

بررسی پدیده Brittle Fracture در مقره های کامپوزیت فشار قوی

سید هادی حسینی^۱

حمید ایران منش^{۱و۲}

سعید قربانی^۲

S.Hadi.Hosseini@Gmail.com

HIranmanesh@graduate.uk.ac.ir

Saeed_ghorbani@graduate.uk.ac.ir

۱ - گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران

۲ - هسته پژوهشی سیستمهای قدرت، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده: این مقاله به بررسی اجمالی نوعی پدیده شکست موسوم به Brittle Fracture در مقره های کامپوزیت می پردازد. با وجود اینکه آمار نسبتاً کمی از وقوع این نوع شکست در دنیا گزارش شده است، اما شکست کامل مقره در هنگام کار و خطرات ناشی از پایین افتادن هادی های فشار قوی، موجب انجام تحقیقات گسترده ای در این مورد شده است.

کلمات کلیدی: مقره کامپوزیت، میله FRP، هسته، روکش، یراق آلات، (BF) Brittle Fracture.

۱- مقدمه

امروزه ما در اواسط انقلاب جدیدی هستیم که با پیدایش کامپوزیتهای پیشرفته (Advanced Composite Materials) آغاز گردیده است. این کلاس جدید از مواد، با پیوند اجزای کاملاً مختلف و غیرمشابه به یکدیگر بوجود می آیند. بطوریکه عملکرد آنها با هم، باعث تواناییها و خواصی می شوند که بسیار فراتر و بهتر از خواص هریک از آن مواد بطور جداگانه می باشد. خواص منحصر بفرد این مواد آنها را بعنوان عوامل مهمی در پیشرفتهای تکنولوژیکی مطرح ساخته است [۱].

از میان انواع مختلف کامپوزیتهای پلیمری بطور گسترده ای در صنعت برق بخصوص در ساخت نسل جدید مقره ها موسوم به مقره های پلیمری (مقره های کامپوزیت) مورد استفاده قرار گرفته اند.

اکنون مقره های کامپوزیت پس از گذشت بیش از سه دهه از عرضه آنها به صنعت برق و انجام اصلاحات در طراحی و مواد مصرفی آنها، بعنوان محصولاتی کاملاً شناخته شده و مناسب در خطوط فشارقوی، مورد استفاده قرار می گیرند.

برخلاف مقره های سرامیکی رایج که تنها از یک ماده عایقی تشکیل می شوند و این ماده هم مسوول عملکرد الکتریکی مقره و هم مسوول عملکرد مکانیکی آن است، مقره های کامپوزیت حداقل از دو ماده عایقی تشکیل می شوند یکی برای تامین خواص الکتریکی (روکش پلیمری مقره (housing)) و دیگری برای تامین خواص مکانیکی آن (هسته

کامپوزیت). قرار گرفتن این دو قسمت در کنار هم، مزیت‌های چون وزن سبک و مقاومت در برابر تخریب انسانی (Vanadalism) را برای این نوع مقره‌ها بخصوص در کاربردهای فشارقوی، موجب شده‌است. باتوجه به موارد بیان شده، می‌توان سه جزء اصلی برای یک مقره کامپوزیت در نظر گرفت:

هسته (میله) کامپوزیت: هسته کامپوزیت، میله FRP (Fiber Reinforced Polymeric Rod) نیز نامیده می‌شود و وظیفه تحمل بار کششی وارد شده از طرف هادی به آن و انتقال آن به دکل را برعهده دارد و استقامت الکتریکی لازم را نیز تامین می‌نماید.

روکش (چتر) پلیمری (Polymeric Housing or Polymeric Sheds): روکش پلیمری مقره، به منظور حفاظت هسته از هوازدگی و اثرات مخرب رطوبت و شرایط جوی و افزایش ولتاژ لازم برای شکست الکتریکی و ایجاد جرقه، روی هسته را می‌پوشاند.

