

طراحی و پیاده‌سازی ساختار هوشمند تشخیص عیب ژنراتور

محمد زارع ارنانی و اصغر اکبری ازیرانی

و روش‌های تصمیم‌گیری هوشمند یکی از مباحث مورد علاقه در سیستم‌های قدرت می‌باشند [۱].

با وجود تحقیقات فراوان در این زمینه باز هم نواقص و مشکلات بسیاری در مورد این سیستم‌ها وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- نیاز به حضور اپراتور و متخصص خبره برای تفسیر اطلاعات به دست آمده از دستگاه‌های مانیتورینگ.
- نیاز به حضور چندین متخصص با تخصص‌های مختلف برای آنالیز و تحلیل هر یک از روش‌های مانیتورینگ.
- فقدان بخش استدلال و استنتاج نهایی قابل اطمینان در سیستم‌های مانیتورینگ.
- عدم ارتباط و هماهنگی میان سیستم‌های حفاظت و سیستم مانیتورینگ جهت تبادل اطلاعات و کارکرد بهینه.
- فقدان جامعه اطلاعات آماری از وقایع و حالت‌های عیب و هشدار تجهیزات مختلف برای استفاده در الگوهایی تشخیص عیب.
- حجم زیاد اطلاعات، مشکلات مختلف ارسال و دریافت داده مانند محدودیت سرعت و زمان، خطاهای احتمالی در مخابره اطلاعات، از دست دادن سیگنال‌های کنترلی، پروتکل‌های گوناگون مخابراتی، کالیبراسیون از راه دور، نویزها و ... که همه اینها باعث می‌شود تا ایجاد یک سیستم مانیتورینگ و کنترل جامع که بتواند در شرایط هشدار و اضطرار به درستی ژنراتور را راهبری کند، با مشکل مواجه شود.

نظارت بر ژنراتور و تصمیم‌گیری در حالت عملکرد نرمال آن وظایف نسبتاً ساده‌ای برای اپراتورها است و به عکس، در شرایط خاص، اپراتورها با حجم زیادی از مقادیر مختلف پارامترها و هشدارها مواجه هستند. از آنجا که هر خطای خاص می‌تواند یک رشته پیام‌های هشدار ایجاد نماید، تعیین علت اولیه هشدارها و تحلیل و تشخیص صحیح برای اپراتور مشکل خواهد بود. در بسیاری از حالات تجربه اپراتور در موقعیت‌های مشابه مبنایی برای انجام عملیات ضروری جهت تصمیم‌گیری صحیح است و به عبارت دیگر کنترل یک وضعیت بحرانی بستگی به دو عامل دارد: قدرت اپراتور برای تحلیل و حل مسایل در موقعیت‌های فشار و استرس و دیگری تجربه و آموزش گذشته اپراتور. همان طور که ذکر شد تحلیل حجم زیاد داده‌ها برای اپراتور مشکل بوده و از طرفی افراد خبره و مجرب در همه زمان‌ها در محل حضور ندارند و در صورت حضور افراد مجرب

نیز میزان تجربه و مهارت افراد یکسان نمی‌باشد. مسایل مطرح‌شده تحت شرایط اضطراری می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری غلط و صدمات جبران‌ناپذیر گردد.

از سوی دیگر در سیستم‌های خودکار تشخیص عیب نیز با توجه به جنبه‌های مختلف یک ژنراتور، تعداد زیادی سنسور و لوازم اندازه‌گیری در سیستم مانیتورینگ جای داده شده تا وضعیت تجهیز را به صورت دقیق و کامل در تک‌تک اجزای آن مانیتور کند. لذا حجم زیادی از داده‌ها و مقادیر برای پردازش وجود دارد که باید با هم و در کنار یکدیگر جمع شده

چکیده: وقوع خطا و خروج ناگهانی ژنراتورها از مدار می‌تواند خسارات مالی سختی در پی داشته باشد، بدین سبب روش‌های مختلف ارزیابی وضعیت ژنراتورها گسترش یافته‌اند. قصد این مقاله گردآوری اطلاعات مهم ژنراتور و انجام یک تحلیل جامع توسط روش تحلیل سلسله‌مراتبی است. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یک روش تحلیل چندمعیاری است که برای ترکیب نتایج روش‌های تشخیصی به هنگام و تشخیص محتمل‌ترین عیب و قسمت معیوب ژنراتور به کار رفته است. در این راستا چندین جدول مقایسه‌ای تشکیل شده و نهایتاً این روند منجر به آشکارسازی محتمل‌ترین عیب ژنراتور در حال کار خواهد شد. در این مقاله چگونگی طراحی و پیاده‌سازی ساختار تشخیص عیب LEMS به همراه نتایج شبیه‌سازی دو ساختار نمونه‌ای مورد بحث قرار گرفته است.

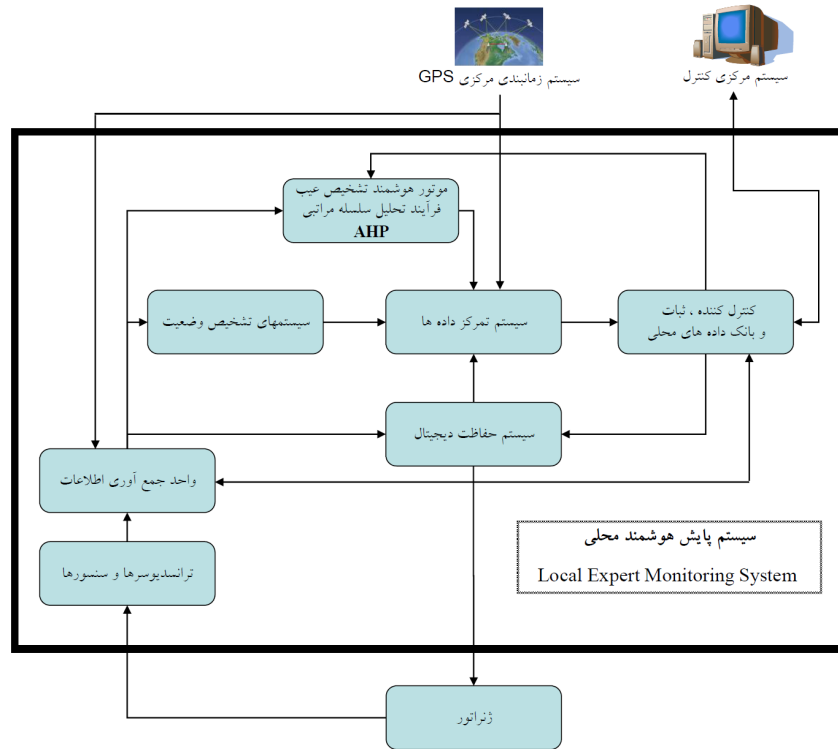
کلیدواژه: تحلیل سلسله‌مراتبی، تشخیص عیب، ژنراتور.

۱- مقدمه

ژنراتورها از جمله مهم‌ترین و باارزش‌ترین تجهیزات سیستم‌های قدرت و نیروگاه‌ها می‌باشند و به هنگام کار تحت تأثیر تنش‌های مختلفی شامل تنش‌های حرارتی، الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی، محیطی و تنش‌های ناشی از شبکه قدرت قرار دارند. با گذشت زمان این عوامل باعث تنزل کیفی قسمت‌های گوناگون ژنراتور می‌شوند به طوری که استقامت و خواص ابتدایی خود را از دست می‌دهند و اصطلاحاً پیر می‌شوند. تنزل کیفی یک ژنراتور تا یک حد معین می‌تواند باعث بروز عیب‌های پیش‌بینی نشده و خروج ناگهانی از مدار شود. این امر به کاهش بهره‌وری و کاهش قابلیت اعتماد سیستم منجر شده و علاوه بر آن هزینه‌های بسیاری را نیز موجب می‌شود. با توجه به نکات فوق و با مد نظر قرار دادن نقش کلیدی ژنراتورها در صنعت برق، اهمیت سیستم‌های تشخیص وضعیت و تصمیم‌گیری خبره ژنراتورها، برای تشخیص عیب، تخمین عمر باقی‌مانده، برنامه‌ریزی فنی و اقتصادی و رفع به موقع عیوب آنها دوچندان می‌شود. عیوب ژنراتور علاوه بر زبانی که به خود ژنراتور وارد می‌کند، باعث وقفه در تولید انرژی الکتریکی و احیاناً عدم جواب‌گویی به بار نیز می‌گردد و در صورتی که این گونه خطاها به موقع تشخیص داده نشوند، گسترش یافته و در این صورت ترمیم و تعمیر محل عیب‌دیده ممکن است مدت‌ها به طول انجامد و بهره‌برداری از ژنراتور برای مدت زیادی متوقف گردد. هزینه تعمیرات قسمت‌های مختلف ژنراتور در طول عمر مفید آن و هزینه‌های مرتبط با خارج از مدار بودن در اثر بروز خطاهای گسترش‌یافته قابل پیشگیری، به مراتب بیشتر از هزینه تجهیزات مورد نیاز جهت پیاده‌سازی دستگاه‌های تشخیص وضعیت و سیستم‌های خبره تصمیم‌گیری می‌باشد. به همین دلیل سیستم‌های تشخیص وضعیت

این مقاله در تاریخ ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۲۲ فروردین ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

محمد زارع ارنانی، گروه پژوهشی برق قدرت، جهاد دانشگاهی صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، (email: zarepost@chmail.ir).
اصغر اکبری ازیرانی، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، (email: akbari@kntu.ac.ir).



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم پایش هوشمند محلی ژنراتور LEMS.

۲- فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

AHP یک روش تصمیم‌گیری است که توسط آن می‌توان تصمیماتی که وابسته به معیارهای مختلف و یا تصمیمات چندمعیاره است را اتخاذ نمود. به صورت دقیق‌تر می‌توان گفت که توسط AHP، مسئله مورد نظر جهت تصمیم‌گیری، ابتدا ساختار داده شده و سپس گزینه‌های مختلف موجود بر اساس معیارهای مطرح در تصمیم‌گیری با هم مقایسه و اولویت انتخاب هر یک از آنها معلوم می‌شود. در صورتی که بخواهیم از روش AHP برای تصمیم‌گیری استفاده کنیم باید مراحل زیر طی شوند که برای اجتناب از طولانی‌شدن مقاله، شرح مراحل به مراجع احاله داده می‌شود [۱۰] و [۱۱]:

- ۱) توسعه درخت تصمیم
- ۲) مقایسه معیارهای تصمیم‌گیری با هم
- ۳) استخراج وزن‌های نسبی از جدول مقایسه‌ای
- ۴) مقایسه گزینه‌ها با هم نسبت به هر فاکتور
- ۵) نتیجه‌گیری

۳- ساختار LEMS

همان‌طور که در شکل ۱ آمده است سیستم مانیتورینگ هوشمند محلی مجموعه‌ای است شامل دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز ژنراتور جهت حفاظت و مانیتورینگ، سیستم جمع‌آوری اطلاعات، سیستم‌های مانیتورینگ و تشخیص وضعیت و تشخیص خطا، موتور هوشمند تشخیص عیب AHP، سیستم تمرکز داده‌ها، سیستم حفاظت دیجیتال و کنترل‌کننده، ثبات و بانک داده‌های محلی.

