوریتم‌های دسته‌بندی کننده اعمال می‌شوند تا مودهای مختلف سیستم تعیین شوند. الگوریتم‌های دسته‌بندی کننده زیادی موجودند که مزایا و معایب خود را دارند. شبکه‌های عصبی دسته‌بندی داده‌ها با دقت بالایی رادارند ولی فرآیند آموزش آن‌ها بسیار دشوار و وقت‌گیر است. از طرفی دسترسی به داده‌های غنی در سیستم‌های صنعتی ممکن است امکان‌پذیر نباشد. الگوریتم‌های دسته‌بندی کننده فازی نیز به قوانینی که توسط فرد خبره تعیین می‌شوند بستگی دارند. ماشین بردار پشتیبان نیز دقت مناسبی در دسته‌بندی داده‌ها دارد ولی انتخاب شاخصه‌ها باید توسط الگوریتم دیگری انجام شود که از نظر محاسباتی مشکلاتی را ایجاد می‌کند. برای غلبه بر این مشکلات نیاز به الگوریتمی است که انتخاب و دسته‌بندی شاخصه‌ها را به‌طور همزمان انجام دهد. الگوریتم درخت تصمیم C4.5 الگوریتمی است که این ویژگی‌ها را داراست.

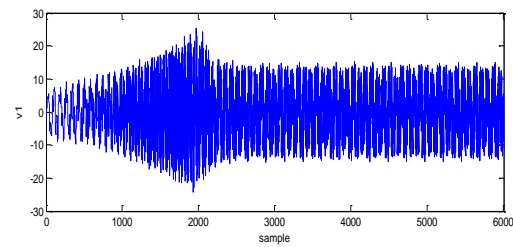


(شکل-۶): درخت تصمیم ردیف ۵- استراتژی ۱.

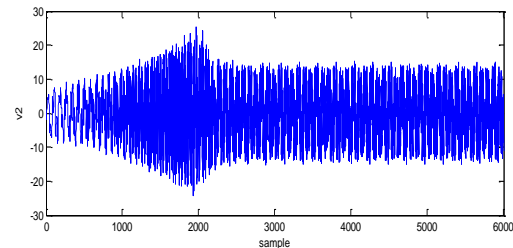
شده است. درخت تصمیم مربوط به بهترین حالت از استراتژی اول در شکل ۶ نشان داده شده است. در استراتژی شماره ۲ درواقع سه حالت سالم، عیب استاتیک و عیب دینامیک از یکدیگر جدا می‌شوند. نتایج اعمال دسته‌بندی درخت تصمیم در حالت استفاده از ویژگی‌های ضرایب مختلف تبدیل موجک در جدول ۲ خلاصه شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که بهترین تشخیص در حالت ردیف

جدول ۱: خطای تشخیص عیب-استراتژی ۱

ردیف	ویژگی آماری استخراج شده	صحت دسته‌بندی (%)
۱	ضریب WPT1 حاصل از ولتاژ کویل ۱	۹۴,۸۰۵۲
۲	ضریب WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۱	۸۸,۹۶۱۰
۳	ضریب WPT1 حاصل از ولتاژ کویل ۲	۹۲,۸۵۷۱
۴	ضریب WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۲	۸۲,۴۶۷۵
۵	ضریب WPT1 حاصل از ولتاژ کویل ۱ و ولتاژ کویل ۲	۹۶,۷۵۳۲
۶	ضریب WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۱ و ولتاژ کویل ۲	۸۸,۳۱۱۷
۷	ضریب WPT1 و WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۱ و ولتاژ کویل ۲	۸۸,۳۱۱۷