یراق آلات (End-fittings): هسته مقره کامپوزیت از دو انتها توسط یراق‌آلات حمایت می‌گردد که این یراق‌آلات مسئول برقراری ارتباط مکانیکی و انتقال بار از هادی دارای ولتاژ بالا به هسته مقره و از آنجا به برج می‌باشد.

با طراحی دقیق مقره‌های کامپوزیت این مقره‌ها، مزایای بسیار زیادی بخصوص از لحاظ خواص عایقی نسبت به مقره‌های معمولی خواهند داشت. از مهمترین این مزایا می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- وزن کمتر
- انعطاف پذیری
- عملکرد و طول عمر بهتر حتی در شرایط آلودگی سنگین و آب‌وهوای بد
- ضایعات کمتر در مراحل تولید نسبت به انواع چینی
- استقامت بهتر در برابر فشارهای خمشی، بارهای زیاد ناگهانی (بارهای ضربه‌ای) و نیز تخریب انسانی (Vanadalism)
- خاصیت عایقی بهتر نسبت به انواع مرسوم
- پایین تر بودن حجم سرمایه‌گذاری اولیه به منظور ساخت مقره کامپوزیت نسبت به انواع چینی.

در سالهای اخیر با انجام تحقیقات گسترده در زمینه ساخت مقره‌های کامپوزیت و در نتیجه پیشرفتهای متعددی که حاصل گردیده است، این مقره‌ها تا ولتاژهای KV ۷۶۵ در حال استفاده می‌باشند [۲]. این امر با مرتفع ساختن معایب و تقویت مزایای این مقره‌ها، به مرحله‌ای رسیده که تعداد بیشتری از کاربران به استفاده از آنها روی آورده‌اند و قیمت آنها رو به کاهش است.

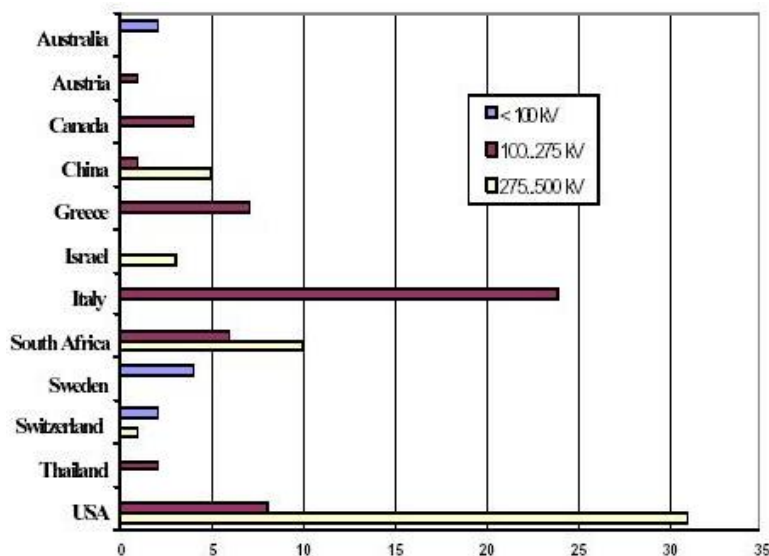
در این مقاله به بررسی پدیده Brittle Fracture در مقره‌های کامپوزیت و تحقیقات انجام شده پیرامون علل وقوع آن پرداخته می‌شود.

۲- پدیده Brittle Fracture در دنیا

در سی سال گذشته، تعدادی از مقره‌های کامپوزیت به وسیله BF دچار شکست شده‌اند. اولین خرابی‌های ناشی از این پدیده در خطوط انتقال آفریقای جنوبی و ایتالیا گزارش شده است که در آنها اولین نسل از مقره‌های کامپوزیت، نصب شده بودند. خرابی هاپس از مدت کوتاهی از آغاز سرویس دهی مقره، حادث شدند. در این موارد، سطوح بار مکانیکی وارد بر مقره بسیار کمتر از استقامت مکانیکی آن بودند.

