

## بررسی تخلیه جزئی شینه‌های استاتور ژنراتورهای سنکرون توسط شبکه عصبی

سید میثم عزتی<sup>(۱)</sup> - فرامرز فقیهی<sup>(۲)</sup> - علی معرفیان پور<sup>(۳)</sup>

(۱) دانشجوی دکتری - گروه برق، دانشکده مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(۲) استادیار - گروه برق، دانشکده مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۶/۲

**خلاصه:** این مقاله به بررسی و تحلیل تخلیه جزئی بر روی شینه‌های استاتور ژنراتور سنکرون می‌پردازد. لازم است در ابتدا، با استفاده از تجهیزات مربوطه، اندازه‌گیری سیگنالهای خاص این نوع تخلیه در دفعات و زمان‌های مختلف انجام گیرد و سپس با توجه به قواعد و استانداردهای موجود به تفسیر آنها پرداخته شود. به منظور تفسیر بهتر نتایج، یک شبکه عصبی مورد آموزش، آزمون و صحت‌سنجی قرار گرفته است. شبکه عصبی مورد استفاده، شبکه پرسپترون پیشرو دو لایه می‌باشد که با روش لوبنبرگ مارکواریت با در نظر گرفتن حداقل‌سازی مربعات خطا به عنوان شاخص عملکرد، مورد آموزش قرار گرفته است. به عنوان تست سیستم نمونه، آزمایش بر روی سه ژنراتور میتسوبیشی نیروگاه گازی شهر ری که هر کدام با توان نامی ۸۵ مگاوات به تولید می‌پردازند، انجام گرفته است. در استاتور ژنراتور سنکرون عموماً وجود تخلیه الکتریکی در محل تماس شینه‌ها با بدنه استاتور، ورقه ورقه شدن داخلی شینه‌ها، وجود لقی در داخل دیواره عایق اصلی و ایجاد تخلیه در داخل شیار نتایج حاصل از تحلیل تخلیه جزئی می‌باشند.

**کلمات کلیدی:** تخلیه جزئی، ژنراتور سنکرون، استاتور، شبکه عصبی مصنوعی.

## Partial Discharge Analysis in Generator Stator Winding Using Artificial Neural Network

Seyed Meisam Ezzati<sup>(1)</sup> - Faramarz Faghihi<sup>(2)</sup> - Ali Moarefian poor<sup>(3)</sup>

(1) Phd Condidat - Department of Electrical Engineering, Science & Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ezzati\_seyedmeisam@ieee.org

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Science & Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

faramarz\_faghihi@hotmail.com

moarefian@srbiau.ac.ir

This paper analyses the Partial Discharge (PD) on the stator terminals of synchronous generator. This is necessary to collect experimental data for the analysis. First, exploiting the measurement devices, special signals that describe the partial discharges are repeatedly collected. Then, based on the current standards, the collected empirical data are subjected to interpretation. To ease the interpretation process, an Artificial Neural Network is trained and validated. We have used a double layers forward perceptron neural network which is trained by Levenberg-Marquardt algorithm that utilizes least square method as the performance index. As the case study, three gas turbine-generators located in Shahre-Rey power plant (Rey Power Generation Management Company) have been subjected to repeatedly data collection. The mentioned generators are manufactured by Mitsubishi with 85 MW of nominal power. Generally, partial discharge analysis has the following practical implication about the probable defects: lamination of the internal terminal, mobility within the main insulation and discharge into the groove in stator of synchronous generator.

**Index Terms:** Partial discharge (PD), stator, synchronous generator, artificial neural network (ANN).

نویسنده مسئول: سید میثم عزتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ezzati\_seyedmeisam@ieee.org

## ۱- مقدمه

ژنراتورها یکی از حساس‌ترین و گران‌قیمت‌ترین تجهیزات در نیروگاه‌ها هستند و حفاظت از آنها به دلایل اقتصادی، فنی و حتی سیاسی از اهمیت بالایی برخوردار است. وظیفه اصلی ژنراتورها، تأمین انرژی الکتریکی مصرف‌کنندگان است و با بروز مشکل در ژنراتورها علاوه بر وارد آمدن خسارت بر آنها، خسارت بسیار شدیدتری به سیستم قدرت وارد خواهد شد. بنابراین تعمیرات، نگهداری، حفاظت از ژنراتورها و تشخیص خطاهای به وجود آمده در آنها امری ضروری می‌باشد و مناسب است که توسط تجهیزات حفاظتی مانند رله‌ها، خطاهای پیش‌آمده مورد شناسایی قرار گیرند و نسبت به رفع آنها اقدامات لازم صورت پذیرد. برخی از خطاها وجود دارند که در حالت کار عادی اصلاً نمایان نمی‌شوند و رله‌ها قادر نیستند که آنها را اعلام نمایند که تخلیه الکتریکی جزئی<sup>۱</sup> (PD) یکی از آن موارد می‌باشد [۱-۳].

با توجه به موارد ذکر شده و با در نظر داشتن نقش مهم ژنراتورهای سنکرون در سیستم قدرت، اهمیت سنجش وضعیت عایقی آنها حائز اهمیت است که از مهمترین این موارد می‌توان به اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی و تخلیه جزئی (موضوع این مقاله)، اشاره کرد. ارزیابی‌های یاد شده به منظور انجام تعمیرات و نگهداری زمان‌بندی شده و پیشگیرانه صورت می‌گیرد.

شایان ذکر است که بحث تخلیه جزئی در ماشین‌های بالای چهار کیلو ولت مفهوم دارد و نتایج نشان می‌دهد که ژنراتور با سیم‌پیچ قدیمی تقریباً ۳۰ برابر بیشتر از ژنراتور با سیم‌پیچ نو در معرض تخلیه جزئی قرار دارد [۴]، [۵]. با استفاده از تست دوره‌ای تخلیه جزئی، می‌توان به بسیاری از اشکالات عایقی سیم‌پیچ استاتور قبل از بروز شکست کامل عایقی پی برد.

برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه با استفاده از نتایج تست تخلیه جزئی به منظور جلوگیری از بروز شکست عایقی مدت زمان بهره‌برداری شامل تمیز کردن، گوه گذاری مجدد<sup>۲</sup>، انجام مجدد وارنیش<sup>۳</sup>، تغییرات در بهره‌برداری (مانند محدود کردن بار، تعداد دفعات استارت و میزان تغییرات توان) و سیم‌پیچی مجدد استاتور می‌باشد که این فرآیندها باعث افزایش عمر سیم‌پیچ و حداقل کردن تعداد خطاها می‌گردد. تست تخلیه جزئی ژنراتور در دو حالت *offline* (ژنراتور خارج از مدار) و *online* (ژنراتور متصل به شبکه) انجام می‌گیرد که تست در حالت اتصال ژنراتور به شبکه ترجیح داده می‌شود [۶]، [۷].

بررسی تخلیه جزئی در ژنراتورهای نیروگاه آبی در [۸]، [۹] بیان شده است. در [۱۰] با استفاده از یک سنسور فراصوت به بررسی شناسایی الگو در آزمایش تخلیه جزئی شینه ژنراتور اشاره شده است که در مدت تنها یک ثانیه به نمونه‌برداری پرداخته شده است و تنها به وجود تخلیه جزئی در داخل شینه بدون تشخیص نوع آن اشاره شده است. در [۱۱] بررسی تخلیه جزئی با استفاده از سری فوریه مورد توجه قرار گرفته

است. استفاده از تابع تبدیل فرکانسی در تحلیل تخلیه جزئی در [۱۲] بیان شده است.

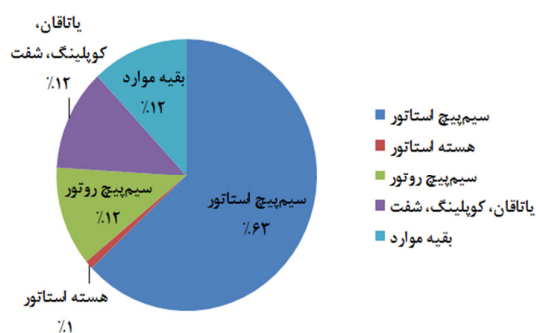
از آنجا که، شبکه‌های عصبی توانایی مناسبی در تخمین و تقریب زدن توابع را دارند و می‌توانند با آموزش و استفاده از مدل ورودی-خروجی، با دریافت ورودی جدید، خروجی متناظر با آن را با دقت مناسبی تخمین بزنند، در این مقاله از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرسپترون دو لایه که توانایی محاسبه و تقریب توابع حسابی و منطقی را دارند، به منظور تحلیل نمودارهای تخلیه جزئی استفاده شده است.

