

# مقایسه تخلیه الکتریکی جزئی شینه ژنراتور، عایق‌بندی شده به روش Resin Rich و VPI با و بدون لایه تنظیم میدان داخلی

محمد رضا نقاشان  
دانشگاه صنعت آب و برق

مجتبی اخوات  
شرکت فن‌آوران انرژی مدبر

چکیده در این مقاله نتایج اندازه‌گیری تخلیه جزئی (PD<sup>۱</sup>) الکتریکی بر روی دو شینه ژنراتور با سیستم عایقی نوار پُررزین (RR<sup>۲</sup>) و دو شینه ژنراتور با سیستم عایقی تحت خلاء و فشار (VPI<sup>۳</sup>) ارائه گردیده است. از هر سری از شینه‌ها، یک شینه دارای لایه تنظیم میدان داخلی (ICP<sup>۴</sup>) و یک شینه فاقد این لایه می‌باشند. نتایج آزمایشات کمک مؤثری به انتخاب صحیح سیستم عایقی نموده است.

واژه‌های کلیدی — تخلیه الکتریکی جزئی، سیستم عایقی Resin Rich، سیستم عایقی VPI، شینه ژنراتور، لایه‌ی تنظیم میدان داخلی

حفاظت در برابر کرونا و تنظیم میدان به سه دسته زیر تقسیم می‌شود:

- لایه تنظیم میدان داخلی (ICP)
  - لایه تنظیم میدان خارجی (OCP<sup>۵</sup>)
  - لایه تنظیم میدان انتهایی (ECP<sup>۶</sup>)
- همچنین دو نوع سیستم عایقی در ساخت شینه‌های نیروگاهی کاربرد دارد که عبارت‌اند از سیستم پُررزین و سیستم پخت تحت فشار و خلاء.

## ۱-۱- لایه‌ی تنظیم میدان داخلی (ICP)

این لایه یک سیستم نیمه‌هادی درجه‌بندی برای ایجاد حفاظت کرونای داخلی است که مستقیماً بر روی بخش

## ۱- مقدمه

بیشتر شکست‌ها در ژنراتورهای فشارقوی ناشی از بروز عیب در سیستم عایقی می‌باشد که اغلب نتیجه تدریجی و مجموع اثرات مخرب تخلیه‌جزئی بر روی سیستم عایقی می‌باشد. از این رو عایق الکتریکی شینه ژنراتور نقش مهمی در عملکرد ژنراتورهای فشارقوی برای استقامت در برابر تنش‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی بالا در طول بهره‌برداری ایفا می‌کند [۱].

نوع سیستم عایقی و لایه‌های حفاظتی به‌کاررفته، در کیفیت عایق و تخلیه جزئی آن تأثیرگذار می‌باشد. لایه‌های

5- Outer Corona Protection (OCP)  
6- End Corona Protection (ECP)

1- Partial Discharge (PD)  
2- Resin Rich (RR)  
3- Vacuum Pressure Impregnation (VPI)  
4- Inner Corona Protection (ICP)

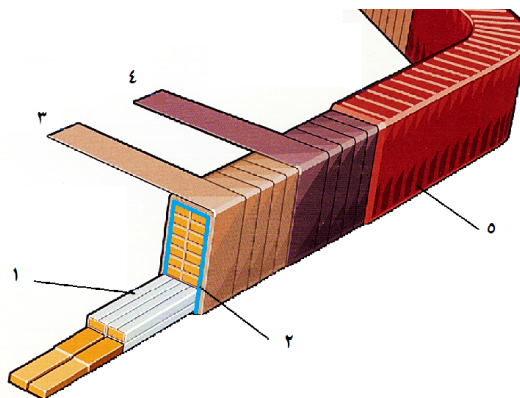
### ۱-۳- سیستم پخت تحت فشار و خلاء (VPI)

معمولاً نوار این نوع سیستم عایقی دارای رزین کمی می‌باشد و می‌تواند به راحتی توسط رزین اشباع شود. در این روش سیم‌پیچ، شینه و یا کل ماشین در داخل تانک VPI قرار می‌گیرد.