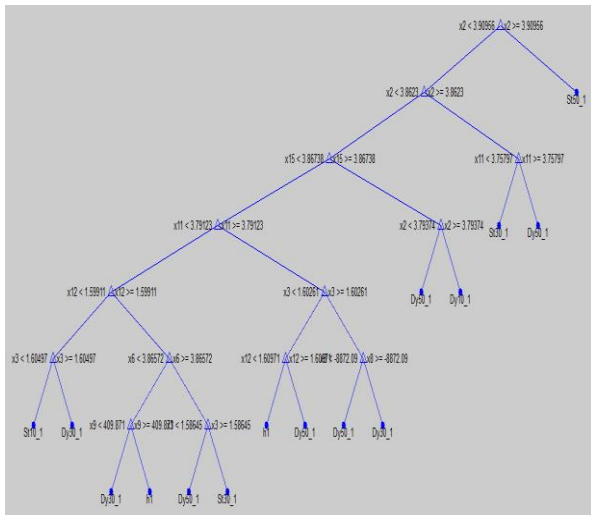
(شکل-۴): سیگنال ولتاژ کویل ۱- سالم.



(شکل-۵): سیگنال ولتاژ کویل ۲- سالم.

- (استراتژی شماره ۲) جداسازی حالت سالم و عیب استاتیک و عیب دینامیک
- (استراتژی شماره ۳) جداسازی هر یک از حالت‌های سالم، دینامیک ۱۰ درصد، دینامیک ۳۰ درصد، دینامیک ۵۰ درصد، استاتیک ۱۰ درصد، استاتیک ۳۰ درصد و استاتیک ۵۰ درصد از یکدیگر.

برای انجام دسته بندی، ۲۲ داده ۲۰۰ نمونه‌ای در حالت سالم و هریک از حالات معیوب و در کل ۱۵۴ عدد داده موجود است. به هریک از این ۱۵۴ داده عملیات ذکر شده در بخش قبلی را اعمال کرده و ویژگی‌های حاصل را به درخت تصمیم وارد می‌کنیم. در استراتژی شماره ۱ در واقع تنها عمل کشف عیب انجام می‌شود. نتایج اعمال دسته بندی درخت تصمیم در حالت استفاده از ویژگی‌های ضرایب مختلف تبدیل موجک در جدول ۱ خلاصه شده است. با توجه به جدول، بهترین تشخیص عیب در ردیف ۵ حاصل

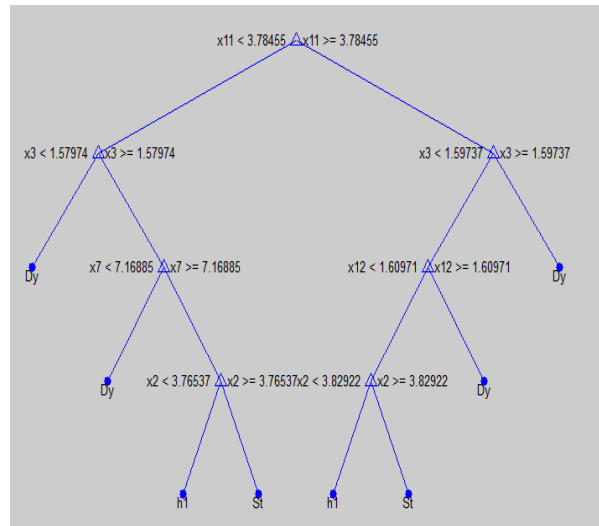


(شکل-۸): درخت تصمیم ردیف ۵-استراتژی ۳.

به درصدهای مختلف عیوب تفاوت زیادی از یکدیگر نداشته و این موضوع عمل ایجاد تمایز میان آن‌ها را مشکل می‌کند. نتایج اعمال دسته بندی درخت تصمیم در حالت استفاده از ویژگی‌های ضرایب مختلف در جدول ۳ خلاصه شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که بهترین تشخیص در حالت ردیف ۵ و پس از آن در حالت ردیف ۱ اتفاق می‌افتد. درخت تصمیم مربوط به ردیف ۵ را در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