نحوه فعالیت سیستم هوشمند مانیتورینگ محلی به این شرح است که ابتدا بر حسب نیازهای توابع حفاظتی و نظارتی سیستم LEMS پارامترهای مورد نیاز جهت اندازه‌گیری مشخص می‌شوند و تجهیزات لازم برای اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای مشخص‌شده به ژنراتور متصل

و تحلیل شوند. پیچیدگی و ارتباطات کمی و کیفی این اطلاعات با یکدیگر باعث می‌شود که گاهی نتایج مبهم و متناقضی در مورد وضعیت تجهیز و شرایط عیب آن به دست بیاید و عملاً تصمیم‌گیری بر اساس آن نتایج غیر ممکن یا غیر قابل اطمینان می‌باشد.

برای حل این مسئله و تصمیم‌گیری قابل اطمینان، می‌توان از تکنیک‌هایی مانند شبکه عصبی، سیستم‌های فازی و مدل‌های ریاضی استفاده کرد. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^۱ (AHP) مسایل پیچیده را به ساختاری از سلسله‌مراتب‌ها تجزیه می‌کند و قادر است دلایل و استدلال‌های متخصصین مجرب را در چهارچوبی منطقی، طبقه‌بندی نماید. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی با تعریف معیارهای مختلف و وزن‌دهی به متغیرهای مشخص‌شده به حل مسایل می‌پردازد [۲] تا [۵].

در [۶] به کمک تحلیل سلسله‌مراتبی یک مدل تشخیصی هوشمند برای کلیدهای فشار قوی پیشنهاد شده است. مشخصه‌های الکتریکی، مکانیکی و عایقی به عنوان معیارهای اصلی در نظر گرفته شده‌اند. وزن معیارها با نظرات متخصصین و فیدبک‌های موجود تولید شده و ارزیابی نهایی صورت پذیرفته است. مرجع [۷] پایداری شبکه برق ایران را مورد ارزیابی قرار داده و به کمک روش تحلیل سلسله‌مراتبی یک خط مشی بهینه برای سیستم تولید توان پیشنهاد داده است. مرجع [۸] هندسه بهینه سیم‌پیچی ترانسفورماتور را به کمک تحلیل سلسله‌مراتبی از بین ۹ آرایش مختلف استخراج نموده است. مرجع [۹] بر اساس تاریخچه بهره‌برداری ترانسفورماتور و اندازه‌گیری به هنگام، ۲۵ زیرمعیار تعریف کرده و به کمک تحلیل سلسله‌مراتبی وضعیت لحظه‌ای ترانسفورماتور را تشخیص می‌دهد.

در ادامه با اشاره کوتاه به فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، ساز و کار طرح پیشنهادی سیستم پایش محلی هوشمند^۲ (LEMS) و دو ساختار تشخیص عیب ژنراتور، توضیح داده می‌شود.

1. Analytical Hierarchy Process
2. Local Expert Monitoring System

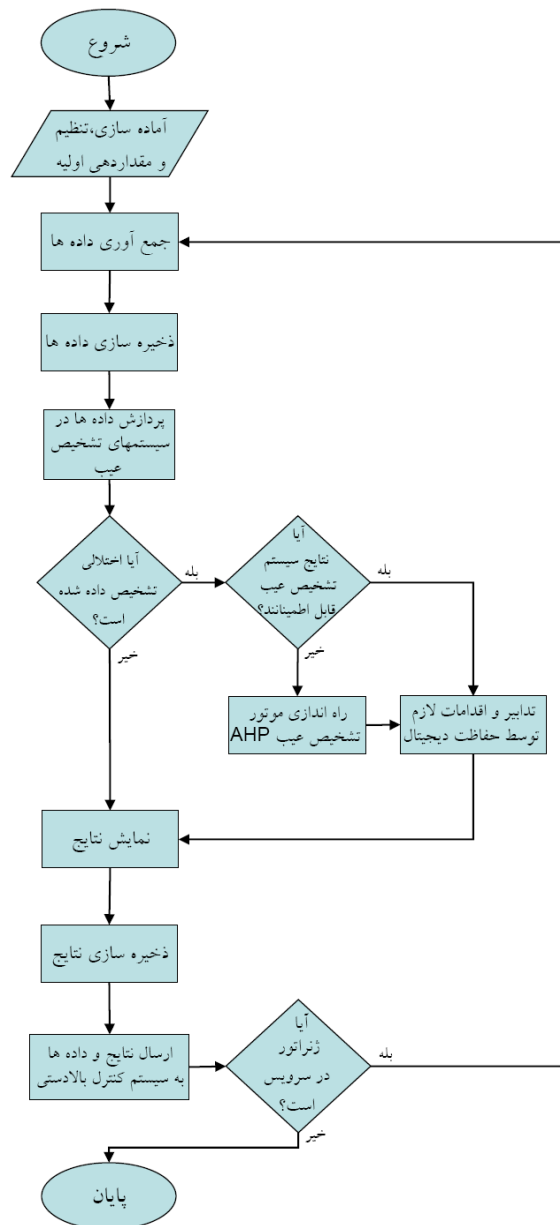
خطا عملیات لازم جهت حفاظت از ژنراتور و جلوگیری از گسترش حادثه را انجام می‌دهد. هنگام وقوع شرایط غیر عادی، سیستم حفاظت دیجیتال در کنار عملیات حفاظت و جلوگیری از گسترش حادثه، مقادیر پارامترهایی را که بر اساس پردازش آنها عمل کرده، نوع خطای به وجود آمده و نوع عملیات انجام شده را از طریق واحد تمرکز داده‌ها به کنترل کننده سیستم LEMS ارسال می‌کند تا در روند کاری ژنراتور ثبت و ذخیره شود.

واحد تمرکز داده‌ها در LEMS وظیفه جمع‌آوری و آماده‌سازی مقادیر پارامترهای مختلف ژنراتور، جهت ثبت و ذخیره‌سازی در واحد واقعه‌نگاری LEMS را بر عهده دارد. در کنار سیستم حفاظت دیجیتال که فعال است، سیستم چندعاملی مانیتورینگ و تشخیص وضعیت نیز اطلاعات مورد نیاز خود را از واحد جمع‌آوری داده‌ها دریافت کرده و شرایط ژنراتور را مانیتور می‌کند. سیستم مانیتورینگ و تشخیص وضعیت توسط الگوریتم‌های مختلف تعبیه شده در آن مانند تحلیل و مقایسه الگوها، شبکه عصبی، سیستم فازی و غیره، اطلاعات ورودی را تحلیل و پردازش می‌کند و نهایتاً نتایج به دست آمده در مورد عیوب و اشکالات قسمت‌های مختلف سیستم مانیتورینگ و تشخیص وضعیت و نتایج حاصل از آنها از طریق واحد تمرکز داده‌ها دارای برچسب زمانی شده و به واقعه‌نگار سیستم LEMS ارسال می‌شوند. در شرایط نرمال و متعادل بودن نتایج روند فعالیت و پایش سیستم LEMS ادامه می‌یابد و در صورت تشخیص شرایط غیر عادی و وجود عیب، بسته به نوع عیب، میزان پیشرفت عیب و انحراف پارامترها از مقادیر متعادل، فرمان اجرای عملیات لازم از جمله هشدار و اختطار، افزایش حساسیت تابع یا توابع حفاظتی متناظر در سیستم حفاظت دیجیتال (به عنوان مثال با کاهش فواصل بازه‌ای از مقادیر استاندارد، حساسیت افزایش می‌یابد) یا عملیات قطع و تریپ، توسط سیستم LEMS صادر می‌شود [۱۲].

اغلب اتفاق می‌افتد که سیستم‌های مانیتورینگ و تشخیص وضعیت، نتایج و پاسخ‌های گوناگون، مبهم و متناقضی استخراج می‌نمایند که دارای ضریب اطمینان خیلی کمی هستند و تصمیم‌گیری در مورد وضعیت ژنراتور را مشکل می‌کنند. در این زمان است که کنترل کننده سیستم LEMS، موتور هوشمند تشخیص عیب AHP را فعال نموده و موتور هوشمند AHP بر اساس معیارها، اولویت‌ها، روابط کمی و کیفی بین مقادیر پارامترهای پایش شده و الگوریتم تعریف شده برای آن، اقدام به تشخیص عیب می‌نماید. روندنمای عملیاتی LEMS به شکل ۲ قابل ارائه می‌باشد.

پس از آن که پردازش و تحلیل موتور هوشمند AHP انجام شد و پاسخ آن مشخص گردید مقادیر ورودی به موتور هوشمند AHP و پاسخ‌های متناظر آن مقادیر به واحد تمرکز اطلاعات ارسال می‌شوند و پس از آن که دارای برچسب زمانی شدند به قسمت کنترل کننده و ثبات LEMS منتقل می‌گردند. سپس بر اساس نتایج به دست آمده، کنترل کننده LEMS فرمان‌های مناسب جهت اجرای عملیات لازم را به واحد حفاظت دیجیتال می‌دهد.