سیستم عایق‌کاری به روش VPI اولین بار با استفاده از بیتومن<sup>۱</sup> یا قیر جهت عایق‌کاری شینه ژنراتورهای فشارقوی صورت گرفت. پولک‌های درشت میکا بر روی صفحه‌ای از کاغذ نشانده شده و مجدداً صفحه کاغذ دیگری آن را می‌پوشانید. این صفحات توسط دست بر روی شینه‌ها و کلاف‌های ژنراتور پیچیده شده و سپس با نوار کتان پوشانده می‌شدند. شینه‌ها و کلاف‌ها سپس در داخل یک تانک که با بخار گرم شده، قرار می‌گرفتند. در مرحله بعد تانک توسط یک پمپ، تحت خلاء قرار می‌گرفت، در نتیجه هوای موجود در لابه‌لای عایق به بیرون هدایت می‌گردید در دوره خلاء فشار به حدود ۰/۱ بار کاهش می‌یابد و تحت دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شود. این مرحله چندین ساعت به طول می‌کشد. در این حالت تانک توسط قیر داغ پر می‌شد و توسط گاز نیتروژن تحت فشار ۸۰ psi قرار می‌گرفت. این مرحله نیز چندین ساعت به طول می‌کشید تا قیر کاملاً به داخل عایق نفوذ کند. سپس قیر اضافی توسط فشار گاز نیتروژن به تانک ذخیره بازگردانده می‌شد. سیم‌پیچ از تانک خارج شده و اجازه داده می‌شد تا خنک و سخت شود. در انتها نوارهای کتان از دور سیم‌پیچ و شینه باز می‌شد. این روش متشکل از سه پروسه، خلاء (Vacuum)، اشباع سازی (Impregnation) و فشار (Pressurizing) به نام سیستم VPI نام گرفت [۳].

در سال‌های بعد، استفاده از این روش توسعه یافت و به جای بیتومن از رزین‌های مصنوعی هیدروکربنی استفاده شد. امروزه در این سیستم، نوارهای میکا که حاوی مقدار کمی رزین می‌باشند در عایق‌کاری شینه‌های ژنراتور استفاده می‌شوند. مقدار کم رزین در نوار میکا نیز فقط به منظور تهیه نواری قابل انعطاف برای سیم‌بندی می‌باشد که توسط ماشین‌هایی تا سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه، جهت نوارپیچی شینه‌ها و کلاف‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. جزئی از این رزین جهت اشباع کردن میکا و جزئی دیگر جهت ایجاد چسبندگی با سایر مواد موجود در نوار می‌باشد. از جمله مواد موجود در نوار عبارت‌اند از پارچه شیشه، کتان یا ابریشم

ترانسپوز شده شینه به کار گرفته می‌شود. مطابق با شکل (۱) این نوار قبل از نوار عایق اصلی شینه، به دور دسته استرندها پیچیده می‌شود. عملکرد آن تساوی سازی ولتاژ در طول سطح شینه به منظور تضمین توزیع همگن میدان الکتریکی بر روی دیواره هسته شیار می‌باشد. شکل (۱) لایه‌های مختلف سیستم عایقی مربوط به شینه ژنراتور را نمایش می‌دهد.



شکل (۱): لایه‌های مختلف سیستم عایقی مربوط به شینه ژنراتور (۱-عایق استرندها ۲- ICP ۳- عایق اصلی ۴- OCP ۵- ECP)