تعداد بسیار کمی BF (حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ مورد) در مقره های در حال کار در سراسر دنیا روی داده است (شکل (۱)). از لحاظ ظاهری یک شکست از نوع BF منجر به ازدست رفتن ثبات مکانیکی مقره و سقوط هادی به زمین می گردد. بالاترین میزان خرابی در ایالات متحده به ثبت رسیده است. این امر بدلیل کاربرد گسترده مقره های کامپوزیت در طرح های گوناگون و باتکنولوژی های مختلف در این کشور می باشد.

بایک مقایسه مستقیم چنین به نظر می رسد که تمایل به ایجاد BF با افزایش سطح ولتاژ، افزایش می یابد. این امر می تواند به دلیل فشارهای محلی بیشتری که توسط توزیع میدان الکتریکی صورت می گیرد، باشد.



شکل (۱): تعداد BF های روی خطوط، در نقاط مختلف دنیا

در پایان سال ۱۹۹۷ تعداد کل مقره های کامپوزیت نصب شده در سطح ولتاژی بالاتر از ۱۰۰ KV تقریباً ۳ میلیون واحد بود. این آمار نرخ خرابی در اثر BF که تقریباً ۰.۰۰۵٪ می باشد، مطابقت دارد. با وجود این باید در نظر گرفت که تعداد نسبتاً زیادی مقره کامپوزیت در حال کار که تنها مدت کوتاهی از آغاز سرویس دهی آنها می گذرد (به خصوص در آسیا) وجود دارند. لذا این نرخ خرابی باید با تحقیقات بیشتری تایید گردد. به علاوه در برخی تحقیقات انجام شده، تلاشی برای تمایز بین BF های مربوط به شیوه های استفاده از مقره توسط کاربران و BF های مربوط به طراحی یا تکنولوژی ساخت مقره کامپوزیت، صورت گرفته است. این تحقیقات نشان می دهند که در دو سوم موارد، BF ها می توانند مربوط به سازندگان و مشکلات نصب یا نگهداری باشند. البته این نسبت برپایه ای تقریباً ذهنی استوار است. برای مثال در تحقیق ذکر شده، در یک مورد، همه سیزده BF بوقوع پیوسته در یک گروه مقره ۳۴۵ kv به درزهای معیوب میان روکش پلیمری و یراق آلات نسبت داده شده است [۳]. این به معنای وجود یک اشکال سیستماتیک در طراحی آن نوع مقره ها می باشد. از این گذشته خرابی تنه پس از گذشت یک سال از کار مقره ها، صورت گرفته اند.

۳- معرفی اجمالی پدیده BF

از سال ۱۹۸۶ که نتایج اولین تحقیقات سیستماتیک در مورد پدیده BF، منتشر گردید اصطلاح Brittle Fracture برای توصیف ظاهری خرابی های ناشی از خوردگی الکترولیتی میله FRP که یک بار مکانیکی کششی به آن وارد می شود، بکار برده شد که به عقیده برخی بهتر بود چنین فرآیندی را فرسایش تنشی (Stress Corrosion) می نامیدند.

یک نمونه معمول از یک میله FRP که بوسیله BF در یک تست آزمایشگاهی شکسته است، در شکل (۲) نشان داده شده است. در طرف مقابل ناحیه شکستگی، سطح صاف توسط فرآیند BF می شکند؛ بارکشی به فیبرهای باقی مانده منتقل می گردد که به محض افزایش بار از میزان استقامت معین فیبرها، فوراً می شکند.



شکل (۲): نمونه‌ای از یک خرابی ناشی از BF

تستهای زیادی روی مقره هادرآزمایشگاهها و یا در شرایط بیرونی، تحت شرایط محیطی سخت انجام گردیده اند. این تحقیقات نه تنها درباره پدید BF اطلاعاتی رافراهم می کنند، بلکه در پیشرفتهای بیشتر در امر تکنولوژی مقره کامپوزیت نیز منعکس می شوند.