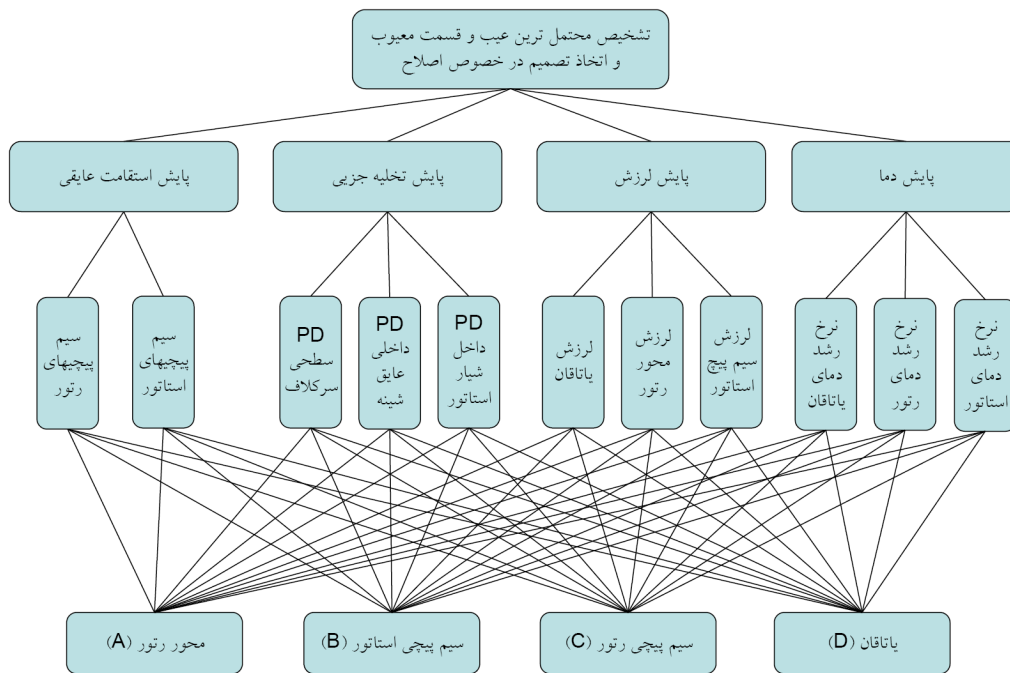
مزیت LEMS این است که وقتی بخش‌های تحلیل و آنالیز هر پارامتر پایش‌شونده به نتیجه‌ای با ضریب اطمینان کافی دست پیدا نمی‌کنند، موتور هوشمند AHP در LEMS با بهره‌گیری از روابط تجربی و تئوری بین پارامترهای مانیتور شونده که توسط متخصصین و اپراتورهای مجرب در الگوریتم موتور AHP گنجانده شده و همین طور شواهد به دست آمده از سیستم‌های پایش با کنار هم قرار دادن تمامی علل و عوامل و روابط بین آنها اقدام به عیب‌یابی می‌نماید.



شکل ۲: روندنمای سیستم LEMS.

می‌گردند. در مرحله بعد مقادیر اندازه‌گیری شده به قسمت جمع‌آوری اطلاعات^۱ فرستاده می‌شوند و پس از دریافت برچسب زمانی از ساعت سنکرون کننده سیستم موقعیت‌یاب جهانی پردازش‌های اولیه مورد نیاز مانند تبدیلات آنالوگ به دیجیتال، تبدیلات فوری، تبدیل ویولت، تجزیه و ترکیب سیگنال‌ها و استخراج هارمونیک‌ها بر حسب نیاز انجام می‌شود. واحد جمع‌آوری اطلاعات از یک مالتی‌پلکسر، مبدل آنالوگ به دیجیتال و پردازنده تشکیل شده است. پردازنده وظایف مختلفی همچون انتخاب کانال‌های مالتی‌پلکسر و کنترل چگونگی عملیات نمونه‌برداری و محاسبات را بر عهده دارد.

در قدم بعد اطلاعات به دست آمده در واحد جمع‌آوری داده‌ها بر حسب نیاز هر یک از سیستم‌های حفاظت دیجیتال، سیستم مانیتورینگ و تشخیص وضعیت چندعاملی و موتور تشخیص عیب AHP، به آنها منتقل می‌شود. سیستم حفاظت دیجیتال موجود در LEMS به صورت استاندارد مقادیر پارامترهای ورودی را پردازش می‌کند و در صورت وقوع حادثه یا



شکل ۳: ساختار سلسله‌مراتبی تشخیص عیب ژنراتور.

۴- پیاده‌سازی موتور تشخیص عیب AHP

است، چرا که بسته به نوع این روش‌ها و مواد به کار رفته، روش‌های مانیتورینگ دارای پاسخ‌های گوناگونی هستند که باید به طور منظم و دقیق بر اساس فاکتورهای مورد نیاز طبقه‌بندی شوند. موتور هوشمند تشخیص عیب AHP الگوریتم پیشرفته‌ای است که تمام نکات مربوط به ژنراتور مانند ساختار، نوع تکنولوژی ساخت، نوع مواد به کار رفته، شرایط و پارامترهای محیطی که ژنراتور در آن نصب شده و فعالیت می‌کند و پارامترهای مختلف روش‌های مانیتورینگ و تست ژنراتور، نظیر تخلیه جزئی و اقسام آن، لرزش، دمانگاری و نقاط داغ، مقاومت عایقی، آشکارسازهای ازن، فشار و حجم ماده خنک‌کننده، ولتاژ و جریان شفت، حرارت و جریان روغن در یاتاقان‌ها و سایر موارد آشکارساز با جزئیاتشان به همراه روابط کیفی و کمی آنها با هم و ارتباط هر یک با روند بروز عیب در اجزای ژنراتور، در آن لحاظ خواهد شد. لذا برای طراحی یک موتور هوشمند AHP که جامع و کامل باشد به چندین گروه چند ده نفره متشکل از متخصصین طراح ژنراتور، مهندسین پروسه ساخت، مهندسین بهره‌بردار، مهندسین سیستم‌های قدرت، مهندسین حفاظت، متخصصین در هر یک از شاخه‌های مانیتورینگ و روش‌های تشخیص عیب ژنراتور و اپراتورها و تعمیرکاران نیازمند می‌باشیم.

برای پیاده‌سازی AHP در جهت تشخیص عیب ژنراتور اولین قدم مشخص ساختن معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها می‌باشد. معیارها می‌توانند شامل روش‌های مختلف مانیتورینگ ژنراتور و پارامترهایشان باشند، نظیر پایش دما، پایش تخلیه جزئی، پایش لرزش و ... زیرمعیارها شامل اجزا و بخش‌های هر یک از روش‌های مانیتورینگ و علل و عوامل مرتبط با آنها می‌باشد. متغیرها یا همان گزینه‌ها شامل قطعات و اجزای مختلف ساختمان ژنراتور هستند که ممکن است دچار خطا و عیب شده باشند. هر یک از روش‌های تشخیص عیب و پایش به همراه جزئیات و قسمت‌های مختلفشان به شکل‌گیری ساختار سلسله‌مراتبی کمک می‌کند. در شکل ۳

یک ساختار نمونه برای تشخیص عیب ژنراتور نشان داده شده است.

ساختار سلسله‌مراتبی AHP برای ژنراتور هیچ الگو و استاندارد خاصی نداشته و فقط تابع نظرات گروه طراح و پیاده‌ساز می‌باشد و به انواع صور ممکن قابل پیاده‌سازی می‌باشد.

ژنراتورها از جمله اجزای بالارزش شبکه قدرت می‌باشند و بنابراین تشخیص وضعیت، پیش‌بینی و جلوگیری از خطاهای گسترده و حوادث نامطلوب در رابطه با ژنراتور دارای اهمیت بسیاری است. در حال حاضر تنها راه تقریباً قابل اطمینان برای تشخیص وضعیت ژنراتورها و سایر تجهیزات ایجاد گروه‌هایی متشکل از افراد مختلف با تخصص‌های گوناگون مرتبط با تجهیز مورد نظر می‌باشد که با استفاده از داده‌های تجهیزات مانیتورینگ، هر یک جداگانه برآوردهای خود را انجام می‌دهند و سپس در جلسات گروهی با بحث و تبادل نظر به یک نتیجه نهایی می‌رسند. با توجه به آن که فاکتور زمان و پیش‌بینی قابل اطمینان زودهنگام و انجام اقدامات پیشگیرانه به موقع، در نگهداری و فعالیت ژنراتور و سایر تجهیزات تأثیر بسیار زیادی دارد، یکی از اشکالات اساسی طرح فوق، به هنگام نبودن تصمیمات و اقدامات می‌باشد که این خود مانع بزرگی در کارایی سیستم مانیتورینگ و تشخیص عیب است. از طرفی با روند بازنشستگی افراد با تجربه و خیره و فشارهای اقتصادی مبنی بر تعدیل نیروهای کاری صنعت به سمتی حرکت می‌کند که در حال از دست دادن دانش و مخصوصاً تجربه چندین دهه متخصصین می‌باشد. بر این اساس کاربرد الگوریتم‌هایی همچون موتور قدرتمند تصمیم‌گیری AHP، در جهت افزایش کارایی سیستم‌های تشخیص عیب، کاهش زمان حصول نتیجه و انجام اقدامات سریع، جمع‌آوری و نگهداری تجربیات چند ده ساله اپراتورها و متخصصین و آموزش و کمک به مهندسین جوان و تازه‌کار، اهمیت خود را هرچه بیشتر نشان می‌دهد. پیاده‌سازی AHP در روند تشخیص وضعیت تجهیزات قدرت در ابتدای راه بوده و نیاز به انجام آزمایشات وسیع و گسترده توسط گروه‌های مرکب از تمامی تخصص‌ها دارد.

پیاده‌سازی موتور هوشمند تشخیص عیب در جزئیات، برای ژنراتورهای مختلف، با روش‌های ساخت، عایق‌ها و مواد به کار رفته گوناگون متفاوت

جدول ۱: ماتریس شماره ۱.

	پیش استقامت عایقی	پیش تخلیه جزئی	پیش لرزش	پیش دما
پیش استقامت عایقی	۱	a	b	c
پیش تخلیه جزئی	$1/a$	۱	d	e
پیش لرزش	$1/b$	$1/d$	۱	f
پیش دما	$1/c$	$1/e$	$1/f$	۱

جدول ۲: ماتریس شماره ۲.

معیار	پیش استقامت عایقی	پیش تخلیه جزئی	پیش لرزش	پیش دما
وزن	W_1	W_2	W_3	W_4

جدول ۳: ماتریس شماره ۳.

	نرخ رشد دمای استاتور	نرخ رشد دمای رتور	نرخ رشد دمای یاتاقان
نرخ رشد دمای استاتور	۱	a	b
نرخ رشد دمای رتور	$1/a$	۱	c
نرخ رشد دمای یاتاقان	$1/b$	$1/c$	۱

جدول ۴: ماتریس شماره ۴.

	نرخ رشد دمای استاتور	نرخ رشد دمای رتور	نرخ رشد دمای یاتاقان
بر حسب پیش دما	W_5	W_6	W_7
وزن			

جدول ۵: ماتریس شماره ۵.

یاتاقان	سیم‌پیچی رتور	سیم‌پیچی استاتور	محور رتور	مقایسه بر حسب استقامت عایقی سیم‌پیچ استاتور
m	L	k	۱	محور رتور
O	n	۱	$1/k$	سیم‌پیچی استاتور
p	۱	$1/n$	$1/L$	سیم‌پیچی رتور
۱	$1/p$	$1/O$	$1/m$	یاتاقان

در مرحله بعد باید ماتریس‌های مقایسه زوجی زیرمعیارها را نسبت به تک‌تک معیارهای سطح اول محاسبه نماییم.