### ۱-۲- سیستم عایقی پُررزین (RR)

در این سیستم عایقی، نوار میکای پُررزین معمولاً به صورت نیمه همپوشانی با کشش حدود ۵۰ نیوتن، به دور بسته‌های هادی پیچیده می‌شود. با انتخاب تعداد دور دقیق نوارپیچی، ضخامت مورد نظر عایقی تعیین می‌شود. سپس شینه و یا کلاف نوارپیچیده شده در میان پرسی با دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. در این روش دو دما مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای اول جهت غرق شدن سیم‌پیچ در رزین و دمای دوم که در حدود ۱۵۰ الی ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و می‌تواند تا یک ساعت به طول بیانجامد جهت سخت شدن عایق می‌باشد. فشار پرس نیز بایستی کاملاً یکنواخت باشد تا رزین در تمامی نقاط به صورت صحیح و متقارن توزیع شود و ضخامت دقیق عایقی استحصال گردد. چنانچه روند گرمایشی و فشار به نحو صحیح صورت نگیرد، تماس بین لایه‌های عایق و یا تماس بین هادی و عایق ضعیف خواهد بود. در این مرحله بایستی دقت شود که از چروک شدن عایق مخصوصاً در کناره و زوایا جلوگیری به عمل آید. سپس مرحله پخت عایقی سرکلاف‌ها می‌رسد که تحت فشار نوارهای شرینگ و در دمای حدود ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌پذیرد [۲].

1- Bitumen

نمونه دارای لایه تنظیم شدت میدان داخلی (ICP) و یک نمونه فاقد این لایه می‌باشد. نوع لایه تنظیم میدان داخلی نیز ماستیک نیمه‌هادی<sup>۱</sup> می‌باشد که در نواحی ترانسپوز استرندها<sup>۲</sup> به کار برده شده است. طول هر شینه حدود چهار متر، ضخامت عایق آن چهار میلی‌متر و نوع رزین نیز اپوکسی می‌باشد. شینه‌ها در هنگام تست در درون شیپار آهنی قرار گرفته‌اند.

### ۳- مشخصه سیستم اندازه‌گیری تخلیه جزئی

سیستم اندازه‌گیری تخلیه جزئی نیز یک دستگاه اندازه‌گیری با پهنای باند ۵۰ الی ۸۰۰ کیلوهرتز منطبق با استاندارد IEC60270 می‌باشد و جهت کوپلاژ سیگنال تخلیه جزئی نیز از یک خازن ۱۲۰۰ پیکوفاراد استفاده شده است [۶].

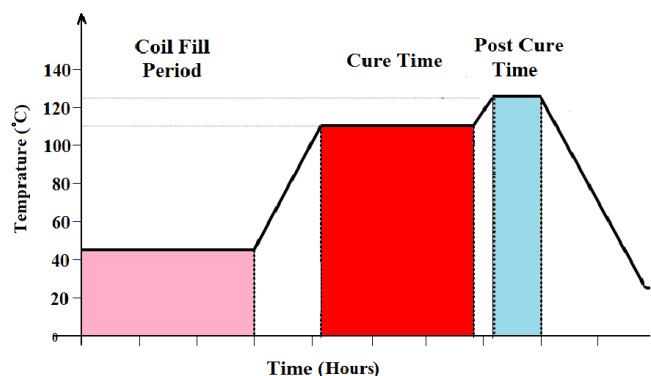
### ۴- نتایج اندازه‌گیری

قبل از شروع به اندازه‌گیری تخلیه جزئی، هر شینه حداقل به مدت ۱۰ دقیقه تحت ولتاژ نامی قرار می‌گیرد تا تخلیه داخلی آن به مرز پایدار برسد. ولتاژ تست نیز برابر ولتاژ نامی می‌باشد. برای مقایسه نتایج در این مقاله از نمودار بار تخلیه<sup>۳</sup> برحسب فاز ولتاژ اعمالی، نمودار جمع بار تخلیه<sup>۴</sup> برحسب فاز ولتاژ و نمودار تعداد تخلیه<sup>۵</sup> برحسب بار تخلیه استفاده شده است. یک جدول مقایسه‌ای نیز حداکثر دامنه تخلیه، جمع بار تخلیه‌ها، درصد تخلیه‌های معکوس و درصد جمع بار تخلیه‌های منفی را برای هر شینه نشان می‌دهد. بالاتر بودن درصد تخلیه‌های منفی و تخلیه‌های معکوس نشانگر وجود حفره یا شکاف در مجاورت هادی و عدم چسب مناسب هادی و عایق می‌باشد [۷]. برای رسم نمودارها از ۳۶۰ پنجره فاز (هر پنجره یک درجه) استفاده شده است. طول مدت اندازه‌گیری تخلیه جزئی نیز برای تمامی شینه‌ها یکسان انتخاب شده است. نتایج اندازه‌گیری در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) و جدول (۲) مشاهده می‌شوند.