ابتدا در بخش دوم به بررسی ساختار شینه ژنراتور پرداخته می‌شود سپس در بخش سوم اشکال و مکان‌های حفره در شینه مورد بررسی قرار گرفته است. انواع تخلیه‌های الکتریکی جزئی در شینه‌های ژنراتور در بخش چهارم آورده شده است. در بخش پنجم اقدامات لازم برای انجام تست بر روی ژنراتورهای تست سیستم نمونه (واحدهای گازی نوع میتسویشی نیروگاه ری) مطرح شده است و در بخش ششم نتایج به همراه شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی ارائه شده است.

## ۲- اهمیت و ساختار شینه ژنراتور

بیشترین سهم از عیوب ایجاد شده در ژنراتورها مربوط به سیم‌پیچی استاتور آنها می‌باشد که دلیل اصلی آن، تخلیه جزئی است. در شکل (۱) آماری از دسته‌بندی عیوب ژنراتور و در شکل (۲) ساختار شینه ژنراتور نشان داده شده‌اند [۱۳]:

رنگ هادی از وارنیشی که ترکیبی از فوتکس و کربن می‌باشد، تولید شده است و به منظور حفاظت در مقابل کرونا استفاده می‌گردد. رنگ نیمه‌هادی از ترکیب رزین، فنولیک و کربید سیلیکن تشکیل شده است که عامل جلوگیری کننده از ایجاد کرونا در ناحیه خم<sup>۴</sup> شینه می‌باشد. هادی شینه شامل رشته‌های استرنده شده‌ای است که در ردیف‌های منظم قرار گرفته‌اند و باعث برخورد میدان یکنواخت به هادی‌ها می‌شود. در نهایت، عموماً، میکا به عنوان عایق اصلی استفاده می‌گردد. شکل (۳) نمایی از هسته، هادی و عایق شینه ژنراتور فشار قوی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): دسته‌بندی عیوب ژنراتور

Fig. (1): Classification of defect phenomena in the generators

[۱۷]. به منظور نصب و راه اندازی تجهیزات اندازه گیری تخلیه جزئی استاتورهای ژنراتورهای سنکرون، در هر ژنراتور و برای هر فاز دو سنسور خازنی برای دریافت سیگنال های تخلیه الکتریکی در محل خروج فازها از ژنراتور در کنار ترانس های جریان خروجی از ژنراتور (سنسورهای A2، B2 و C2) و سنسورهای حذف پارازیتها (سنسورهای A1، B1 و C1) به فاصله حداقل دو متر از یکدیگر نصب می گردند و در مجموع هر ژنراتور دارای شش سنسور خازنی می باشد که سه عدد از آنها برای قرانت سیگنال های تخلیه الکتریکی در سه فاز به کار می رود و بقیه برای حذف پارازیت کاربرد دارند که به این روش نصب سنسورها، روش مستقیم اطلاق می گردد.

پس از نصب سنسورها کابل های کواکسیال به خروجی آنها متصل می شوند و خروجی کابل های کواکسیال از سنسورها در داخل لوله های قابل انعطاف پذیر ضد رطوبت قرار می گیرند و سپس به جعبه اتصال نصب شده بر روی بدنه ژنراتور وارد می شوند. باید توجه داشت که در جعبه اتصال نصب شده بر روی بدنه ژنراتور، برق گیر و مقسم ولتاژ سیگنال تخلیه الکتریکی نیز برای هر فاز باید نصب گردد و برای هر فاز یک پتانسیومتر اهمی قابل تغییر برای تنظیم دامنه سیگنال ها برای هر فاز نیز باید تعبیه گردد.

#### ۴-۱- تست سیستم (ژنراتورهای میتسوبیشی نیروگاه گازی ری)

سه ژنراتور میتسوبیشی با توان نامی ۸۵ مگاوات ساخت کشور ژاپن با ضریب قدرت ۰/۸۵ که با شماره واحدهای ۳۲، ۳۳ و ۳۴ نشان داده می شوند در نیروگاه ری موجود می باشد. از این ژنراتورها که از تابستان سال ۱۳۵۷ وارد شبکه سراسری شده اند، حدوداً به مدت دو سال به صورت بار پایه و دائم در مدار قرار گرفتند و بعد از آن به صورت تامین بار پیک و راه اندازی روزانه مورد استفاده قرار می گیرند [۱۸]. شکل (۴) نمایشی از این ژنراتورها را نشان می دهد.

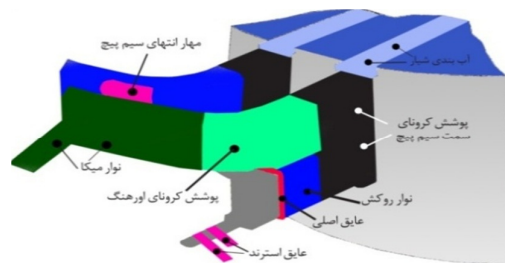
به منظور اندازه گیری تخلیه جزئی با توجه به مطالب گفته شده دو نوع سنسور به فاصله ۴ متر از یکدیگر نصب شده اند. شکل (۵) شماتیکی از نحوه نصب سنسورها در ژنراتورهای میتسوبیشی نیروگاه ری را نشان می دهد.

اگر پالس ابتدا به کوپلر که نزدیک سیم پیچ استاتور می باشد، برسد به عنوان پالس PD شناخته می شود و اگر ابتدا به کوپلری که نزدیک سیستم قدرت است (دورترین نقطه از استاتور) برسد به عنوان نویز می باشد.

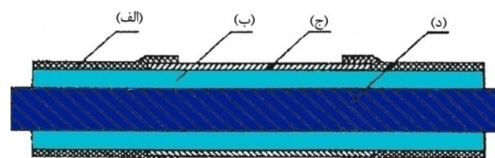
#### ۴-۲ عوامل موثر در دقت و کارایی نتایج تخلیه جزئی

در هنگام تست، مناسب است که موارد زیر رعایت گردد:

- ۱- اندازه گیری بایستی در شرایط پایدار حرارتی ژنراتور انجام گیرد. در طول مدت زمان اندازه گیری درجه حرارت استاتور حداکثر ۳ الی ۴ درجه سانتی گراد می تواند تغییرات داشته باشد.



شکل (۲): نمایی از هسته، هادی و عایق شینه ژنراتور فشارقوی  
Fig. (3): Coil, conductor and main insulation in generator



شکل (۳): ساختار شینه ژنراتور (الف- رنگ نیمه هادی ب-عایق ج- رنگ هادی د- هادی)  
Fig. (2): Generator bus cross section

#### ۳- تخلیه جزئی در شینه های ژنراتور

تخلیه جزئی در حفره هایی که داخل عایق وجود دارند، ایجاد می شود و با گسترش حفره ها، شکست کامل عایقی رخ می دهد. شینه های ژنراتور در فرآیند ساخت و در زمان بهره برداری بر اثر تنش های حرارتی، الکتریکی و مکانیکی ممکن است دچار تخلیه جزئی شوند [۱۵]، [۱۶]. حفره ها بیشتر در عایق اصلی که از جنس میکا است، وجود دارند. مقدار مشخصی از تخلیه جزئی ناشی از حفره های باقیمانده در عایق دیواره زمین اجتناب ناپذیر و قابل قبول است.

این نکته حائز اهمیت است که علاوه بر نحوه کارکردن ژنراتورها از نظر راه اندازی، توقف روزانه، بارگیری و کم کردن ناگهانی بار، عوامل دیگر که باعث تخریب و فرسودگی عایق ها می شوند عبارتند از: الف- نفوذ روغن و گرد و خاک و رطوبت به داخل عایق ها، ب- لرزش تحمیل شده بر روی شینه ها و گوه ها از طریق قطعات دوار توربین و ژنراتور، که باعث کم شدن فواصل عایقی، ایجاد تخلیه، ایجاد حفره ها، عدم انتقال حرارت ایجاد شده در شینه به خارج از محیط ژنراتور و فرسودگی های مکانیکی می شوند که نهایتاً باعث ضعف عایق ها و تخریب آنها می گردد. تمامی عوامل یاد شده در دوران بهره برداری از واحدها اجتناب ناپذیر بوده و شرایط نامناسبی را برای کارکرد واحدها ایجاد می نمایند [۱۶].