در یکی از تحقیقات، در دو آزمایشگاه، مقره های دارای نقص داخلی و مقره های بدون نقص در معرض بارهای استاتیکی زیاد و یا بارهای کششی متناوب که در سطوح مختلف از بارهای استاتیکی اعمال می شوند، قرار گرفتند. این بارها گاهی اوقات با ولتاژهایی تقریباً ۳ برابر ولتاژ کار معمول مقره ها همراه می شدند. مقره های دارای نقص، نقصهای داخلی زیر را دارا بودند:

- اشباع نبودن فیبرهای میله FRP بوسیله رزین به میزان کافی؛
- فقدان پیوند شیمیایی مناسب میان روکش پلیمری و میله FRP در نزدیکی یراق آلات.
- این دونقص به منظور شبیه سازی یک مکانیزم خرابی قابل قبول که اسیدهای آلی (Organic Acids) بوجود آمده توسط تخلیه های جزئی رانیز دخالت می دهند، انتخاب گردیدند. نتیجه این آزمایشات در موارد زیر خلاصه می شوند:
- شکستگیها (شکافها) در مقادیر بار مورد انتظار، بدست آمدند و بسیاری از آنها در یراق آلات بودند.
- ظاهر شکستگی ها با شکستگی های مکانیکی معمول، مطابقت داشت و وضعی مثل BF های معمول را دارا نبود.
- بارهای مکانیکی زیاد بعنوان یک اثر شتاب دهنده و فشارهای ولتاژ بسیار بالا (در شرایط عدم وجود الکترولیت) منجر به ایجاد BF در هیچیک از مقره های کامپوزیت مورد بررسی نگردید.
- هیچ نشانه ای از ایجاد تخلیه های الکتریکی در هیچیک از قسمتهای دارای نقص، مشاهده نشد.

پس از آن در یک ایستگاه آزمایش بیرونی که در منطقه ای با سطح آلودگی بسیار سنگین واقع بود هر دو گروه از مقره های کامپوزیت (با نقص داخلی و سالم) مورد تست قرار گرفتند. به منظور جلوگیری از تخلیه های الکتریکی ناشی از آلودگی بین دو مقره شکست سطحی آن، ولتاژ اعمالی در طول آزمایش با فاصله نشستی معینی معادل ۱۵ mm/kv متناظر بود. بارهای استاتیکی با مقادیری بین ۴۰ KN تا ۸۰ KN به مقره ها اعمال شدند. دو مورد از مقره های تحت

آزمایش، قبلاً برای حدود یک سال در حالت بدون بار مکانیکی، تحت ولتاژی معادل سه برابر ولتاژ کارعادی خود، قرار گرفته بودند که این امر، منجر به ایجاد تخلیه های الکتریکی در نقصهای داخلی مقرر ها گردید. خرابی ها در جاهایی غیر از محل نقصهای داخلی به وقوع پیوست، در مکانهایی که پیوند میان روکش پلیمری و میله FRP به مقدار کافی بود. بدلیل فاصله نشستی کم در مقایسه با سطح آلودگی بالا، روکش پلیمری متحمل خرابی و سوراخ شدگی (Puncture) گردید؛ اما این امر میله FRP را تنها بطور جزئی تحت تاثیر قرار می دهد و نباید بعنوان عامل خرابی مکانیکی در نظر گرفته شود. زیرانواحی آسیب دیده به دلیل اخیر، بامکانهای شکستگی پس از آزمایش BF یکسان نبودند. نتایج این آزمایشات بصورت زیر خلاصه می شوند:

- شکستگی ها تحت بارهای کششی بالا، میدانهای الکتریکی زیاد و شرایط محیطی خشن، حاصل شده اند.
- ظاهر شکستگی ها با شکستگی های مکانیکی معمول، مطابقت داشته و وضعی مثل BF های معمول را دارا نبود.
- بارهای مکانیکی زیاد بعنوان یک اثر شتاب دهنده و فشارهای ولتاژ بسیار بالا (در شرایط عدم وجود یک الکترولیت) منجر به ایجاد BF در هیچیک از مقرر ها کامپوزیت مورد بررسی نگردید.
- بعید به نظر می رسد (و البته ثابت نشده است) که کاهش فشار مکانیکی برای به تاخیر انداختن زمان تست و شاید ایجاد فرصت برای بوجود آمدن اسید، منجر به یک BF گردد.