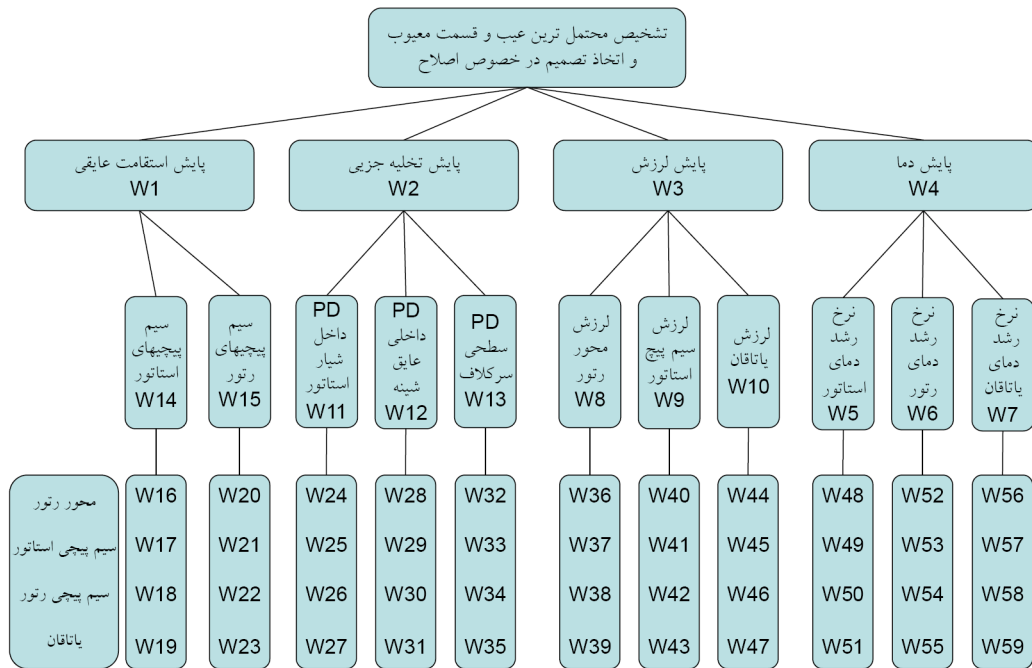
مشابه جدول ۳، ۳ ماتریس دیگر نیز باید برای زیرمعیارهای هر یک از معیارهای اصلی پیش لرزش، تخلیه جزئی و استقامت عایقی تشکیل شود. ماتریس‌های فوق بر اساس اندازه‌گیری‌های لحظه به لحظه سیستم مانی‌تورینگ شکل می‌گیرند و بر حسب دوره زمانی اندازه‌گیری مجدد پارامترهای مانی‌تورینگ، تغییر می‌کنند. به عبارت دیگر مقادیر اندازه‌گیری شده توسط تجهیزات مانی‌تورینگ سیستم LEMS در این قسمت از الگوریتم AHP، وارد شده و بر روند تصمیم‌گیری AHP اعمال نفوذ می‌نمایند. بدیهی است که ماتریس‌های فوق برای هر ژنراتور متفاوت بوده و حتی برای یک ژنراتور معین نیز به واسطه تکرار اندازه‌گیری‌ها، دایم در حال تغییر می‌باشند. در ازای هر ماتریس فوق یک ماتریس سطری یا ستونی وزن نیز به دست می‌آید که برای محاسبه وزن نهایی گزینه‌ها استفاده می‌شود. ماتریس شماره ۴، وزن‌های محاسبه شده‌ی نظیر ماتریس شماره ۳ می‌باشد که در جدول ۴ نمایش داده شده است.

در مرحله بعد ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌ها یا اجزای ژنراتور که احتمال نقصان دارند نسبت به زیرمعیارها استخراج می‌گردد.

مشابه جدول ۵، ۱۰ ماتریس دیگر برای هر یک از زیرمعیارها باید تشکیل گردد. از ماتریس فوق یک ماتریس سطری که وزن هر یک از گزینه‌ها را نسبت به زیرمعیارها معین می‌کند، حاصل می‌شود. ماتریس شماره ۶، وزن‌های محاسبه شده‌ی نظیر ماتریس شماره ۵ می‌باشد که در جدول ۶ نمایش داده شده است.

بعد از طراحی ساختار سلسله‌مراتبی نوبت به مقایسه زوج‌زوج معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها نسبت به سطوح بالایشان از لحاظ ارجحیت و اولویت می‌رسد. این مرحله که مهم‌ترین قسمت است با استفاده از گزارشات حوادث، گزارش‌های تعمیر و نگهداری، آمار و اطلاعات حاصل از خطاها و عیوب ژنراتورهای مختلف، تکنولوژی و نحوه ساخت، انواع مواد به کار رفته، محیط نصب ژنراتور، تجربه افراد باسابقه و توسط متخصصین خبره و مجرب تکمیل می‌شود. در این قسمت معیارهای سطح اول که همان روش‌های مانی‌تورینگ هستند به صورت زوج‌زوج نسبت به هدف که تشخیص عیب می‌باشد اولویت‌بندی می‌شوند و به عبارت دیگر اهمیت هر یک از روش‌ها نسبت به بقیه روش‌ها برای رسیدن به تشخیص عیب معین می‌شود.

a ، b و ... و f اولویت‌های تخصیص داده شده در قسمت مقایسه معیارها هستند. جدول ۱ از بحث‌ها و تبادل نظر متخصصین ماهر در مانی‌تورینگ و تشخیص عیب به دست می‌آید و تنها مختص به یک مورد خاص نیست و در سایر الگوریتم‌های تشخیص عیب توسط AHP قابل استفاده است. این بخش از ساختار AHP، یک مدل کلی و عمومی است و برای استفاده در عیب‌یابی سایر ژنراتورهای مشابه توسط هوشمند AHP، ثابت باقی می‌ماند. با استفاده از جدول ۱ برای هر یک از معیارهای سطح اول یک وزن محاسبه می‌شود. ماتریس شماره ۲، وزن‌های محاسبه شده برای معیارهای سطح اول (معیارهای اصلی) می‌باشد که در جدول ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۴: وزن‌های محاسبه شده.

جدول ۶: ماتریس شماره ۶

یاتاقان	سیم پیچی رتور	سیم پیچی استاتور	محور رتور	وزن بر حسب استقامت عایقی سیم پیچ استاتور
W_{11}	W_{18}	W_{17}	W_{16}	وزن

یاتاقان‌ها، طراحی و پیاده‌سازی نمود. برای پیاده‌سازی موتور هوشمند AHP در ساختار LEMS، مشکلاتی موجود است که برای فعالیت به هنگام و خودکار موتور هوشمند باید برطرف شوند. بر اساس توضیحات ذکر شده در قسمت پیاده‌سازی AHP، جدول ۱ و ماتریس‌های گروه شماره پنج که در مورد روند عیب‌یابی و روابط علت و معلولی بین انواع عیوب، روش‌های پایش و قطعات آسیب‌دیده می‌باشند، به صورت یک قاعده کلی برای سایر ژنراتورهای مشابه قابل تعمیم و استفاده است. مسئله در چگونگی استخراج ماتریس‌های گروه شماره ۳ می‌باشد. برای استخراج اتوماتیک این ماتریس‌ها در راستای عملیات هوشمند و خودکار تشخیص عیب توسط موتور AHP اقدامات و راه‌حلهایی پیشنهاد می‌شود. جهت دستیابی به این هدف می‌توان ایده زیر را مطرح و پیاده‌سازی نمود:

برای مقایسه زوج‌زوج پارامترها نیازمند آن هستیم که یک مرجع ثابت برای تعیین ارجحیت هر مقدار و پارامتر اندازه‌گیری شده تعریف کنیم. با یک سیستم مدل‌سازی عددی می‌توان پیاده‌سازی خودکار را محقق ساخت. بدین منظور ابتدا لازم است بر اساس داده‌های آماری و سوابق موجود از وضعیت‌های مختلف ژنراتور و در صورت امکان انجام تست‌ها و آزمایشاتی روی اجزای ژنراتورها و قراردادن آنها در وضعیت‌های مختلف کیفی نظیر خیلی خوب، خوب، متوسط، بد و بحرانی (بر پایه تجارب متخصصین و اپراتورها) و انجام اندازه‌گیری‌های پارامترهای مختلف مانیتورینگ، بر حسب هر یک از مقادیر به دست آمده در هر یک از وضعیت‌های خیلی خوب، خوب، متوسط، بد و بحرانی، اولاً حداقل و حداکثر مقادیر اندازه‌گیری شده معین شوند، ثانیاً بسته به حالت ژنراتور، مقادیر به دست آمده درجه‌بندی شوند و در قالب سیستم مدل‌سازی عددی، مشابه آنچه در شکل شماره ۵ نشان داده شده است، در بازه‌های اعداد صحیح ۱ تا ۹ مقادیر متناسب به آنها اختصاص پیدا کند (به عبارت دیگر

همانند جدول ۱، ماتریس‌های گروه ۵ نیز حاصل جلسات گروهی متخصصین حوزه مانیتورینگ و تشخیص عیب بوده و تنها مختص به یک مورد خاص نمی‌باشد. این بخش از ساختار AHP نیز یک مدل عمومی و قابل استفاده در مورد سایر ژنراتورهای مشابه در ساختارهای AHP تشخیص عیب می‌باشد چرا که رابطه علت و معلولی را در مورد روند نقصان اجزای گوناگون ساختمان ژنراتور بر اثر عوامل مختلف استخراج کرده و می‌تواند به عنوان یک قانون مورد استفاده قرار گیرد. با مشخص شدن وزن نسبی هر یک از عناصر ساختار سلسله‌مراتبی تشخیص عیب ژنراتور، در مرحله آخر باید وزن نهایی تک‌تک متغیرها (گزینه‌ها یا اجزای ساختمان ژنراتور) را به دست آورد که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. برای مثال در اینجا وزن نهایی گزینه محور رتور (W_A) محاسبه شده است

$$W_A = (W_1 \times W_{16} \times W_{17}) + (W_1 \times W_{15} \times W_{18}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{18}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{18}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{18}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{19}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{19}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{19}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{20}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{20}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{20}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{21}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{21}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{21}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{22}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{22}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{22}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{23}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{23}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{23}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{24}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{24}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{24}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{25}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{25}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{25}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{26}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{26}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{26}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{27}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{27}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{27}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{28}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{28}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{28}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{29}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{29}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{29}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{30}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{30}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{30}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{31}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{31}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{31}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{32}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{32}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{32}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{33}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{33}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{33}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{34}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{34}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{34}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{35}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{35}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{35}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{36}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{36}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{36}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{37}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{37}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{37}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{38}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{38}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{38}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{39}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{39}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{39}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{40}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{40}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{40}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{41}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{41}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{41}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{42}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{42}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{42}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{43}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{43}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{43}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{44}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{44}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{44}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{45}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{45}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{45}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{46}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{46}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{46}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{47}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{47}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{47}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{48}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{48}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{48}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{49}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{49}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{49}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{50}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{50}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{50}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{51}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{51}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{51}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{52}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{52}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{52}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{53}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{53}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{53}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{54}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{54}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{54}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{55}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{55}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{55}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{56}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{56}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{56}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{57}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{57}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{57}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{58}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{58}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{58}) + (W_7 \times W_{11} \times W_{59}) + (W_7 \times W_{12} \times W_{59}) + (W_7 \times W_{13} \times W_{59})$$

به دلیل پیچیدگی و جزئیات زیاد رفتاری ژنراتور در هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده آن مثل سیم‌پیچی‌های استاتور، سیم‌پیچی‌های رتور، یاتاقان‌ها، سیستم خنک‌کننده و سایر قسمت‌ها و همین‌طور تعداد زیاد پارامترها، می‌توان برای هر یک از قسمت‌های ساختمانی ژنراتور یک موتور هوشمند تشخیص عیب AHP به صورت مجزا طراحی کرد.