#### ۴- اقدامات لازم برای انجام تست بر روی ژنراتور

آزمایش PD در اغلب موارد به دلیل وجود نویزهای بسیار زیاد، نامفهوم بوده و قابل تفسیر نمی باشند. تجهیزات مربوطه باید بتوانند نویز را از فرکانس اصلی PD جدا کنند که PDA<sup>۵</sup> یکی از این سیستم ها است که با استفاده از شش سنسور فرکانس بالا که دارای خازن هایی (خازن کوپلر باس) با ظرفیت ۸۰ پیکو فاراد و ۱۵ کیلو ولت می باشد، باعث جدا شدن فرکانس نویز از فرکانس اصلی می گردد

۱- نمایش دو بعدی سیگنال‌های مثبت و منفی (دامنه پالس-تعداد پالس)  
 ۲- نمایش سه بعدی (فاز-دامنه پالس-تعداد پالس)  
 نمودار سه بعدی مبین وجود یا عدم وجود تخلیه جزیی می‌باشد، بدین صورت که اگر این نمودار، ماکزیمم از ۲ ردیف پالس تشکیل شده باشد، تخلیه صورت نگرفته، اما در حالات بیشتر از دو ردیف، تخلیه صورت گرفته است.  
 نمودار دو بعدی مبین نوع و مکان تخلیه است، که تحلیل این نمودار در سه گروه اصلی و سه گروه فرعی به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند (اگر تعداد پالس در محور عمودی نمودار دو بعدی کمتر از ۱۰۰ باشد، تخلیه صورت نگرفته است) [۱۷]:

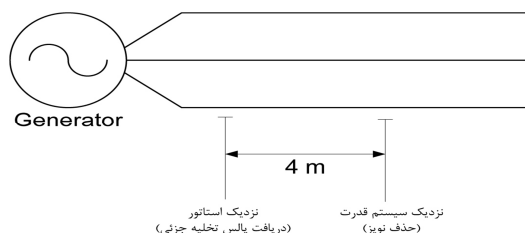
۲- از آنجا که تغییرات درجه حرارت استاتور در نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری تاثیر می‌گذارد، لذا بایستی سعی گردد که زمان انجام تست حتی المقدور کوتاه‌تر شود تا تغییرات درجه حرارت حداقل تاثیر را داشته باشد.

۳- برای مقایسه نتایج واحدهای مختلف با یکدیگر بایستی اطلاعات کافی از وضعیت و نوع عایق به کار رفته در واحدهای مختلف موجود باشد.  
 ۴- همواره، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان تخلیه الکتریکی در یک واحد خارج شده از شبکه بیشتر از یک واحد متصل به شبکه می‌باشد.

۳-۴ تفسیر نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری تخلیه الکتریکی در گزارش مربوط به آزمایش تخلیه جزیی استاتور ژنراتور، با دو نمودار، روبرو هستیم [۲]، [۱۷]:



شکل (۴): نمایی از ژنراتورهای میتسوبیشی نیروگاه ری  
 Fig. (4): Mitsubishi units installed in rey power plant



شکل (۵): شماتیک نحوه نصب سنسورها در ژنراتورها  
 Fig. (5): Sencor connection diagram in the generators

علاوه بر سه حالت فوق، سه حالت فرعی به شرح ذیل نیز وجود دارند که همراه با یکی از حالات الف-ب-ج رخ می‌دهند:  
 د- چنانچه نمودار به دست آمده از آزمایش منظم باشد اما با برش‌های تیز و مقطعی، مانند چاقو همراه باشد، نشانگر وجود تخلیه الکتریکی در داخل شیار و مناطقی از شینه که تغییر زاویه ۹۰ درجه می‌دهند، است.  
 ه- چنانچه نمودار به دست آمده از آزمایش نامنظم و همراه تغییرات باشد، نشانگر شروع تخریب ماده نیمه‌هادی پوششی روی شینه‌ها است.  
 و- چنانچه نمودار به دست آمده از آزمایش نامنظم باشد و تغییرات آن تناوبی تکرار شود، نشانگر تخلیه الکتریکی در انتهای شینه‌ها به علت از بین رفتن پوشش هادی و یا از بین رفتن لایه نیمه هادی در انتهای شینه‌ها است.

الف- چنانچه سیگنال‌های مثبت به دست آمده از آزمایش بیشتر از سیگنال‌های منفی باشد، نشانگر وجود تخلیه الکتریکی در محل تماس شینه‌های استاتور با بدنه هسته استاتور می‌باشد. دلیل وجود چنین شرایطی، از بین رفتن ماده هادی پوشش دهنده شینه‌های استاتور و جدا شدن الکتریکی و مکانیکی بدنه شینه‌های استاتور می‌باشد.  
 ب- چنانچه سیگنال‌های منفی به دست آمده از آزمایش بیشتر از سیگنال‌های مثبت باشد، نشانگر ایجاد ورقه ورقه شدن داخلی شینه‌های استاتور از عایق اصلی می‌باشد. در این حالت شینه‌های استاتور از دیواره عایق اصلی جدا شده است. دلیل وجود چنین شرایطی عدم یکپارچگی شینه و عایق در زمان ساخت و یا گرم شدن بیش از حد شینه‌ها در زمان بهره‌برداری می‌باشد.  
 ج- چنانچه سیگنال‌های مثبت و منفی به دست آمده از آزمایش تقریباً مشابه یکدیگر باشند، نشانگر لقی یا وجود حفره در داخل دیواره عایق اصلی شینه‌های استاتور می‌باشد.

ابتدا لازم است که نمونه‌گیری‌هایی از تخلیه جزئی انجام شود، سپس به منظور دسته‌بندی انواع تخلیه، تحلیل اولیه بر روی آنها صورت می‌گیرد. در ادامه، شبکه عصبی مصنوعی مورد نظر آموزش داده می‌شود تا با وارد کردن ورودی جدید بتواند نوع تخلیه جزئی را مشخص کند. فلوجارت اجرا و تحلیل تخلیه جزئی در شکل (۷) نشان داده شده است. به منظور آموزش شبکه عصبی مصنوعی، در برنامه MATLAB فرضیات به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

شبکه دارای هشت ورودی می‌باشد که مبین وضعیت شکل حاصل از تست تخلیه جزئی است، خروجی شبکه حالت تخلیه جزئی را نشان می‌دهد، نوع شبکه MLP (پرسپترون) با دو لایه (یک لایه پنهان)، تابع فعال‌ساز لایه پنهان Tansig، تابع فعال‌ساز لایه خروجی Purline، مقدار  $Epoch_{max}$  برابر با ۱۰۰۰ و مقدار  $mse_{min}$  برابر با  $10^{-3}$  (همسایگی بسیار نزدیک به صفر) می‌باشند و روش ارزیابی بر مبنای حداقل مربعات خطا<sup>۱۱</sup> و آموزش بر مبنای روش لونیگ مارکوارت (LM)<sup>۱۲</sup> در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که مطابق تنظیمات پیش‌فرض MATLAB، ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش و ۳۰٪ برای تست و اعتبارسنجی به صورت انتخاب اتفاقی داده‌ها در فرآیند تحلیل شبکه عصبی دسته‌بندی شده‌اند [۱۸].

با توجه به موارد یاد شده در تفسیر شکل‌های تخلیه جزئی، دسته‌بندی (کدینگ) بردار ورودی در جدول (۱) آورده شده است. شایان ذکر است که از مجموع ۲۳۰۰ آزمایش تخلیه جزئی که در این تحقیق بر روی واحدهای میتوسوبیسی نیروگاه ری انجام پذیرفت، به برخی از نتایج حاصل شده از تحلیل نمودارها در جدول (۲) اشاره شده است. در جدول (۳) و شکل (۸) حالت‌های تخلیه در آزمایشات انجام شده بر حسب درصد بیان شده است (برای کل نمونه‌گیری‌ها).