(جدول-۱): خطای تشخیص عیب-استراتژی ۳

ردیف	ویژگی آماری استخراج شده	صحت دسته‌بندی (%)
۱	ضریب WPT1 حاصل از ولتاژ کویل ۱	۷۸,۵۷۱۴
۲	ضریب WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۱	۶۱,۰۳۹۰
۳	ضریب WPT1 حاصل از ولتاژ کویل ۲	۷۶,۶۲۳۴
۴	ضریب WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۲	۶۲,۹۸۷۰
۵	ضریب WPT1 حاصل از ولتاژ کویل ۱ و ولتاژ کویل ۲	۷۹,۲۲۰۸
۶	ضریب WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۱ و ولتاژ کویل ۲	۶۷,۵۳۲۵
۷	ضریب WPT1 و WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۱ و ولتاژ کویل ۲	۷۵,۹۷۴۰



(شکل-۷): درخت تصمیم ردیف ۵-استراتژی ۲.

۵ اتفاق افتاده است. درخت تصمیم مربوط به ردیف ۵ را در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

در استراتژی شماره ۳ در واقع ۷ حالت سالم، دینامیک ۱۰ درصد، دینامیک ۳۰ درصد، دینامیک ۵۰ درصد، استاتیک ۱۰ درصد، استاتیک ۳۰ درصد و استاتیک ۵۰ درصد از یکدیگر جدا می‌شوند. این استراتژی مشکل‌ترین حالت است. زیرا داده‌های مربوط

(جدول-۲): خطای تشخیص عیب-استراتژی ۲

ردیف	ویژگی آماری استخراج شده	صحت دسته‌بندی (%)
۱	ضریب WPT1 حاصل از ولتاژ کویل ۱	۹۰,۹۰۹۱
۲	ضریب WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۱	۷۴,۶۷۵۳
۳	ضریب WPT1 حاصل از ولتاژ کویل ۲	۸۷,۶۶۲۳
۴	ضریب WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۲	۷۹,۲۲۰۸
۵	ضریب WPT1 حاصل از ولتاژ کویل ۱ و ولتاژ کویل ۲	۹۴,۱۵۵۸
۶	ضریب WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۱ و ولتاژ کویل ۲	۸۲,۴۶۷۵
۷	ضریب WPT1 و WPT2 حاصل از ولتاژ کویل ۱ و ولتاژ کویل ۲	۹۰,۲۵۹۷



Trans. Magn., vol. 45, no. 3, pp. 1764–1767, 2009.

- [5] B. M. Ebrahimi, M. Etemadrezaei, and J. Faiz, "Dynamic eccentricity fault diagnosis in round rotor synchronous motors," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 5, pp. 2092–2097, 2011.
- [6] S. M. Mirimani, A. Vahedi, F. Marignetti, and E. De Santis, "Static Eccentricity Fault Detection in Single Stator-Single Rotor Axial Flux Permanent Magnet Machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 6, pp. 1838–1845, 2012.
- [7] H. Nazari and N. Rostami, "Diagnosis of Different Types of Air-Gap Eccentricity Fault in Switched Reluctance Motors Using Transient Finite Element Method," vol. 3, no. 2, pp. 94–101, 2015.
- [8] J. Rangel-magdaleno, H. Peregrina-barreto, J. Ramirez-cortes, R. Morales-caporal, and I. Cruz-vega, "Vibration Analysis of Partially Damaged Rotor Bar in Induction Motor under Different Load Condition Using DWT," vol. 2016, 2016.
- [9] G. H. Bazan, P. R. Scalassara, W. Endo, A. Goedel, W. F. Godoy, and R. H. C. Palácios, "Stator fault analysis of three-phase induction motors using information measures and artificial neural networks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 347–356, 2017.
- [10] A. P. ; Y. D. E. ; L. T. Ergene, "Static, dynamic and mixed eccentricity of induction motor," 2015 IEEE 10th Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives, 2015.
- [11] J. L. W. Sun, J. Chen, "Decision tree and PCA-based fault diagnosis of rotating machinery," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, pp. 1300–1317, 2007.
- [12] K. R. V. Sugumaran, V. Muralidharan, "Feature selection using decision tree and classification through proximal support vector machine for fault diagnostics of roller bearing," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, pp. 930–942.