به‌طور مثال بر اساس آمار فعلی، بیشترین خرابی اجزای ژنراتورها در ایران در سیم‌پیچی‌های استاتور و یاتاقان‌های ژنراتور وجود دارد. بر این اساس می‌توان دو موتور هوشمند تشخیص عیب AHP برای تشخیص عیب در زیرمجموعه‌های ساختمانی هر یک از سیم‌پیچی‌های استاتور و

۲) اگر تمام پارامترهای پایش‌شده، عدد ۱ را نمایش دهند باز وزن‌ها یکسان شده و نتیجه‌ای نخواهیم داشت؟
پاسخ اینجاست که هنگامی که ژنراتور در وضعیت سالم کار می‌کند و تمامی سنسورها خبر از سلامت و وضعیت نرمال می‌دهند و هیچ هشدار و اختطاری از جانب سیستم چندعاملی مانیتورینگ صادر نشده، این نتیجه AHP تأییدکننده وضعیت نرمال ژنراتور خواهد بود.

۳) اگر تمام پارامترهای اندازه‌گیری شده در پایش ژنراتور نشان‌دهنده یک مقدار یکسان مثلاً ۵ باشند باز هم وزن‌ها یکسان شده و نتیجه‌ای نخواهیم داشت؟

پاسخ این است که در عمل، چنین پیشامدی احتمال وقوع خیلی ناچیزی دارد و به عبارت دیگر واقع‌شدنی نیست زیرا رفتار فاکتورهای مختلف در ژنراتور نسبت به هم کاملاً غیر خطی بوده و این که همه عیوب و نقص‌ها با هم و با یک سرعت یکسان پیشرفت کنند، عملاً غیر ممکن است.

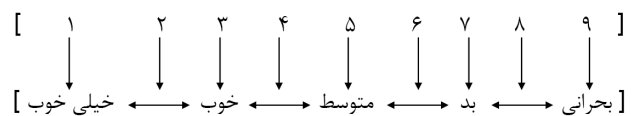
همان‌طور که ملاحظه می‌شود ارتباط مکملی سیستم‌های مانیتورینگ و تشخیص عیب و موتور هوشمند AHP در سیستم LEMS باعث افزایش قابلیت اطمینان خروجی و تصمیمات و اقدامات نهایی LEMS می‌شود.

۵- شبیه‌سازی و مطالعه موردی

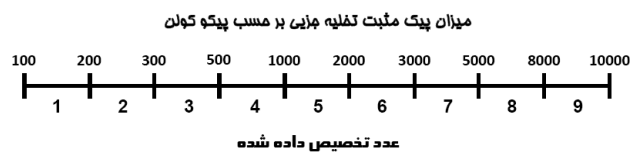
از نرم‌افزار Expert Choice برای پیاده‌سازی ساختار تشخیص عیب AHP استفاده شد. بدین منظور دو ساختار مذکور نشان داده شده در شکل‌های شماره ۷ و ۸، در نرم‌افزار طراحی شد و سپس بر اساس مطالعات گسترده کتب و مقالات منتشرشده، برخی گزارش‌های موجود و مشورت‌های انجام‌گرفته، ماتریس‌های اولویت مربوط تعریف شدند. اولویت‌های به کار رفته طی تجربیات کاربردی می‌توانند بهینه گردند. شبیه‌سازی‌های ساختار تشخیص عیب سلسله‌مراتبی ژنراتور، با فرض ثابت‌بودن شرایطی نظیر رطوبت، فشار هوا، ضریب توان، بار و ولتاژ ژنراتور انجام شده است.

کلید حل مسایل در ساختار سلسله‌مراتبی، انجام مقایسات زوجی تک‌تک پارامترها نسبت به یکدیگر بر پایه اهداف سطح بالاتر می‌باشد. در ساختارهای ارائه‌شده در این مقاله دقیقاً ۴۰۵ مقایسه زوجی شکل گرفته است که نیازمند بررسی و مرور کاملی بر ساز و کارها، علل و عوامل تأثیرگذار و تأثیرپذیر و رفتار عیوب ژنراتور می‌باشد. نمونه‌ای از ماتریس‌های مقایسه در شکل ۹ نمایش داده شده است.

توضیح و تبیین چگونگی ۴۰۵ مقایسه انجام‌شده، خارج از حوصله بحث بوده و به ذکر چند نمونه اکتفا می‌شود. به عنوان مثال برای اولویت‌سنجی تأثیر دو معیار اصلی "پایش نرخ تغییرات تخلیه جزئی" و "پایش محصولات جانبی مکانیسم‌های عیب" نسبت به هدف، "پایش نرخ تغییرات تخلیه جزئی" نسبت به "پایش محصولات جانبی مکانیسم‌های عیب" با تأثیر "کاملاً مهم‌تر" در نظر گرفته شده و بر اساس الگوریتم AHP دارای اولویت ۹ می‌باشد. چرا که در حالت کلی مثلاً تراکم بالای ازن که از محصولات جانبی مکانیسم عیوب است، دلیلی قطعی بر قریب‌الوقوع بودن خطا نمی‌باشد، ولی سرعت زیاد افزایش تخلیه جزئی به طور قریب به یقین نشانگر خطایی قریب‌الوقوع است. قابل ذکر است که منظور از عیوب، آن دسته‌ای هستند که در طی یک دوره زمانی باعث ایجاد خطا می‌شوند. همین‌طور در مورد اولویت‌سنجی متغیرها نسبت به زیرمعیارها که نمونه‌ای از آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است، به عنوان



شکل ۵: چگونگی تناظر اعداد و کیفیت.



شکل ۶: نمونه‌ای از تناظرهای ایجادشده.

یک رابطه متناظر بین مقادیر اندازه‌گیری شده و اعداد بازه فوق ایجاد گردد. با مقداردهی به هر یک از مقادیر به دست آمده در بازه حداقل تا حداکثر هر پارامتر، مقایسه دو به دوی آنها به راحتی در قالب یک الگوریتم انجام خواهد شد. نمونه‌ای از تناظرهای ایجاد شده در شکل شماره ۶ نشان داده شده است. به طور مثال برای PD هرچه مقدار اندازه‌گیری شده به مقدار حداکثری PD در تست نزدیک‌تر باشد باید عدد بزرگ‌تری از بازه اعداد صحیح ۱ تا ۹ به آن اختصاص داد و در مورد استقامت عایق هرچه مقاومت اندازه‌گیری بیشتر باشد یعنی عایق در وضعیت سلامت بهتری قرار دارد و باید از بازه اعداد صحیح ۱ تا ۹ عدد کوچک‌تر و متناسبی به آن تخصیص پیدا کند.

بعد از مقداردهی نوبت به چگونگی انتخاب اولویت و اهمیت پارامترها در ماتریس مقایسه زوجی می‌رسد. با توجه به مدل‌سازی عددی شکل‌گرفته به صورت زیر می‌توان عملیات استحصال ماتریس مقایسه زوجی را طرح‌ریزی کرد:

در هر مقایسه زوجی اگر x و y طرفین مقایسه‌شونده باشند و P اولیوی باشد که x نسبت به y پیدا خواهد کرد، در مدل‌سازی عددی که اعداد بازه ۱ تا ۹ انتخاب می‌شوند، برای تخصیص اولویت داریم

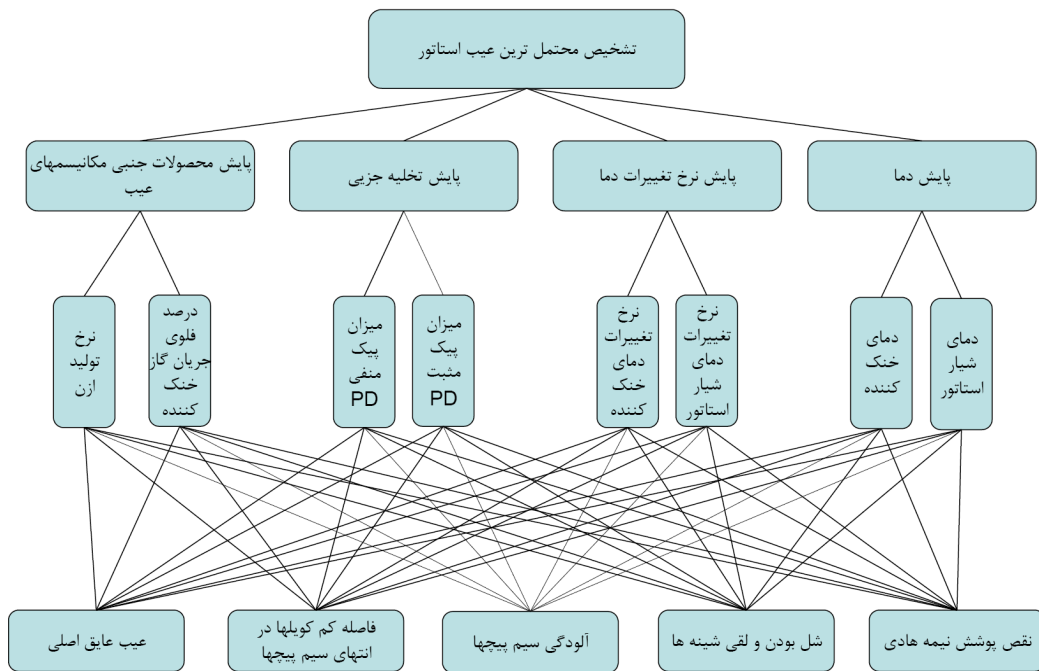
$$\begin{aligned} \text{if } x - y = 0 &\Rightarrow P = 1 \\ \text{if } x - y = 1 &\Rightarrow P = 2, \quad \text{if } x - y = -1 &\Rightarrow P = 1/2 \\ \text{if } x - y = 2 &\Rightarrow P = 3, \quad \text{if } x - y = -2 &\Rightarrow P = 1/3 \\ \text{if } x - y = 3 &\Rightarrow P = 4, \quad \text{if } x - y = -3 &\Rightarrow P = 1/4 \\ \text{if } x - y = 4 &\Rightarrow P = 5, \quad \text{if } x - y = -4 &\Rightarrow P = 1/5 \\ \text{if } x - y = 5 &\Rightarrow P = 6, \quad \text{if } x - y = -5 &\Rightarrow P = 1/6 \\ \text{if } x - y = 6 &\Rightarrow P = 7, \quad \text{if } x - y = -6 &\Rightarrow P = 1/7 \\ \text{if } x - y = 7 &\Rightarrow P = 8, \quad \text{if } x - y = -7 &\Rightarrow P = 1/8 \\ \text{if } x - y = 8 &\Rightarrow P = 9, \quad \text{if } x - y = -8 &\Rightarrow P = 1/9 \end{aligned} \quad (2)$$

بدین شکل ماتریس‌های گروه شماره ۳ بر اساس نتایج و مقادیر اندازه‌گیری شده تجهیزات پایش به صورت خودکار و هوشمند قابل استخراج می‌شوند.