Table (1): Classification of input vectors

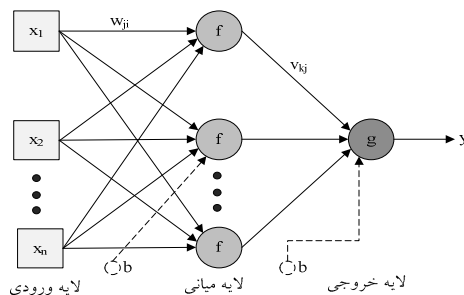
جدول (۱): دسته‌بندی بردار ورودی

شماره سطر	خاصیت	کد	
		بله	خیر
اول	آیا تعداد پالس مثبت از منفی بیشتر است؟	۱	۰
دوم	آیا تعداد پالس منفی از مثبت بیشتر است؟	۱	۰
سوم	آیا تعداد پالس منفی و مثبت یکسان می‌باشد؟	۱	۰
چهارم	آیا در شکل برش‌های تیز وجود دارد؟	۱	۰
پنجم	آیا شکل نامنظم می‌باشد؟	۱	۰
ششم	آیا تغییرات متناوباً تکرار می‌شود؟	۱	۰
هفتم	آیا تعداد پالس مثبت و منفی صفر می‌باشد؟	۱	۰
هشتم	آیا تعداد پالس در نمودار دو بعدی کمتر از صد می‌باشد؟	۱	۰

در ادامه در شکل (۹) نحوه تشخیص وجود تخلیه جزئی با استفاده از شکل سه بعدی نشان داده شده است. شکل‌های (۹-۱) و (۹-۲) دارای دو ردیف پالس می‌باشند که مبین عدم تخلیه جزئی و شکل‌های (۹-۳)

### ۵- تفسیر تخلیه جزئی تست سیستم و آموزش شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، ارتباطات سیناپسی<sup>۷</sup> و ساختار نرونی مغز انسان را مدل‌سازی می‌کنند. شبکه عصبی مغز انسان از مجموعه‌ای از سلول‌های عصبی (نرون)<sup>۸</sup> تشکیل شده است. اطلاعات (داده‌های ورودی) توسط شاخه‌های ورودی نرون که دندریت<sup>۹</sup> نام دارند دریافت می‌شوند. در هسته سلول روی آنها پردازش انجام می‌گیرد و سپس توسط شاخه‌ای خروجی به نام آکسون<sup>۱۰</sup> تحویل نرون‌های بعدی می‌شوند. آکسون‌های یک نرون به دندریت‌های نرون‌های متصل نیستند، بلکه فاصله بسیار کمی با سیناپس بین آنها وجود دارد که می‌توانند تبادل اطلاعات کنند. با در نظر گرفتن مطالب فوق، در شکل (۶) یک شبکه عصبی مصنوعی با یک لایه پنهان نشان داده شده است. در این شبکه عصبی ارتباط بین نرون‌ها ( $X_i$  ها) و خروجی آنها ( $y$ )، به کمک مقادیر پارامترهای وزن سیناپسی ( $w$ )، بایاس ( $b$ ) و توابع فعال‌ساز لایه‌های پنهان خروجی ( $f(x)$  و  $g(x)$ ) بر اساس (۱) و میزان حداقل مربعات خطا طبق (۲) مشخص می‌گردند:



شکل (۶): شبکه عصبی با یک لایه پنهان

Fig. (6): Artificial neural network (ANN) with one hidden layer

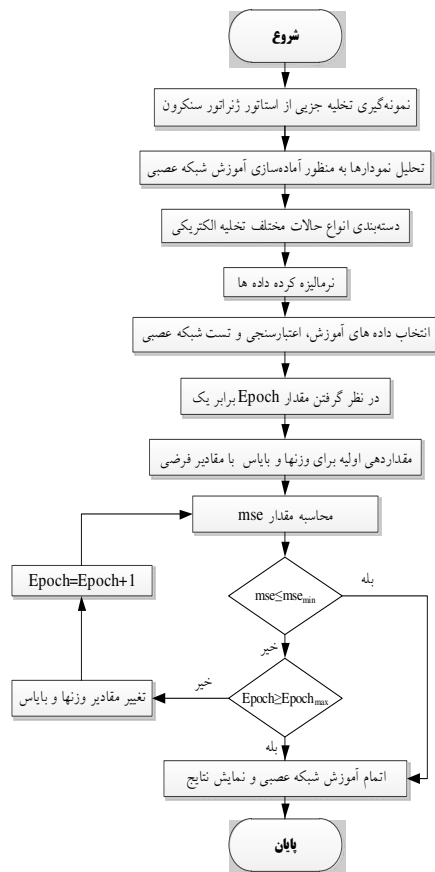
$$y = g \left( \sum_{j=1}^m w_{kj} f \left( \sum_{i=1}^n (w_{ji} x_i + b) \right) + b \right) \quad (1)$$

$$mse_{Total} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2 \quad (2)$$

که در آن،  $X_1, X_2, \dots, X_n$  سیگنال‌های ورودی (معادل سیگنال‌های ورودی از دندریت)،  $w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jn}$  وزن‌های سیناپسی جمع‌شونده به نرون‌ها در لایه پنهان،  $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kj}$  وزن‌های سیناپسی جمع‌شونده به نرون‌ها در لایه خروجی،  $n$  اندیس شمارنده سیگنال ورودی،  $m$  اندیس شمارنده نرون لایه پنهان،  $b$  آستانه خارجی که از آن به‌عنوان بایاس یاد می‌شود و در مقدار ثابت یک ضرب می‌گردد،  $f(x)$  تابع فعال‌ساز در لایه میانی (معادل هسته نرون)،  $g(x)$  تابع فعال‌ساز در لایه خروجی،  $y$  سیگنال خروجی نرون (معادل سیگنال گذرنده از آکسون)،  $y_t$  خروجی فرآیند (واقعی) و  $\hat{y}_t$  خروجی مدل (شبکه عصبی)،  $t$  اندیس شمارنده نمونه‌گیری تست PD و  $N$  تعداد کل نمونه‌گیری‌ها می‌باشند.

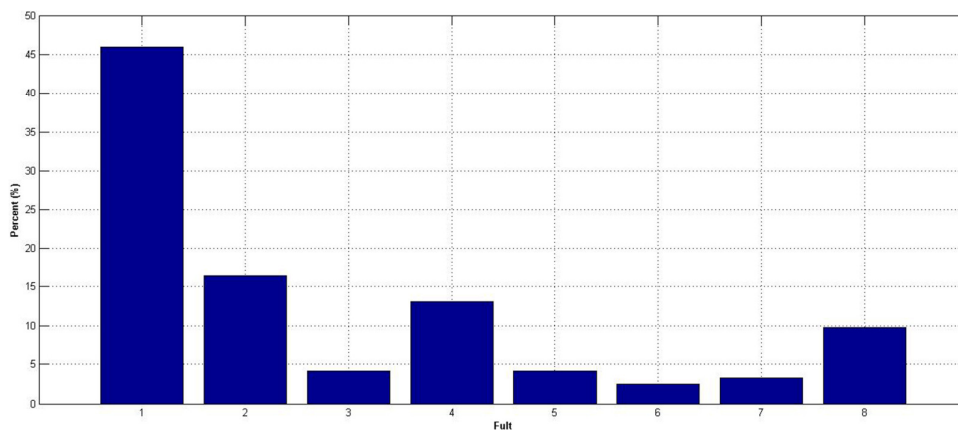
۳) الی (۵-۹) دارای تعداد بیشتری ردیف پالس هستند (بیشتر از دو ردیف) که نشان دهنده تخلیه جزئی می‌باشند. شکل (۹-۶) نیز حالتی را نشان می‌دهد که در انجام آزمایش خطایی رخ داده است و آزمایش متوقف شده است. در ادامه در شکل (۱۰) نمونه‌ای از حالات مختلف

تصاویر دو بعدی آزمایش تخلیه جزئی طبق آنچه در بخش ۴-۳ اشاره شد، آورده شده است.