به‌عنوان نگه‌دارنده پولک‌های میکا. پارچه بافت شیشه به دلیل مشخصات مکانیکی، حرارتی و الکتریکی خود بیشترین کاربرد را امروزه در این روش دارد. مشخصات نوارهای استاندارد RR و VPI با نگه‌دارنده بافت شیشه در جدول شماره (۱) مشاهده می‌شود [۴]. شکل (۲) نیز نمونه‌ای از روند عایق‌کاری به روش VPI را برای یک تجهیز خاص نشان می‌دهد [۵]. امروزه دمای دوره سخت شدن عایق در این روش به بیش از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

جدول (۱): مشخصات نوارهای "RR" و "VPI" [۲]

	RR	VPI
میکا [%]	۵۴	۶۲
رزین [%]	۳۶	۲۸
شیشه [%]	۱۰	۱۰
$\lambda$ [W/mK]	۰/۲۵	۰/۲۸
$E_N$ [kV/mm]	۲/۷۵	۲/۹
D [mm/18kV]	۳/۸	۳/۶
TTC [W/m <sup>2</sup> K]	۶۶	۷۷



شکل (۲): نمونه‌ای از روند عایق‌کاری به روش "VPI" [۳]

### ۲- مشخصات شینه‌های مورد آزمایش

شینه‌های مورد آزمایش، جهت به‌کارگیری در یکی از ژنراتورهای نیروگاهی تولید شده‌اند. این آزمایشات به‌منظور مقایسه شینه‌ها از نظر دامنه‌ی تخلیه جزئی می‌باشد و هر چهار شینه منحصراً توسط یک سازنده تولید شده‌اند. دو نمونه از این شینه‌ها دارای سیستم عایقی از نوع VPI می‌باشد و در ساخت دو شینه دیگر از نوار نوع RR استفاده شده است. ضمناً از دو شینه ساخته شده در هر روش، یک

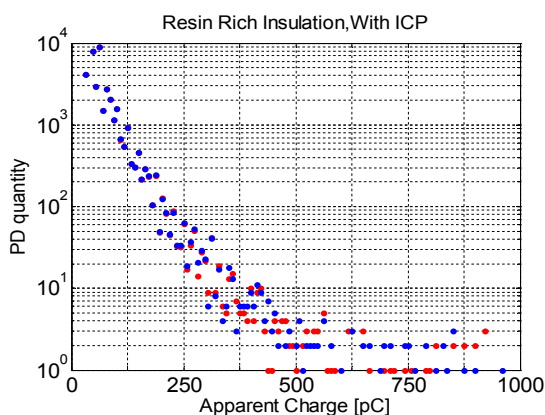
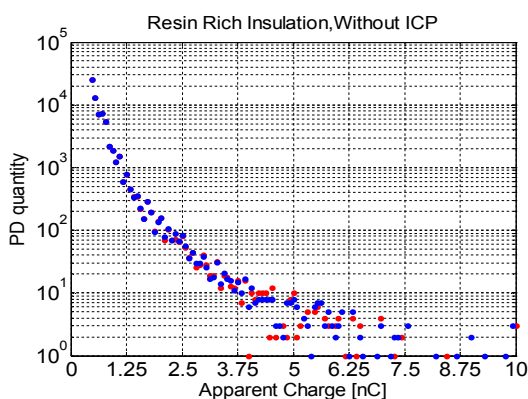
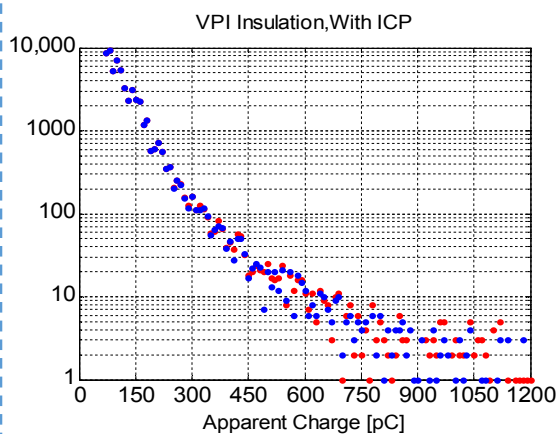
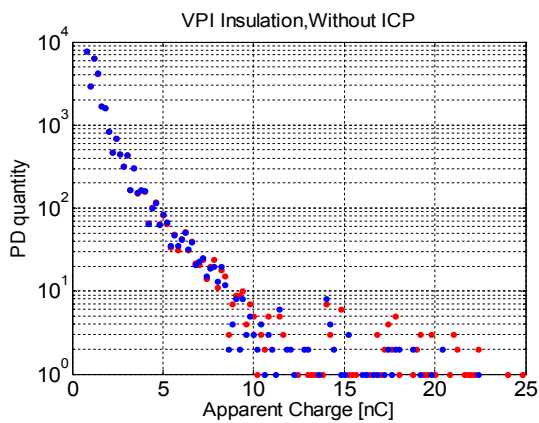
- 1- Semiconductor mastic
- 2- Strand
- 3- Apparent charge
- 4- Total integrated charge
- 5- PD quantity