۳-۱- تاثیر میله FRP

فاکتورهای زیر در یک میله FRP موثرند:

- ماتریس رزینی و ماده سفت کننده (hardener)
- دمای پخت و پس از پخت
- پرکننده ماتریس
- رده فیبر شیشه ای
- اندازه فیبرها

سفت کننده ها دارای فرمولاسیون اپوکسی مختلفی هستند که برای اشباع فیبرهای شیشه ای میله FRP بکار می روند و به وسیله رطوبت، اسید می تواند در آنها نفوذ کند. هیدرولیز ماده سفت کننده می تواند در طول ساخت میله یا بعداً در زمان کار مقرر روی دهد البته در صورتیکه سفت کننده سالم و هیدرولیز نشده در میله وجود داشته باشد. این فرآیند برای امر دلالیت دارد که برای ایجاد BF صرفاً نیاز به یک منبع خارجی اسید نیست.

۳-۲- تاثیر اسید:

حضور یک الکترولیت، پیش زمینه ای برای خرابی میله FRP بوسیله خوردگی الکترولیتی (Electrolytic Stress Corrosion) می باشد. تحقیقات اولیه در این زمینه، تعدادی از اسیدها را برای اندازه گیری تاثیر آنها روی میله های FRP بکار برده است. بسته به ترکیب و ساختمان میله FRP، این نتیجه حاصل شد که فیبرهای از نوع شیشه E هنگامی که در معرض اسید اکسالیک، اسید سولفوریک، اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک قرار می گیرند، می توانند بشکنند. زمان شکست به تمرکز اسید و سطح بار کششی وارد بر مقرر بستگی دارد. ترکیب شیشه E و رزین پلی استر، کوتاهترین

زمان شکست را نشان داده است. این امر، این سوال را ایجاد می کند که از کدام اسید باید برای تحقیقات استفاده شود. با تحلیل مقره های دچار شکست شده در هنگام کار، براحتی در می یابیم اسید نیتریک با سطح PH کمتر از ۳٫۵ می تواند منجر به ایجاد BF گردد.

می توان گفت حمله یک اسید به سیستم پیچیده یک میله FRP، منجر به یک خوردگی الکترولیتی شده و در نهایت به BF ختم می شود.