شکل (۷): فلوچارت اجرا و تحلیل تخلیه جزئی توسط شبکه عصبی

Fig. (7): PD analysis flowchart using ANN



شکل (۸): نمودار میله‌ای حالات مختلف

(الف=1، ب=2، ج=3، د=4، ه=5، و=6، خطا=7، عدم تخلیه=8)

Fig. (8): Different scenarios diagram

Table (2): Some of PD results in test system

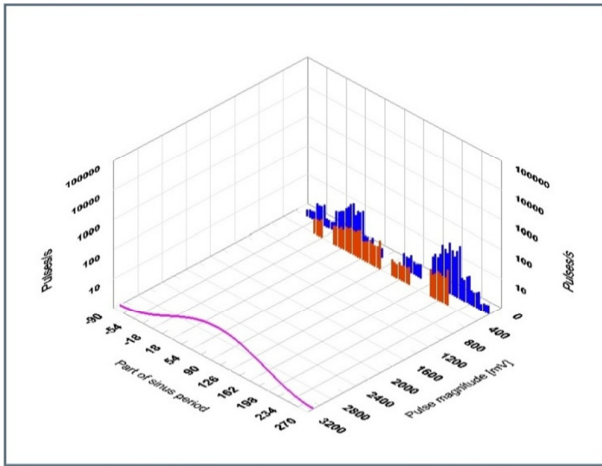
جدول (۲): تعدادی از نتایج تخلیه جزئی در تست سیستم حالت تحلیل تخلیه جزئی در فازها

شماره واحد	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (MVAR)	دمای استاتور (C)	فشار H2 (kpa)			
					R	S	T
32	70	26	45	1	د، الف	د، الف	الف
32	60	20	70	1	د، الف	د، الف	الف
32	47.5	17.5	45	1	ب	ب	الف
32	21	2	64	1	عدم تخلیه	عدم تخلیه	عدم تخلیه
32	15	9	68	1	ه، الف	ه، ب	ه، ب
33	88	22	73	1	عدم تخلیه	عدم تخلیه	عدم تخلیه
33	61	17	57	1	ه، الف	الف	ه، الف
33	61	36	76	1	الف	الف	خطا
33	42	21	82	1	الف	الف	الف
34	15	11	35	1	الف	ب	الف
34	30	10	40	1	الف	ب	ب
34	62	30	70	1	الف	الف	الف
34	62	70	70	1	الف	ب	الف
32	18	8	55	1	د، ب	الف، د	الف
32	70	26	45	1	الف	الف، د	الف
32	53	34	65	1	ج، د	الف، د	خطا
32	26	4	66	1	الف	الف، د	خطا
32	15	9	68	1	ج، د	ب، د	ب، د
32	45	23	60	1	عدم تخلیه	عدم تخلیه	عدم تخلیه
32	25	23	60	1	الف	ب	ب
33	63	30	85	1	الف، د	الف، د	الف، د
33	55	22	73	1	عدم تخلیه	عدم تخلیه	عدم تخلیه
32	47.3	12.35	68.3	1	ب	ب	الف
33	62	18.5	68.7	1	الف	الف	الف
34	56.4	20.41	85	1	الف	الف	الف
32	43.7	26.06	72	1	الف	ج	ج
33	58.04	34.07	76.6	1	الف	و، الف	خطا
34	58.66	23.5	74.4	1	ج	و، الف	الف
33	20.88	19.83	55.2	1	الف	ب	و، ب
34	19.75	14.54	62	1	ب	الف	ب
32	49.6	19.4	74.42	1	الف	ب	ج
33	61.9	24.2	69.5	1	الف	الف	الف
34	62.2	24.2	76	1	الف	الف	الف

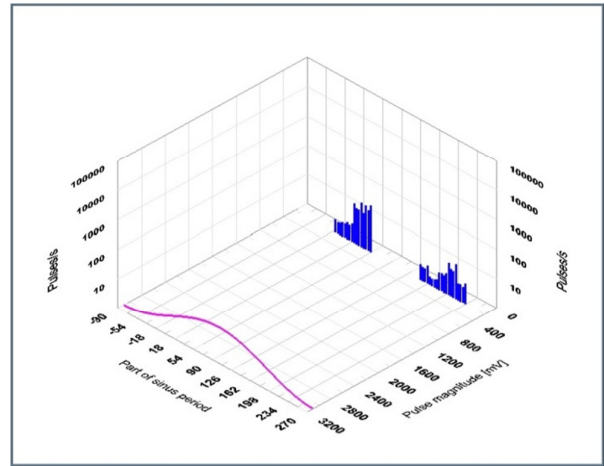
Table (3): Different PD scenarios (%)

جدول (۳): درصد حالت‌های مختلف

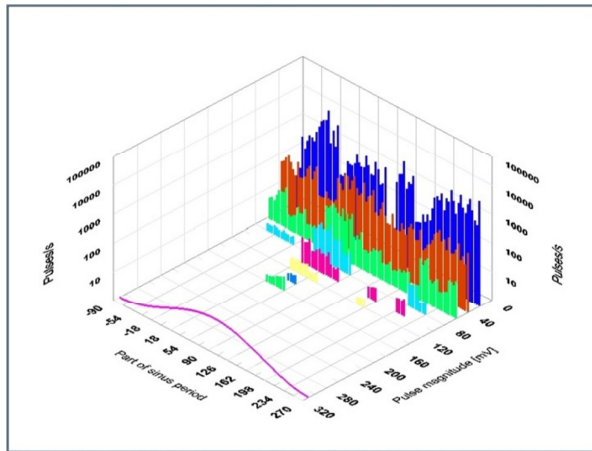
حالت	الف	ب	ج	د	ه	و	خطا	عدم تخلیه
درصد	46%	16.4%	4.1%	13.1%	4.1%	2.46%	3.3%	9.8%



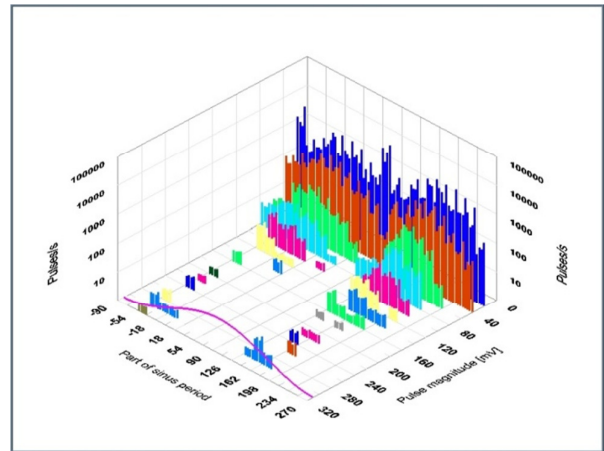
شکل (۹-۱): عدم تخلیه جزئی  
Fig. (9-1): Lack of PD



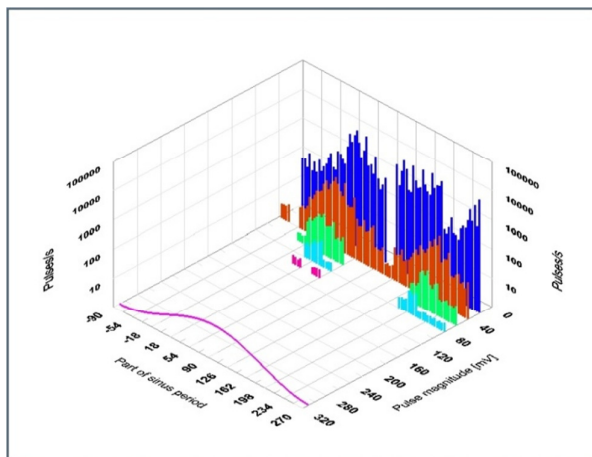
شکل (۹-۲): عدم تخلیه جزئی  
Fig. (9-2): Lack of PD



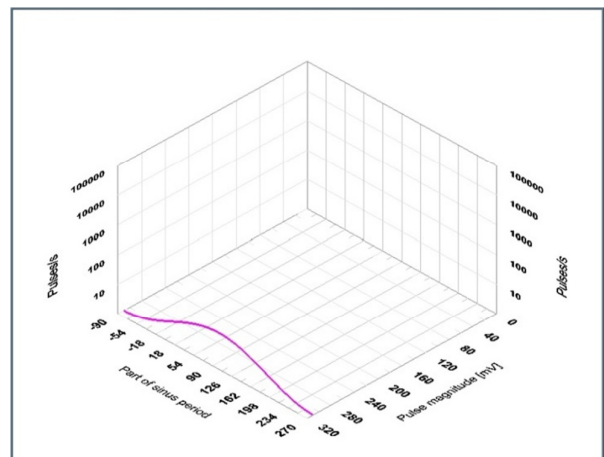
شکل (۹-۳): ایجاد تخلیه جزئی  
Fig. (9-3): PD occurrence