جدول (۲): مقایسه مشخصات تخلیه جزئی شیشه‌ها

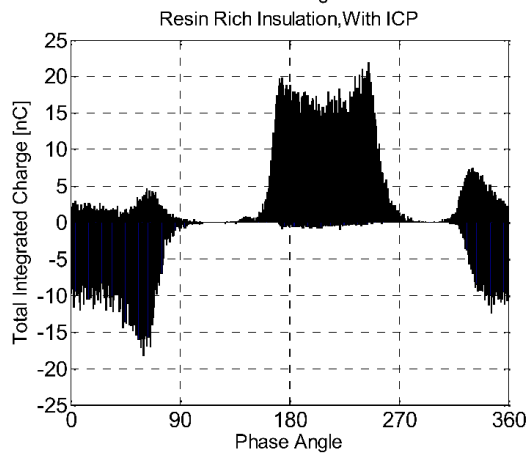
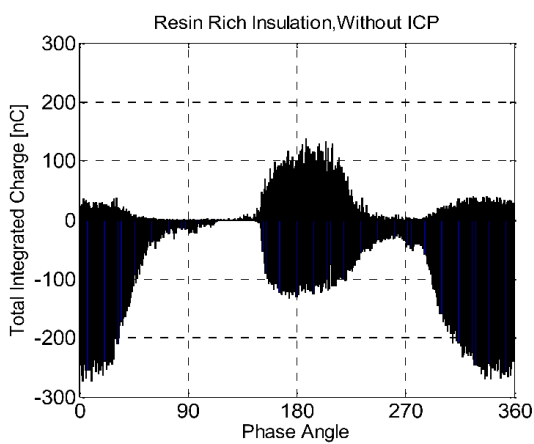
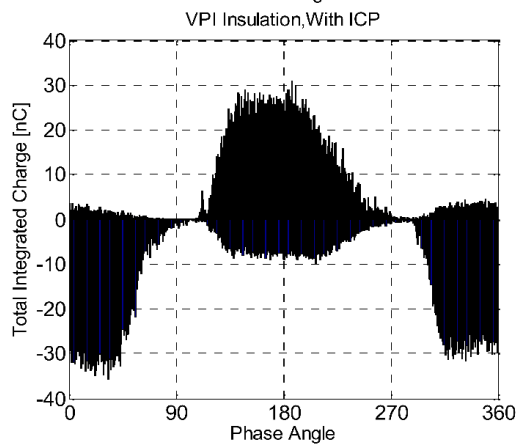
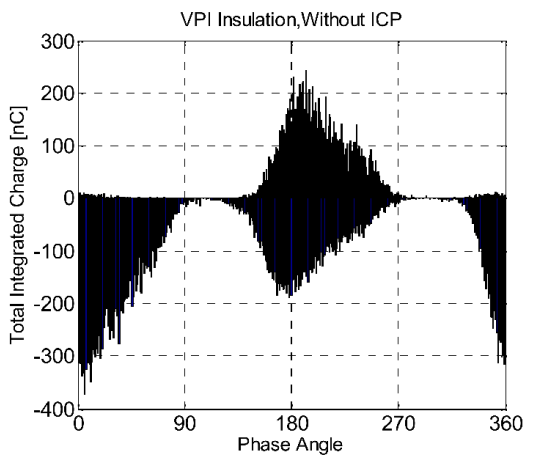
نوع عایق	درصد تخلیه‌های معکوس	درصد جمع بار تخلیه‌های منفی	جمع بار تخلیه [μC]	حداکثر دامنه تخلیه جزئی [nC]
RR with ICP	۱۲	۳۶	۳/۵	۰/۸۵
RR without ICP	۲۹	۷۷	۴۸/۶	۸/۹
VPI with ICP	۱۵	۵۹	۷/۸	۱/۱
VPI without ICP	۲۷	۷۲	۴۶/۲	۲۱