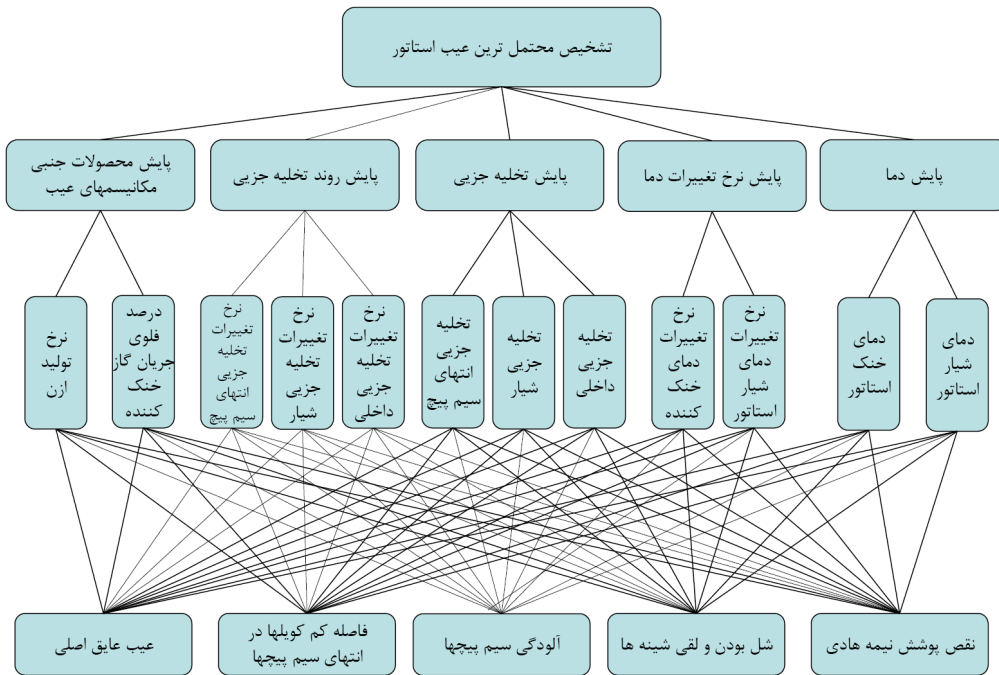
ممکن است سوالات و ابهاماتی در این زمینه پیش بیاید که:

۱) اگر تمام پارامترهای پایش، عدد ۹ را که بدترین حالت است نشان دادند آن وقت تمام وزن‌ها یکسان شده و نتایج تقریباً یکسانی به دست می‌آید، تکلیف در این مواقع چگونه است؟

پاسخ در این نکته نهفته است که در این حالت اوضاع ژنراتور به حدی بحرانی است که سیستم‌های تشخیص وضعیت و مانیتورینگ گنجانده‌شده در سیستم LEMS، قبل از آن که اطلاعات در موتور AHP شروع به پردازش شوند، دستورات لازم را با قطعیت صادر کرده و اصولاً کار به قضاوت موتور AHP نخواهد رسید.



شکل ۷: ساختار استراتژی اول مورد استفاده در شبیه سازی.



شکل ۸: ساختار استراتژی دوم مورد استفاده در شبیه سازی.

Expert Choice C:\Documents and Settings\ldr\Desktop\simulation 1.ahp

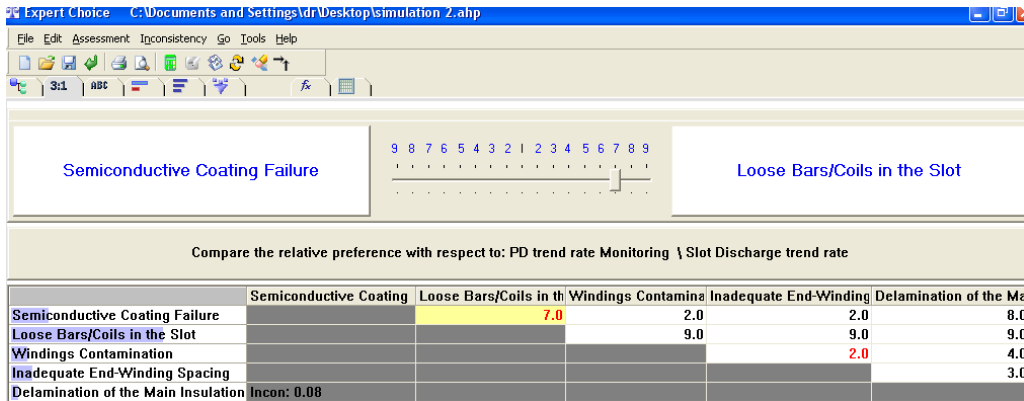
File Edit Assessment Inconsistency Go Tools Help

temperature monitoring 9 8 7 6 5 4 3 2 | 2 3 4 5 6 7 8 9 PD monitoring

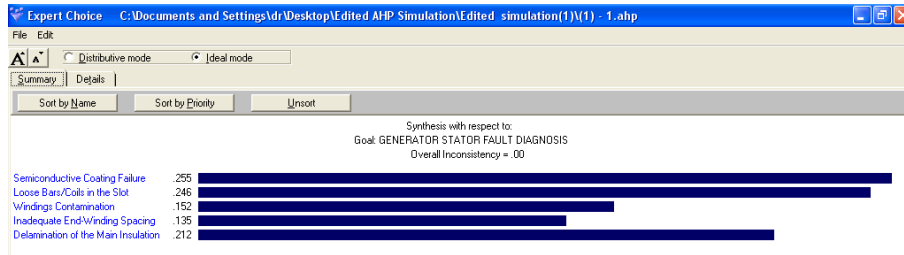
Compare the relative importance with respect to: Goal: GENERATOR STATOR FAULT DIAGNOSIS

	temperature monitoring	temperature trend rate	PD monitoring	defect mechanisms byproducts m
temperature monitoring		2.0	4.0	2.0
temperature trend rate monitoring			2.0	5.0
PD monitoring				7.0
defect mechanisms byproducts monitoring	Incon: 0.00			

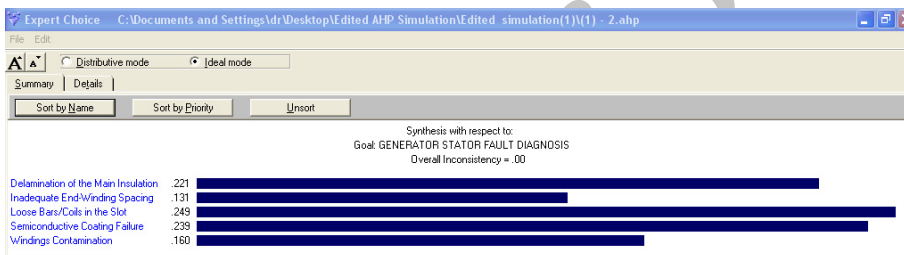
شکل ۹: ماتریس مقایسه معیارهای اصلی.



شکل ۱۰: ماتریس مقایسه متغیرها.



شکل ۱۱: نتایج شبیه‌سازی استراتژی اول - الف.



شکل ۱۲: نتایج شبیه‌سازی استراتژی اول - ب.

- عدد متناظر ۳
 - نرخ تغییرات دمایی خنک‌کننده ۱ درجه سلسیوس بر ساعت با عدد متناظر ۴
 - میزان پیک مثبت تخلیه جزئی ۱۱۰۰ میکوکولن با عدد متناظر ۵
 - میزان پیک منفی تخلیه جزئی ۳۲۰ میکوکولن با عدد متناظر ۲
 - درصد گردش جریان خنک‌کننده ۹۲ با عدد متناظر ۲
 - نرخ تولید ازن ۰/۰۲۷ PPM بر هفته با عدد متناظر ۶
- نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده به هنگام، محتمل‌ترین عیب توسط ساختار عیب‌یابی AHP، نقص پوشش نیمه‌هادی تشخیص داده می‌شود و نتیجه‌ای مقبول است چرا که اولاً پیک مثبت تخلیه جزئی از پیک منفی آن بیشتر است و ثانیاً نرخ تولید ازن زیاد است و تأییدکننده میزان بالای تولید ازن است که می‌تواند ناشی از عیب پوشش نیمه‌هادی باشد. ثالثاً دمایی خنک‌کننده نیز در حال افزایش است که می‌تواند در اثر تخریب مبدل حرارتی توسط ازن تولیدی ناشی از زوال پوشش نیمه‌هادی باشد.