شکل (۹-۴): ایجاد تخلیه جزئی  
Fig. (9-4): PD occurrence



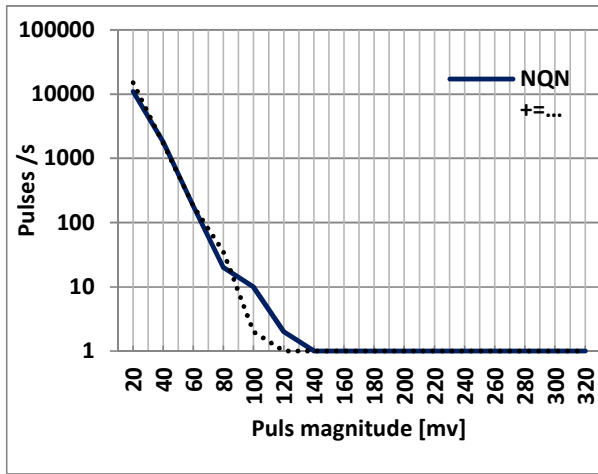
شکل (۹-۵): ایجاد تخلیه جزئی  
Fig. (9-5): PD occurrence



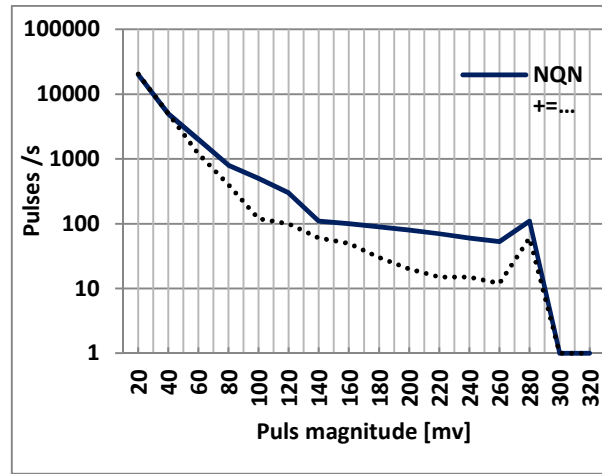
شکل (۹-۶): خطا در انجام آزمایش  
Fig. (9-6): Fault during test

شکل (۹): حالات تحلیل شکل سه بعدی  
Fig. (9): Three-dimensional diagram (phase - amplitude pulses - number of pulses)

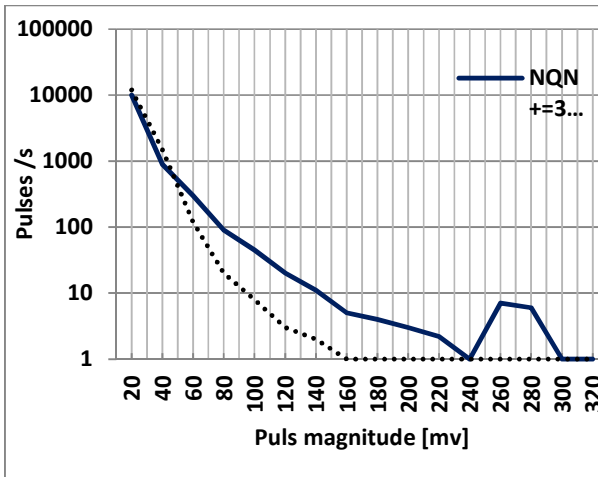




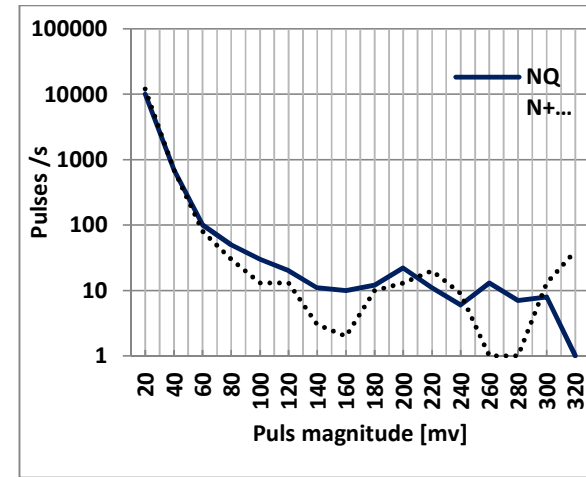
شکل (۱۰-۱): حالت الف  
Fig. (10-1): A scenario



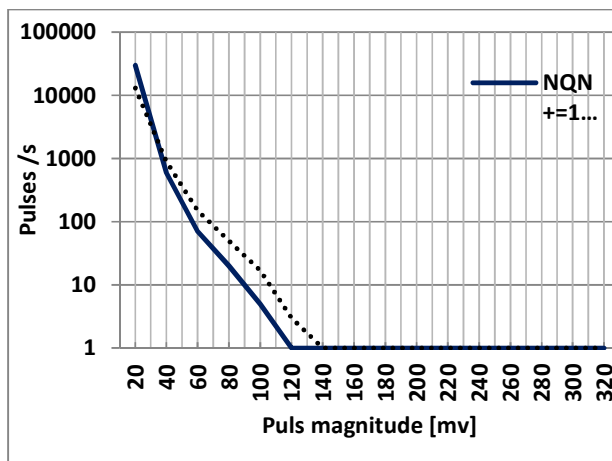
شکل (۱۰-۲): حالت الف-د  
Fig. (10-2): A-D scenarios



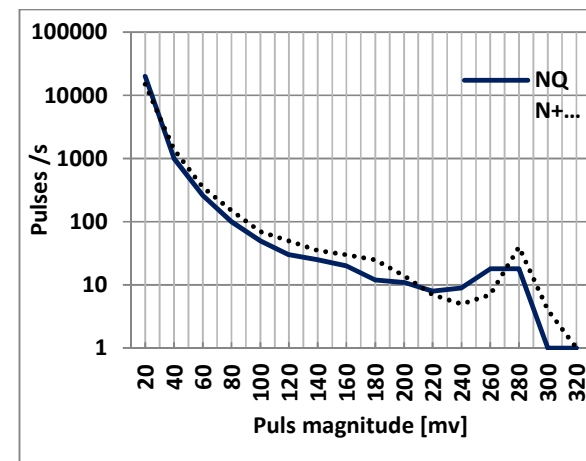
شکل (۱۰-۳): حالت الف-ه  
Fig. (10-3): A-E scenarios



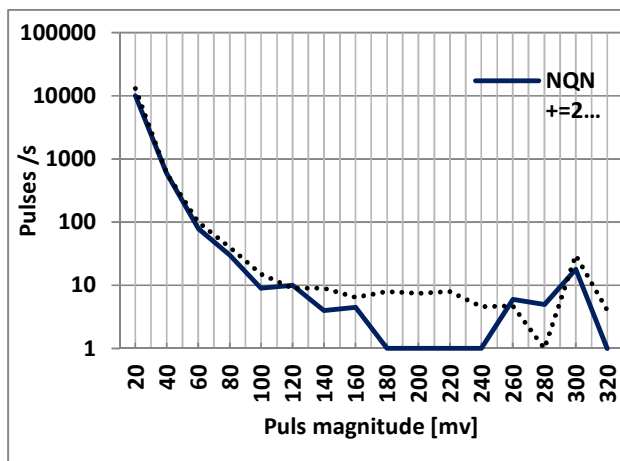
شکل (۱۰-۴): حالت الف-و  
Fig. (10-4): A-F scenarios



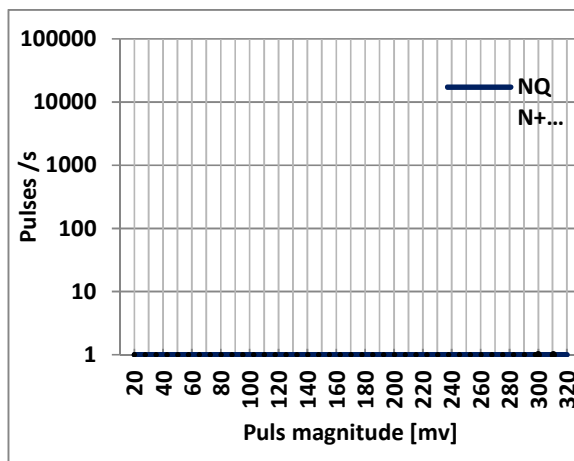
شکل (۱۰-۵): حالت ب  
Fig. (10-5): B scenario