### ۵- بحث

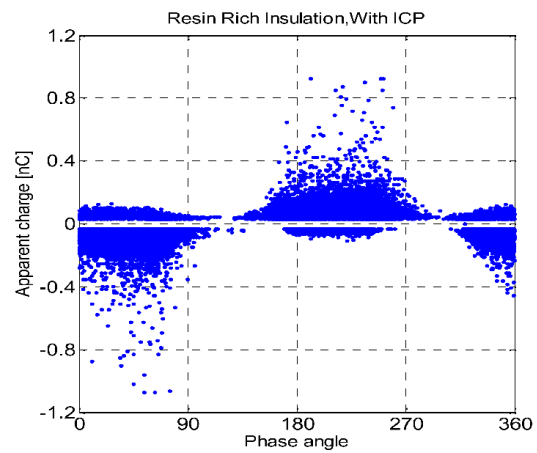
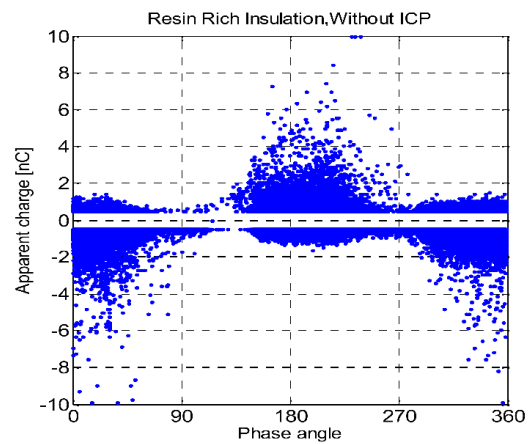
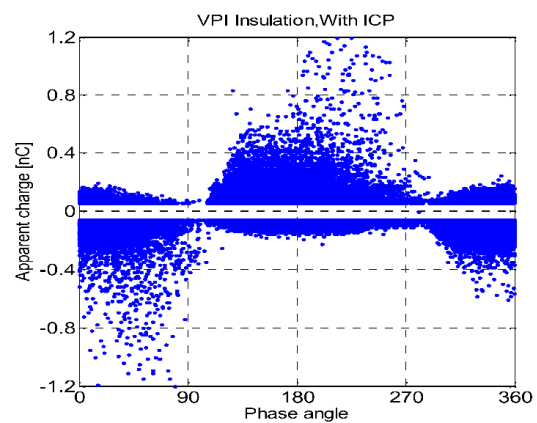
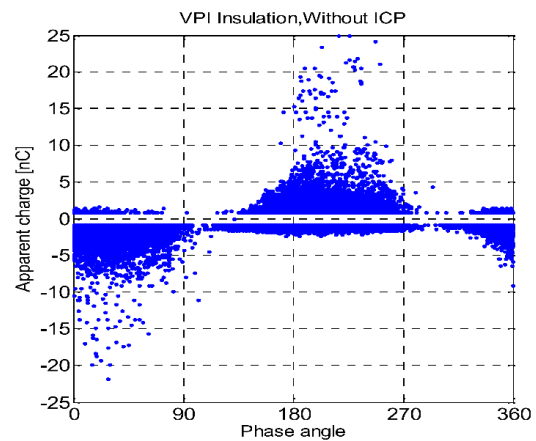
- بالا بودن درصد تخلیه‌های منفی در شیشه‌های بدون لایه تنظیم میدان داخلی نشان‌دهنده وجود حفره در مرز تماس هادی و عایق می‌باشد. عدم نفوذ رزین در نواحی ترانسپوز استرندها یکی از عوامل این عیب می‌باشد.
- بالاتر بودن درصد تخلیه‌های معکوس در شیشه‌های بدون لایه تنظیم میدان داخلی نیز مؤید موضوع فوق می‌باشد.
- با توجه به ضخامت عایقی شیشه مورد نظر، سیستم عایقی بدون کاربرد لایه تنظیم میدان داخلی برای این شیشه نمی‌تواند توصیه گردد.
- دامنه تخلیه و جمع بار تخلیه ثبت‌شده نیز برای شیشه‌های بدون لایه تنظیم میدان داخلی نمی‌تواند مورد قبول باشد. این مقدار بار تخلیه معمولاً در شیشه‌های کارکرده با درصد تخریب بالا مشاهده می‌شود [۸].
- مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شیشه‌های دارای لایه تنظیم میدان داخلی نشان می‌دهد که عایق‌بندی با روش نوار پررزین در این نمونه‌ها موفق‌تر بوده است.