تحقیقات اخیر روی یک منبع اسید داخلی تمرکز کرده اند. برای مواد سفت کننده معینی از نوع انیدریدها (ترکیبات اکسیژن دار فاقد نیتروژن) که قسمتی از فرمولاسیون اپوکسی بکاررفته در اشباع فایبرگلاس هستند، اگر هیدرولیز آنها روی دهد، منجر به تولید کریستالهای اسیدی می گردد که دمای ذوبی بیش از ۲۰۰°C دارند. در نتیجه آنها بصورت کریستالهای نمکی در طول فرآیند پولتروژن (Pultrusion Process) باقی می مانند. اماد آب قابل حل اند و وقتی وارد آب می شوند به اسیدهای ارگانیک (آلی) تبدیل می گردند. با در نظر گرفتن تلاش سیستم برای رسیدن به سطح انرژی پایین تر و پایدارتر، کریستالها، می توانند توده ای تشکیل دهند و ترجیحاً در پیرامون میله FRP قرار گیرند. در نتیجه اگر ماتریس رزینی یک میله ساخته شده هنوز مقداری سفت کننده واکنش نداده را در خود داشته باشد، هیدرولیز می تواند بعداً در طول عمر مقره روی دهد و اسیدهای آلی مایع، بوجود آورد و منجر به BF در میله هایی که تحت فشار مکانیکی هستند شود. این نظریه که نظریه « اسید از خود میله FRP » نامیده می شود نیاز به آب مایع در سطح FRP دارد. این آب می تواند از طریق درزهای معیوب یا روکشهای خراب شده مقره، به داخل نفوذ کند. البته راه دیگری نیز برای تامین آب از نظر تئوری ارائه شده است که بعید به نظرمی رسد در عمل روی داده باشد؛ به این صورت که پخش بخار از طریق روکش پلیمری به داخل، منجر به تولید مقدار کافی آب در سطح میله شده و اسید تولید می شود. با وجود این، ورود مستقیم آب به داخل مقره از طریق درزهای معیوب، دلیل شکست ۸۰٪ از مقره های دچار شکست شده در ایالات متحده معرفی شده است. لازم به ذکر است که هیدرولیز (تجزیه بوسیله آب) در سیستم ماتریس اپوکسی عبارت است از تجزیه ماتریس اپوکسی یا پلی استر تحت تاثیر آب. گمان می رود (و البته کاملاً یقین حاصل نشده) که تخلیه های جزئی در مکانیزم فرآیند نقش دارند. تخلیه های جزئی می توانند در سطح یا در عیبهای موجود در حجم ماده FRP بوجود آیند (عیبهایی مثل فیبرهای خوب اشباع نشده، حفره های میکروسکوپی، شکافهای مویی و ۰۰۰). نکته دیگر اینکه علاوه بر مکانیزمهای فوق در تولید اسید، اسیدنیتریک می تواند با تخلیه های الکتریکی و کرونا در هوای مرطوب پدید آید و ممکن است بتواند به سطح میله FRP دسترسی یافته و منجر به BF شود.

تا کنون مطالعات زیادی انجام شده است تا نشان دهند که منبع اسیدی که میتواند باعث BF در هنگام کار مقره گردد به تخلیه های الکتریکی مربوط می شود. اما نتایج برخی تحقیقات نشان میدهند که اگر چه این امر امکان دارد اما این مکانیزم با بسیاری از مشاهدات صورت گرفته از مقره های خراب شده سازگار نیست [۵،۴].

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی نوعی پدیده شکست در مقره های کامپوزیت به نام Brittle Fracture پرداخته شد. به نظر میرسد علت وقوع این پدیده، حمله اسید به میله FRP باشد. این امر منجر به یک خوردگی الکترولیتی شده و در نهایت به BF ختم می شود. علل ایجاد و نفوذ اسید به میله FRP نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-مراجع:

- [1] Shwartz. Mel M.; "Composite Materials, Vol.1, Properties, Non-Destructive Testing , and Repair ", Prentice Hall PTR, NewJersey, USA, 1996.
- [۲] گرامیان، میر جواد ؛ عظیمی، فرشاد؛ استیفا، فراز؛ رحیم پور شایان، امیرعلی؛ محسنی، مریم؛ «مقره کامپوزیتی - نسل جدید مقره ها»، مجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، (PSC98)
- [3] Schmuck. F.; de Turreil. C.; "Brittle Fracture of Composite Insulators, an Investigation of Their Occurrence and Failure Mechanisms and a Risk Assessment ", CIGRE WG 22-03 Report.
- [4] de Turreil. C.; Pargamin. L.; Thevenet. G.; Part. S.; " "Brittle Fracture" Of Composite Insulators: Why and How They Occur ", IEEE 2000. pp.2569-2574
- [5] Kumosa. M. Kumosa. L.. Armentrout. D.; " Can Water Cause Brittle Fracture Failures of Composite Non-ceramic Insulators in the Absence of Electric Fields?". IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.11, No.3, June 2004