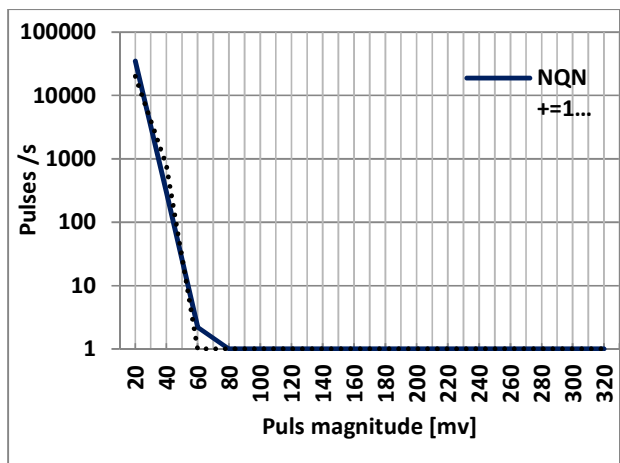
شکل (۱۰-۶): حالت ب-د  
Fig. (10-6): B-D scenarios



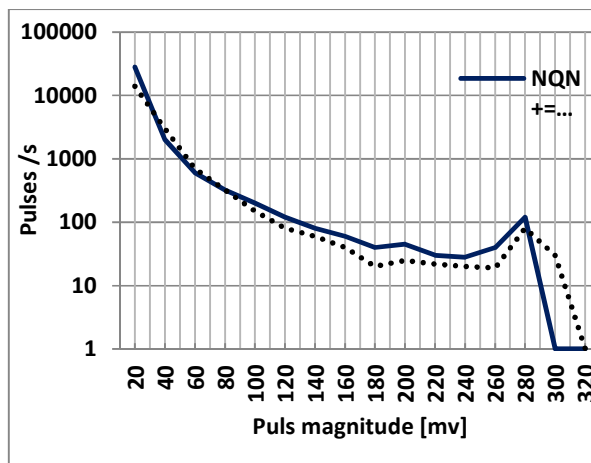
شکل (۷-۱۰): حالت ب-ه  
Fig. (10-7): B-E scenarios



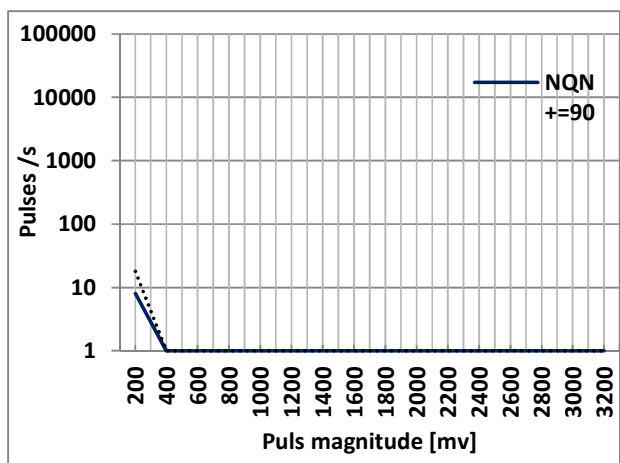
شکل (۸-۱۰): حالت خطا در آزمایش  
Fig. (10-8): Fault during test



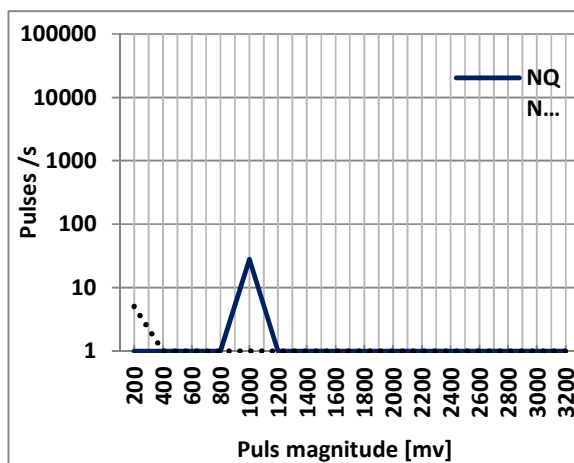
شکل (۹-۱۰): حالت ج  
Fig. (10-9): C scenario



شکل (۱۰-۱۰): حالت ج-د  
Fig. (10-10): C-D scenarios

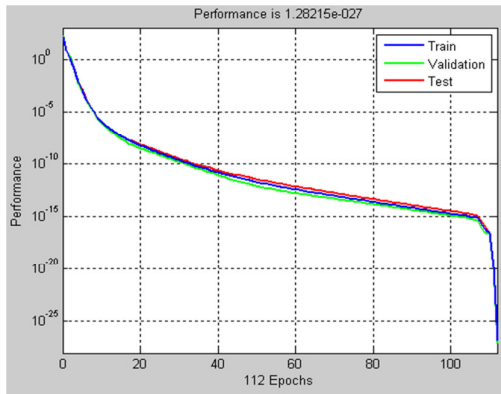


شکل (۱۱-۱۰): حالت عدم تخلیه  
Fig. (10-11): Lack of PD



شکل (۱۲-۱۰): حالت عدم تخلیه  
Fig. (10-12): Lack of PD

شکل (۱۰): حالات تحلیل شکل دو بعدی  
Fig. (10): Two-dimensional diagram (pulse amplitude - the number of pulses)



شکل (۱۳): میزان کارایی در هر تکرار  
Fig. (13): Performance in each iteration.

همگرایی مناسب تخمین خروجی‌های نشان داده شده در شکل (۱۲) حول خط ایجاد شده در رگرسیون خروجی و میزان خطای ایجاد شده در فرآیند آموزش و تست در ۲۳۰۰ نمونه از آزمایش تخلیه جزئی که در شکل (۱۳) ترسیم شده است، مبین صحت کارایی و عملکرد مناسب شبکه عصبی طراحی شده در تشخیص خروجی واقعی می‌باشند. با توجه به موارد اشاره شده در جدول (۲) که به برخی از خروجی‌های به دست آمده از شبکه عصبی اشاره می‌کند، و کارایی مناسب شبکه عصبی که مطابق شکل (۱۳) در حدود خطای بسیار کم  $10^{-27}$  می‌باشد، می‌توان اشاره کرد که واحدهای تست سیستم نمونه، از لحاظ بحث تخلیه جزئی استاتور در وضعیت مناسبی قرار ندارد و رفع عیوب یاد شده حتماً باید در تعمیرات اساسی مورد توجه قرار گیرد.

#### ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون دو لایه به منظور تحلیل تخلیه جزئی مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا ساختار شینه ژنراتور، اشکال و مکان‌های حفره در شینه مطرح گردید. سپس انواع تخلیه‌های الکتریکی جزئی در شینه‌های ژنراتور و اقدامات لازم برای انجام تست بر روی ژنراتورهای تست سیستم نمونه و نحوه تفسیر تست تخلیه جزئی بیان گردید. در نهایت، نتایج به همراه شبکه عصبی طراحی شده، نشان داده شد. نتایج و پیشنهاداتی به شرح ذیل ارائه می‌شود:

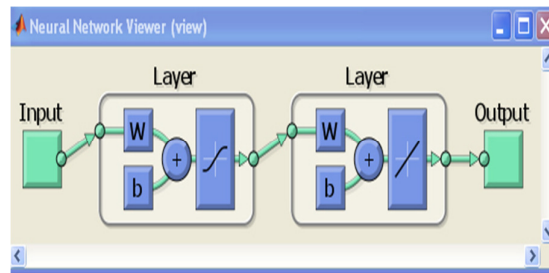
- ۱- با استفاده از تست تخلیه جزئی می‌توان صحت کارایی تعمیرات و نگهداری سیم‌پیچ استاتور ژنراتور را مورد سنجش قرار داد.
- ۲- از آنجا که فرض می‌شود که بسیاری از ژنراتورها در وضعیت مناسب عایقی باشند، معمولاً هزینه مناسبی برای تست تخلیه جزئی و پیدا کردن ژنراتورهای معیوب در نظر گرفته نمی‌شود که پیشنهاد می‌گردد حتماً در تست‌های دوره‌ای و بازدیدهای داغ این تست نیز انجام گیرد.
- ۳- در تست سیستم نمونه که واحدهای میتسویشی نیروگاه گازی بودند، وضعیت تست تخلیه نشان‌دهنده وجود این نوع تخلیه در قسمت‌های مختلف می‌باشد که مناسب است در اولین فرصت بی‌باری و تعمیرات اساسی به منظور جلوگیری از بروز مشکلات عمده‌تر،

در شکل (۱۰-۱) تعداد پالس‌های مثبت از منفی بیشتر می‌باشد و شامل شکلی صاف است. در شکل (۱۰-۲) علاوه بر بیشتر بودن تعداد پالسهای مثبت از منفی، در انتها دارای یک برش به صورت تیز می‌باشد. شکل‌های (۱۰-۳) و (۱۰-۴) نیز به ترتیب مشتمل بر نامنظم بودن و نامنظم به همراه تکرار تناوبی پالسها هستند.