- (ب)
- دمایی شیار استاتور ۱۳۹ درجه سلسیوس با عدد متناظر ۵
- دمایی خنک‌کننده ۸۵ درجه سلسیوس با عدد متناظر ۲
- نرخ تغییرات دمایی شیار استاتور ۱/۶۶ درجه سلسیوس بر ساعت با عدد متناظر ۶
- نرخ تغییرات دمایی خنک‌کننده ۰/۳۵ درجه سلسیوس بر ساعت با

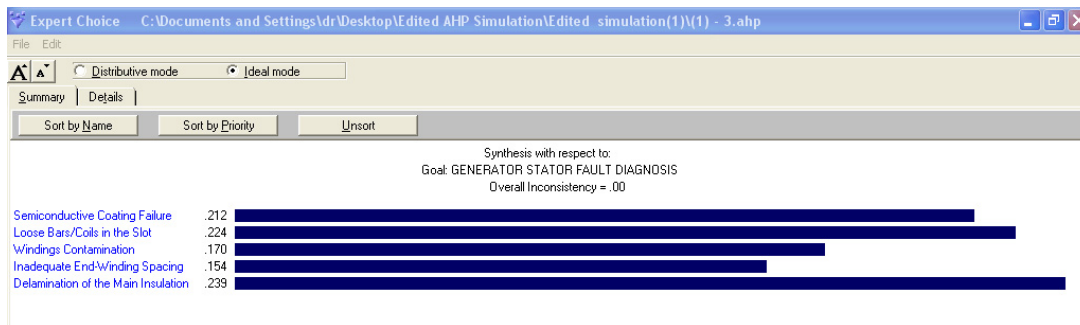
مثال برای اولویت‌سنجی دو متغیر "لقی شینه‌ها در شیار" و "خرابی پوشش نیمه‌هادی" نسبت به تأثیرگذاری بر "نرخ افزایش تخلیه جزئی شیار"، "لقی شینه‌ها در شیارها" در مقابل "خرابی پوشش نیمه‌هادی"، دارای اهمیت خیلی قوی با اولویت ۷ است. چرا که عامل لقی و آزادی شینه‌ها خود از عوامل عمده خرابی پوشش نیمه‌هادی و سرعت‌دهنده تخریب آن به شمار می‌رود و می‌توان خرابی پوشش نیمه‌هادی را به عنوان زیرمجموعه‌ای از اثرات لقی شینه‌ها در نظر گرفت و در کل سرعت تخریبی لقی شینه‌ها از خرابی پوشش نیمه‌هادی بیشتر است. سایر مقایسه‌ها نیز با صرف زمان زیادی جهت مطالعه ساز و کارهای عیوب ژنراتور و بررسی اندک تجارب عملیاتی مستند موجود، بر پایه استدلال‌هایی مشابه، مبتنی بر مکانیسم عیوب انجام شده‌اند [۱۳] تا [۱۹].

۱-۵ پیاده‌سازی استراتژی اول

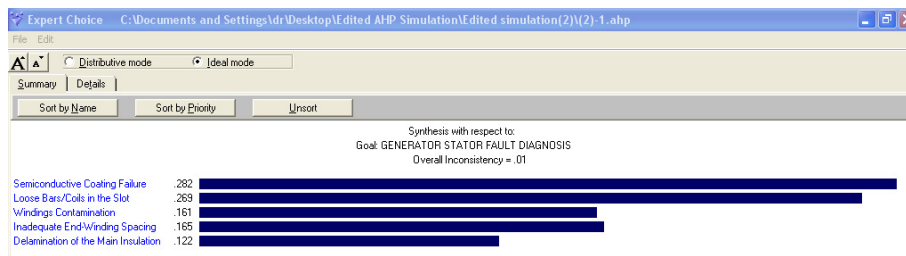
ساختار استراتژی اول مطابق شکل ۷ تعریف گردید، سپس مطابق آنچه ذکر شد عملیات اولویت‌سنجی انجام شد. در ادامه با توجه به روابط متناظر اعداد و مقادیر پارامترهای مانیتورینگ تعریف شده که نمونه آن در شکل ۶ نشان داده شده است، سه دسته متفاوت از مقادیر فاکتورهای پایش‌شونده به ساختار استراتژی اول اعمال گردید:

(الف)

- دمایی شیار استاتور ۱۱۸ درجه سلسیوس با عدد متناظر ۳
- دمایی خنک‌کننده ۹۹ درجه سلسیوس با عدد متناظر ۳
- نرخ تغییرات دمایی شیار استاتور ۰/۶۷ درجه سلسیوس بر ساعت با



شکل ۱۳: نتایج شبیه‌سازی استراتژی اول - ج.



شکل ۱۴: نتایج شبیه‌سازی استراتژی دوم - الف.

۵-۲ پیاده‌سازی استراتژی دوم

در استراتژی دوم با فرض آن که انواع تخلیه جزئی به صورت خودکار توسط سیستم‌های تحلیل تخلیه جزئی تشخیص داده می‌شوند ساختار شکل ۸ تعریف شد. زیرمعیارهای معیار اصلی "پایش تخلیه جزئی"، تغییر داده شده‌اند و به جای "میزان پیک تخلیه جزئی"، "میزان تخلیه جزئی داخلی"، "تخلیه جزئی شیار" و "تخلیه جزئی انتهای سیم‌پیچ‌ها" قرار می‌گیرند. یک معیار اصلی دیگر که "روند تغییرات تخلیه جزئی" می‌باشد، به معیارهای اصلی اضافه شده است. زیرمعیارهای تعریف شده برای آن "روند تغییرات تخلیه جزئی داخلی"، "روند تغییرات تخلیه جزئی شیار" و "روند تغییرات تخلیه جزئی انتهای سیم‌پیچ" هستند. در ادامه مانند استراتژی اول، سه دسته متفاوت از مقادیر فاکتورهای پایش‌شونده به ساختار استراتژی دوم اعمال گردید. در هر یک از حالت‌های الف، ب و ج مقادیر پارامترهای دمای شیار استاتور، دمای خنک‌کننده، نرخ تغییرات آنها، درصد گردش جریان خنک‌کننده و نرخ تولید ازن با مقادیرشان در حالت‌های متناظر استراتژی اول یکسان در نظر گرفته شده و فقط مقادیر زیرمعیارهای اضافه‌شده ذکر شده‌اند.

الف)

- میزان تخلیه جزئی داخلی ۵۰۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۲
- میزان تخلیه جزئی شیار ۴۹۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۵
- میزان تخلیه جزئی انتهای سیم‌پیچ‌ها ۴۵۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۳
- نرخ تغییرات روند تخلیه جزئی داخلی ۱/۵ پیکوکولن بر هفته با عدد متناظر ۱
- نرخ تغییرات روند تخلیه جزئی شیار ۷/۵ پیکوکولن بر هفته با عدد متناظر ۴
- نرخ تغییرات روند تخلیه جزئی انتهای سیم‌پیچ‌ها، ۳ پیکوکولن بر هفته با عدد متناظر ۲

نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده به هنگام، محتمل‌ترین عیب توسط ساختار عیب‌یابی AHP، نقص پوشش نیمه‌هادی تشخیص داده می‌شود و نتیجه‌ای مقبول می‌باشد زیرا علاوه بر

عدد متناظر ۲

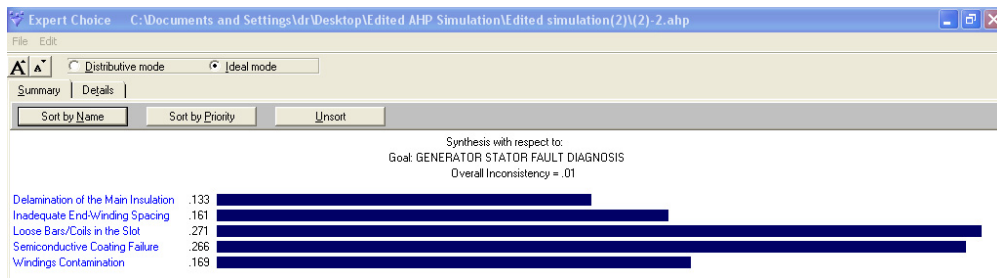
- میزان پیک مثبت تخلیه جزئی ۲۳۰۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۶
 - میزان پیک منفی تخلیه جزئی ۴۵۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۳
 - درصد گردش جریان خنک‌کننده ۹۰ با عدد متناظر ۳
 - نرخ تولید ازن ۰/۱۹ PPM بر هفته با عدد متناظر ۴
- نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده به هنگام، محتمل‌ترین عیب توسط ساختار عیب AHP، شل بودن و لقی شینه‌ها تشخیص داده می‌شود و نتیجه‌ای منطقی می‌باشد چرا که اولاً پیک مثبت تخلیه جزئی از پیک منفی آن بیشتر است. ثانیاً نرخ تولید ازن نسبتاً کم است و لقی شینه‌ها هم مقدار ملایمی از ازن تولید می‌کند. ثالثاً دمای استاتور و نرخ تغییرات آن نیز نسبتاً زیاد است که از نشانه‌های شل بودن و لقی شینه‌ها و عدم تبادل حرارتی مناسب به دلیل لقی می‌باشد.

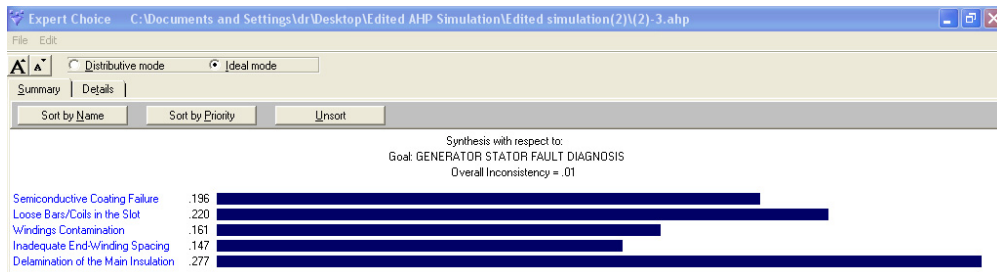
ج)

- دمای شیار استاتور ۱۲۹ درجه سلسیوس با عدد متناظر ۴
 - دمای خنک‌کننده ۷۹ درجه سلسیوس با عدد متناظر ۱
 - نرخ تغییرات دمای شیار استاتور ۱/۴۹ درجه سلسیوس بر ساعت با عدد متناظر ۵
 - نرخ تغییرات دمای خنک‌کننده ۰/۱ درجه سلسیوس بر ساعت با عدد متناظر ۱
 - میزان پیک مثبت تخلیه جزئی ۳۴۴ پیکوکولن با عدد متناظر ۳
 - میزان پیک منفی تخلیه جزئی ۴۶۱ پیکوکولن با عدد متناظر ۳
 - درصد گردش جریان خنک‌کننده ۹۴ با عدد متناظر ۲
 - نرخ تولید ازن ۰/۰۰۶ PPM بر هفته با عدد متناظر ۲
- نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده به هنگام، محتمل‌ترین عیب توسط ساختار عیب‌یابی AHP، عیب عایق اصلی تشخیص داده می‌شود و نتیجه‌ای قابل انتظار می‌باشد زیرا دمای استاتور افزایش یافته و در حال افزایش می‌باشد. همچنین نسبت پیک مثبت و منفی تخلیه جزئی حدود یک می‌باشد که تأییدکننده عیب عایق اصلی است.



شکل ۱۵: نتایج شبیه‌سازی استراتژی دوم-ب.



شکل ۱۶: نتایج شبیه‌سازی استراتژی دوم-ج.

نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده به هنگام، محتمل‌ترین عیب توسط ساختار عیب‌یابی AHP، عیب عایق اصلی تشخیص داده می‌شود و نتیجه‌ای قابل قبول است زیرا علاوه بر توضیحاتی که در بخش ج استراتژی اول داده شد، در اینجا مقدار و سرعت نسبتاً بالای رشد تخلیه جزئی داخلی نیز می‌تواند تأییدکننده نتیجه ساختار عیب‌یابی باشد.

۶- بحث و استدلال

در حال حاضر با روند بازنشستگی‌ها و تعدیل نیرویی که در حال انجام است تا چند سال آینده بسیاری از نیروهای مجرب و ماهر بازنشسته خواهند شد و چون سرعت انتقال تجارب و دانش آنها به مراتب کمتر است، در آینده به مشکلات عدیده‌ای برخورد خواهیم کرد. بهترین راه حل این است که به نحوی مطمئن شویم حتی بعد از رفتن متخصصین، تجهیزات و شبکه قدرت تحت حمایت آنها باقی خواهد ماند. بدین منظور لازم است که مدل‌هایی نظیر AHP که قابلیت‌های فراوانی دارد به عنوان ابزاری که تجارب را در خود نگهداری می‌کند، بسط یافته و مهندسی‌ن جوان را پشتیبانی نماید. تحقیقات انجام‌شده در این مقاله قدمی در راستای نیل به هدف فوق است.

استراتژی پیشنهاد داده شده در این مقاله فقط مختص به یک ژنراتور خاص نمی‌باشد بلکه با توجه به آن که معیار مقایسه‌های انجام‌شده، رفتارها و روابط علت و معلولی بین پارامترها و فاکتورهای مختلف است، این روابط و ضوابط به عنوان مثال در هیدروژنراتورهای ساخت یک کمپانی خاص، ثابت و عمومی بوده و با آزمایش و پیاده‌سازی برای یک مورد، تنها با اندک تغییری در چند پارامتر خاص همچون مدت بهره‌برداری و تعمیرات انجام‌شده، برای سایر موارد مشابه نیز قابل استفاده است. مثلاً در بررسی‌های صورت‌گرفته در این مقاله، ماتریس‌های معرفی‌شده گروه شماره ۱، ۲، ۵ و ۶ بعد از تکمیل، به صورت عمومی برای سایر ژنراتورهای مشابه نیز قابل استفاده‌اند و تنها ماتریس‌های گروه ۳ و ۴ که مربوط به اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای هستند، باید بازتکمیل شوند که با توجه به الگوریتم استفاده‌شده در این مقاله، نیاز چندانی به تخصص و تجربه ندارند.

توضیحاتی که در بخش الف استراتژی اول داده شد، میزان بالا و سرعت نسبتاً زیاد رشد تخلیه جزئی شیار نیز می‌تواند تأییدکننده خرابی پوشش نیمه‌هادی باشد.

(ب)

- میزان تخلیه جزئی داخلی ۶۰۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۲
- میزان تخلیه جزئی شیار ۴۹۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۵
- میزان تخلیه جزئی انتهای سیم‌پیچ‌ها ۴۲۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۳
- نرخ تغییرات روند تخلیه جزئی داخلی ۱ پیکوکولن بر هفته با عدد متناظر ۱
- نرخ تغییرات روند تخلیه جزئی شیار ۷/۹ پیکوکولن بر هفته با عدد متناظر ۴
- نرخ تغییرات روند تخلیه جزئی انتهای سیم‌پیچ‌ها ۳/۹ پیکوکولن بر هفته با عدد متناظر ۲

نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده به هنگام، محتمل‌ترین عیب توسط ساختار عیب‌یابی AHP، شل بودن و لقی شینه‌ها تشخیص داده می‌شود و نتیجه‌ای منطقی می‌باشد زیرا علاوه بر توضیحاتی که در بخش ب استراتژی اول داده شد، در اینجا میزان بالا و سرعت نسبتاً زیاد رشد تخلیه جزئی شیار نیز می‌تواند تأییدکننده لقی و شل بودن شینه‌ها باشد.

(ج)

- میزان تخلیه جزئی داخلی ۵۶۰۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۵
- میزان تخلیه جزئی شیار ۱۹۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۲
- میزان تخلیه جزئی انتهای سیم‌پیچ‌ها ۲۶۰ پیکوکولن با عدد متناظر ۲
- نرخ تغییرات روند تخلیه جزئی داخلی ۷/۲ پیکوکولن بر هفته با عدد متناظر ۴
- نرخ تغییرات روند تخلیه جزئی شیار ۱/۲ پیکوکولن بر هفته با عدد متناظر ۱
- نرخ تغییرات روند تخلیه جزئی انتهای سیم‌پیچ‌ها ۰/۹ پیکوکولن بر هفته با عدد متناظر ۱

۷- نتیجه گیری

نظر به این که فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یک روش تصمیم‌گیری است که تصمیم‌گیرنده را قادر می‌سازد تا مسئله مورد نظر خود را شکل داده و بر اساس ساختار، مقایساتی را جهت تعیین اولویت گزینه‌های مطرح در تصمیم‌گیری انجام دهد، روشی جهت استفاده از آن در تشخیص عیب ژنراتورهای فشار قوی مطرح گردید. از جمله مهم‌ترین مزایای این روش استفاده از آن در تصمیم‌گیری با معیارهایی است که به صورت "کیفی" مطرح هستند. همچنین طبقه‌بندی معیارها از بالا به پایین در ساختار درختی باعث می‌شود تا مسایل پیچیده از جمله تشخیص عیب ژنراتورها با توجه به وضعیت آنها بتوانند به صورت سیستماتیک توسط AHP بررسی شوند. با پیاده‌سازی این مدل برای تعیین عیب ژنراتورها ضمن غلبه بر پیچیدگی تحلیل و حجم زیاد پارامترهای دخیل، دانش و تجربه نیروهای مجرب فعلی نیز به صورت کاربردی ذخیره‌سازی می‌شود و برای استفاده مهندسی و متخصصین آینده به کار می‌رود. یک مطالعه موردی بر اساس روش فوق انجام و نتایج آن بررسی گردید.

مراجع

- [10] T. L. Saaty, *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*, vol. VI, Pittsburgh: RWS Publications, 1994.
- [11] T. L. Saaty, *The Analytical Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill, 1980.
- [12] M. Zare and A. Akbari, "A method based on analytical hierarchy process for generator risk assessment," in *Proc. of the 2010 Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis*, pp. 1130-1133, Tokyo, Japan, Sep. 2010.
- [13] C. Hudon and M. Belec, "Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 297-319, Apr. 2005.
- [14] D. L. Evans, "IEEE working group report of problems with hydrogenerator thermoset stator windings," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 7, pp. 3284-3291, Jul. 1981.
- [15] R. Brutsch, M. Tari, K. Frohlich, T. Weiers, and R. Vogelsang, "Insulation failure mechanisms of power generators," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 4, pp. 17-25, Jul./Aug. 2008.
- [16] S. Li and J. M. Y. Chow, "Partial discharge measurements on hydro generator stator windings case studies," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 23, no. 3, pp. 5-15, May/Jun. 2007.
- [17] C. Sumereder, "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 3, pp. 678-685, Jun. 2008.
- [18] G. C. Stone, C. V. Maughan, D. Nelson, and R. P. Schultz, "Impact of slot discharges and vibration sparking on stator winding life in large generators," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 14-21, Sep./Oct. 2008.
- [19] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, New York: John Wiley, 2004.
- [1] C. Sumereder, C. Rupp, M. Muhr, H. Egger, and M. Marketz, "Condition evaluation of hydro generators," in *Proc. 8th Int. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 285-288, Jun. 2006.
- [2] P. K. Dey, "Decision support system for inspection and maintenance: a case study of oil pipelines," *IEEE Trans. on Engineering Management*, vol. 51, no. 1, pp. 47-56, Feb. 2004.
- [3] W. Xiao-Bin, C. Wen-Yu, S. Shi-Xin, and L. Jing-Bo, "A method of remote fault diagnosis based on analytical hierarchy process," in *Proc. IEEE Conf. Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 693-696, 21-24 Sep. 2008.
- [4] S. Bin and C. Mingbang, "Power transformer Dga integrated diagnosis system based on oracle database," in *Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf., APPEEC'09*, 4 pp., Mar. 2009.
- [5] W. You-Yuan, et al., "Study of an assessment method for the reliability of tap-changers in power transformer based on fault-tree analysis," in *Proc. Int. Conf. High Voltage Engineering and Application, ICHVE'08*, pp. 604-608, 9-12 Nov. 2008.
- [6] P. C. Lin, J. C. Gu, and M. T. Yang, "Intelligent maintenance model for condition assessment of circuit breakers using fuzzy set theory and evidential reasoning," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 7, pp. 1244-1253, Jul. 2014.
- [7] H. Meyar-Naimi and S. Vaez-Zadeh, "Sustainability assessment of a power generation system using DSR-HNS framework," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 28, no. 2, pp. 327-334, Jun. 2013.
- [8] S. V. Daneshmand, H. Heydari, and S. Shakeri, "Multicriteria optimal winding scheme in HTS transformers by analytical hierarchy Process," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 1, pp. 2-12, Feb. 2011.
- [9] L. Wang and L. Pan, "A method of evaluating online operating state of transformer," in *Proc. China Int. Electricity Distribution Conf., CIGRE'14*, pp. 1014-1017, 23-26 Sep. 2014.

محمد زارع در سال ۱۳۸۵ مدرک کارشناسی مهندسی برق- قدرت را از دانشگاه یزد و در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد در همان گرایش را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی دریافت نمود. نام‌برده از سال ۱۳۹۱ تا کنون در جهاد دانشگاهی واحد صنعتی خواجه نصیر طوسی به تحقیق مشغول می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مباحث فشارقوی، تحلیل و طراحی ماشین‌های الکتریکی، انرژی‌های تجدیدپذیر.

اصغر اکبری ازیرانی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۷۰ و ۱۳۷۷ در دانشگاه‌های تهران، امیرکبیر و تربیت مدرس به پایان برده است. در سال ۱۳۷۸ به مدت دو سال در انستیتو فشارقوی شرینگ در دانشگاه هانور آلمان به تحقیق مشغول بوده و از همان سال ۱۳۷۸ هم به عضویت هیأت علمی دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی در آمده است. جایی که همچنان در آنجا به تدریس و تحقیق مشغول است. نام‌برده تا کنون مقالات زیادی در مجلات و کنفرانس‌های ملی و بین‌المللی منتشر نموده و دانشجویان متعددی را در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری راهنمایی نموده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مهندسی فشارقوی، عایق‌های الکتریکی، تخلیه جزئی، مدل‌سازی تجهیزات فشارقوی و مانیتورینگ، عیب‌یابی و تشخیص مهندسی تجهیزات فشار قوی.