۵ - نتیجه‌گیری

در این مقاله به تشخیص عیب گریز از مرکز موتور القایی با استفاده از درخت تصمیم در حوزه زمان-فرکانس پرداخته شده است. بدین صورت که با استفاده از ویژگی‌های آماری، ویژگی‌های سیگنال ولتاژ کوئل استخراج‌شده و مراحل کشف عیب و دسته‌بندی عیوب با استفاده از روش المان محدود دنبال می‌شود. با توجه به هدف تشخیص می‌توان سه استراتژی را دنبال کرد. در ابتدا حالت سالم را از تمام حالات معیوب، سپس سه حالت سالم و عیب گریز از مرکز دینامیک و عیب گریز از مرکز استاتیک و در نهایت هر یک از ۷ حالت سیستم (سالم، دینامیک ۱۰ درصد، دینامیک ۳۰ درصد، دینامیک ۵۰ درصد، استاتیک ۱۰ درصد، استاتیک ۳۰ درصد، استاتیک ۵۰ درصد) را جداسازی کرد که برای هر کدام صحت تشخیص عیب متفاوتی حاصل خواهد شد.

۷ - مراجع

- [1] P. B. P. D. Pomorski, "Inductive learning of decision trees: application to fault isolation of an induction motor," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, pp. 155–166, 2001.
- [2] M. B. B. S. J. Faiz, B. M. Ebrahimi, "Finite element transient analysis of an on-load three-phase squirrel-cage induction motor with static eccentricity," *J. Electromagn.*, pp. 207–227, 2007.
- [3] A. C. T. V. T. Tran, B. S. Yang, M. S. Oh, "Fault diagnosis of induction motor based on decision trees and adaptive neuro-fuzzy inference," *Expert Syst. Appl.*, pp. 1840–1849, 2009.
- [4] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, B. Akin, and H. A. Toliyat, "Comprehensive Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motors Using Finite Element Method," *IEEE*



مسعود صباغی مدرک
کارشناسی خود را در رشته
مهندسی الکترونیک در سال
۱۳۶۸ از دانشگاه عثمانیا کشور

هندوستان، کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی
الکترونیک در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه دهلی کشور
هندوستان و مدرک دکترا در رشته مهندسی
الکترونیک در سال ۱۳۸۰ از دانشگاه I.T بنارس هندو
کشور هندوستان، اخذ کرده است. ایشان در حال
حاضر به عنوان عضو هیات علمی پژوهشکده فوتونیک
و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون
هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران مشغول
فعالیت هستند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان
عبارت‌اند از: مدارهای الکترونیکی - مباحث ویژه در
الکترونیک نوری و کوانتومی - تئوری و تکنولوژی
ساخت قطعات نیمه هادی - تئوری و تکنولوژی
ساخت و کاربرد لیزر

- [13] K. Polat and S.Güneş, "A novel hybrid intelligent method based on C4. 5 decision tree classifier and one-against-all approach for multi-class classification problems," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, pp. 1587–1592, 2009.
- [14] V. S. and K.Ramachandran, "Automatic rule learning using decision tree for fuzzy classifier in fault diagnosis of roller bearing," *Mech. Syst. Signal Process.*, pp. 2237–2247, 2007.
- [15] A. C. C. T. B.-S. Yang, M.-S. Oh, "Fault diagnosis of induction motor based on decision trees and adaptive neuro-fuzzy inference," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, pp. 1840–1849, 2009.
- [16] J.R.Quinlan, "Induction of decision trees," *Mach. Learn.*, vol. 1, pp. 81–106.



مهسا عباسی مدرک کارشناسی
خود را در رشته مهندسی برق
الکترونیک در سال ۱۳۹۳ از
دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج
و مدرک کارشناسی ارشد خود
را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه

آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران اخذ کرده
است. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارت‌اند از:
بررسی موتور های القایی، تشخیص خطا و برطرف
کردن آن است.