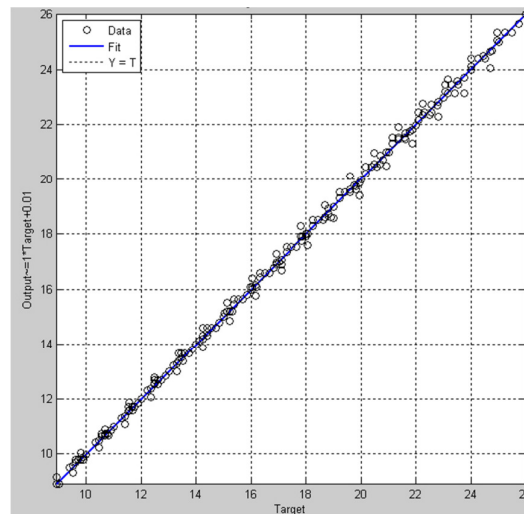
در شکل (۱۰-۵) تعداد پالس‌های منفی از مثبت بیشتر است و شامل شکلی صاف می‌باشد. در شکل (۱۰-۶) علاوه بر بیشتر بودن تعداد پالسهای منفی از مثبت، در انتها دارای یک برش به صورت تیز می‌باشد. شکل (۱۰-۷) نیز دارای شکلی نامنظم و متناوب است.

در شکل (۱۰-۸) پالسی مشاهده نمی‌گردد که مبین ایجاد خطا در فرآیند آزمایش می‌باشد. در شکل (۱۰-۹) تعداد پالسهای مثبت و منفی مشابه یکدیگر هستند. در شکل (۱۰-۱۰) علاوه بر مشابه بودن پالسها، شکل دارای برشی تیز است. در نهایت شکل‌های (۱۰-۱۱) و (۱۰-۱۲) حالاتی را نشان می‌دهد که تعداد پالسها کمتر از ۱۰۰ می‌باشد.

شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) شبکه عصبی، رگرسیون خروجی و میزان کارایی در هر تکرار را که گزارش شده توسط نرم‌افزار MATLAB می‌باشند را نشان می‌دهند:



شکل (۱۱): نمایی از شبکه عصبی  
Fig. (11): ANN structure



شکل (۱۲): رگرسیون خروجی  
Fig. (12): Output Regression

اقدامات پیشگیرانه از جمله تمیز کردن، گوه گذاری مجدد، انجام مجدد وارنیش، محدود کردن بار و کمتر کردن تعداد دفعات استارت واحدها انجام گیرد.

۴- در تست سیستم نمونه بیشترین حالت تخلیه جزئی در محل تماس شینه‌های استاتور با بدنه هسته استاتور مشاهده می‌گردد که به دلیل از بین رفتن ماده هادی پوشش دهنده شینه‌های استاتور و جدا شدن الکتریکی و مکانیکی بدنه شینه‌های استاتور می‌باشد.

۵- با در اختیار بودن فایل نتایج که توسط نرم‌افزار ذخیره می‌شود می‌توان مطالعات مختلفی را به صورت *offline* انجام داد و پیشنهاد می‌گردد در شرکت‌های تولید برق (نیروگاه‌ها) بانک اطلاعاتی از تخلیه جزئی ایجاد گردد.

- پی‌نوشت
1. Partial Discharge (PD)
  2. Rewedging
  3. Revarnishing
  4. Overhang
  5. Partial Discharge Analyser
  6. Directional
  7. Synaptic
  8. Neurons
  9. Dendrits
  10. Axons
  11. Mean Square Error (MSE)
  12. Levenberg-Marquart (LM)

### References

- [1] G.C. Stone, "A perspective on online partial discharge monitorin for assessment of the condition of rotating machine stator winding insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation Magazine, Vol. 28, No. 5, pp. 8-13, Sep./Oct. 2012.
- [2] C. Greg, G.S. Howard, J.C. Michael, "Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No.2, pp.459-464, Mar-Apr. 1996.
- [3] B.Y. C. Xiaolin, Y. Cheng, J. Song, H. Xie, "Diagnosis of stator winding insulation of large generato based on partial discharge measurement", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, pp. 387-395, Jun. 2006.
- [4] C. Hundon, M. Bele, M. Levesque, "Study of slot partial discharges in air-cooled generators", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6 , pp. 1675-1690, Dec. 2008.
- [5] IEEE Trial-Use Guid to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, IEEE Standard 1434-2000, April. 2000.
- [6] S. Ahmadi, M.R. Naghashan, M. Shadman, "Partial discharge detection during electrical aging of generator bar using acoustic technique", Proceeding of the IEEE/ISEI, pp. 576-578, San Juan, USA, Jun. 2012.
- [7] X. Chen, Y. Cheng, B. Yue, H. Xie, "Study of epoxy/mica insulation deterioration in generator stator using ultra-wide band partial discharge testing technique", Polymer Testing, Vol. 25, No. 6, pp. 724-730, Sep. 2006.
- [8] W. Yuanone, G. Chuangli, W. Zhipeng, D. Pengcheng, "Partial discharge online monitoring for hyro-generator", Proceeding of the IEEE/CDCIEM, Changsha, China, Feb. 2011.
- [9] H. Kazuyoshi, F. Kazushi, S. Honda, M. Kaneko, "Development of portable partial discharge monitor for generator stator windings in hydro power station", Proceeding of the IEEE/ICEMS, Wuhan, China, Oct. 2008.
- [10] M. Ekhavat, M.R. Naghashan, "Fault diagnosis and pattern recognition of partial discharge test on generator bars using an ultrasonic sensor", Proceeding of the PSC, Tehran, Iran, Nov. 2013.
- [11] C. Hudon, M. Belec, "Extracting partial discharge signals of generator based on elevated minimum description length criterion and fast fourier transform", Proceeding of the IEEE/ICMTMA, pp. 222-225, Zhangjiajie, China, Apr. 2009.
- [12] S. Arumugam, S. Gorchakov, T. Schoenemann, "Partial discharge investigations on a high voltage generator cable insulation through TF method ", Proceeding of the IEEE/CEIDP, pp. 1101-1104, Shenzhen, China, Oct. 2013.
- [13] Construction and Training Jihad Organization, "Turbin and generator maintenance documents", Rey Power Generation Managemnt Company, Rey, Tehran, Tech. Rep. TR-J-031, Jan. 1997.
- [14] C. Hudon, M. Belec, "Partial discharge signal interpretation for generation diagnostic", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, pp. 297-319, Mar-Apr. 2005.
- [15] G.C. Stone, M. Sasic, D. Dunn, I. Culbert, "Recent problems experienced with motor and generator winding", Proceeding of the IEEE/PCIC, pp. 1-9, Anaheim, USA, Sep. 2009.
- [16] J. Yang, T.J. Kang, B. Kim, S.B. Lee, Y.W. Yoo, D. Kang, J. Cho, H. Kim, "Experimental evaluation of using the surge pd test as a predictive maintenance tool for monitoring turn insulation quality in random wound ac motor stator windings", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 1, pp.53-60, Feb. 2012.
- [17] KES International LTD, "Partial discharge analyser manual", [Online]. Available: <http://www.kesengineering.com>.
- [18] Mitsubishi Heavy Industries LTD, "Mitsubishi gas turbine documents", Rey Power Generation Management Company, Rey, Tehran, Tech. Rep. TR-M-012, Nov. 1978.
- [19] M.B. Menhaj, "Fundamental of neural networks", Vol. VIII, Tehran: Amir Kabir University, 2011.