شکل (۳): نمودار تعداد تخلیه برحسب بار تخلیه جزئی شیشه (نقاط آبی‌رنگ برای تخلیه منفی و نقاط قرمز رنگ برای تخلیه‌های مثبت می‌باشند)



شکل (۵): نمودار جمع بار تخلیه بر حسب فاز ولتاژ اعمالی



شکل (۴): نمودار بار تخلیه بر حسب فاز ولتاژ اعمالی

## نتیجه‌گیری

آزمایشات تخلیه الکتریکی جزئی بر روی شینه‌ها و یا کلاف‌های فشارقوی می‌تواند نقاط مثبت و یا منفی سیستم عایقی را به دست آورد. انجام این آزمایشات در هنگام انتخاب و یا طراحی یک سیستم عایقی، کمک شایانی به خریدار، کارفرما و همچنین سازنده می‌نماید.

## منابع

- [1] M. R. Naghashan, "Untersuchungen zur Teilentladungsaktivitaet von maschinentypischen Hochspannungsisolierungen", University Thesis, 1996, University of Dortmund
- [2] A. Helgeson, "Analysis of dielectric response measurement methods and dielectric properties of resin-rich insulation during processing", University Thesis, 2000, University of Stockholm.
- [3] G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, "Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, And Repair", IEEE Press, ISBN: 0-471-44506-1, 2004
- [4] J. Pyrhönen, "Design of rotating electrical machines", 2008 John Wiley & Sons, Ltd
- [5] J. H. Chrzanowski, "Mold & VPI Process for Modular Coils", 2003, NCSX Peer Review
- [6] M. R. Naghashan, "A Broadband computer aided partial discharge measuring system for rotating machine stator insulation", 9<sup>th</sup> International Power System Conference, 1994
- [7] محمدرضا نقاشان، «تجاری در اندازه تخلیه الکتریکی جزئی در عایق ژنراتور (شاخصی برای کیفیت سیستم عایقی)»، پنجمین کنفرانس تخلیه الکتریکی جزئی، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۳
- [8] G. C. Stone, "Effect of manufacturer winding age and insulation type on stator winding partial discharge levels", DEIS, 2004