



سخن سردیبر

معمولاً همه ساله در ماه‌های پایانی، چانه‌زنی بر سر دستمزد، فرصتی را به وجود می‌آورد که شرکای اجتماعی با توجه به اصل سه جانبه‌گرایی سازمان بین‌المللی کار ILO (نمایندگان دولت، کارفرما و کارگر) به گفتگو بپردازند و پس از بحث‌ها و جلسات متعدد به نوعی به یک توافق دست یابند.

طبق قانون، این مذاکرات دستمزدی باید بر اساس توافق شرکای اجتماعی در شورای عالی کار تعیین شود. البته با توجه به شرایط اقتصادی و افزایش هزینه‌ها، بر کسی پوشیده نیست که این دستمزد باید به گونه‌ای تعیین شود که سبب خانوار کارگری را پوشش داده و به میزانی که شکاف بین درآمد و هزینه آنان را پر نماید. از طرفی همواره کارفرما به عنوان حامی کارگر نهایت تلاش خود را در راستای تأمین مالی وی به کار گرفته تا با آسودگی وظایف محوله را در بنگاه اقتصادی به نحو مطلوب انجام دهد. زمانی این امر محقق می‌شود که کارگر محیط کار را از آن خود بداند و تمام هم خود را در راستای رضایتمندی کارفرما مصروف نماید. در این صورت است که هر دو طرف منتفع خواهند شد.

البته نباید فراموش کرد که اوضاع اقتصادی و هزینه‌های تولید و عدم وجود نقدینگی و ... آنچنان دست و پای کارفرما را بسته که با اندک حاشیه سود، صرفاً چراغ بنگاه را روشن نگه می‌دارد. چنانچه بهبودی در آینده اقتصادی حاصل شود مسلماً فضای جلسات مزدی به نفع کارگر تغییر خواهد کرد.

و اما در این اصل سه جانبه، دولت نیز باید خود را موظف بداند که به درمان و آموزش و تأمین مسکن کارگران کمک نماید و این امر کمک بسیار مؤثری در حمایت از قشر کارگر است.

بازیافت عایق XLPE در کابل‌ها

ترجمه: مهندس فاطمه دهقاندار (کارشناس ارشد HSE)

چکیده

در جریان تولید کابل‌ها و همچنین سپری شدن عمر کاری آنها، ضایعات بازمانده پلاستیکی و کابل‌های دورریزی حاصل می‌شوند که به هر صورت باید مورد توجه قرار گیرند. به نظر می‌رسد که بخش فلز هادی در کابل‌ها مدت زیادی است که برای بازیافت مورد توجه بوده است ولی تلاشی در خصوص بازیافت قسمت‌های پلیمری صورت نگرفته است. برای بازیافت پلیمرها در کابل‌ها لازم است از سایر بخش‌ها جداسازی شوند. پلی اتیلن کراس لینک شده (XLPE)، به عنوان مواد عایق در کابل‌های برق امروزی استفاده می‌شود. از آنجا که XLPE نمی‌تواند دوباره ذوب شود، بازیافت آن سخت به نظر می‌رسد. در برنامه R&D یکی از شرکت‌های سیم و کابل امکانات بازیافت XLPE مورد بررسی قرار گرفت که در نتیجه برای تحقیق، روشی امیدوارکننده به دست آمده است. در این روش XLPE را خرد کرده با پلی اتیلن سنگین (HDPE) یا سبک خطی (LLDPE)، مخلوط می‌کنند. چنین مخلوطی را می‌توان به ترتیب از طریق قالب‌گیری تزریقی و سپس اکستروژن کردن فرآوری نمود. این قابلیت فرآیند قالب‌گیری تزریقی و ویژگی‌های مخلوط‌سازی تا ۷۰ درصد برای XLPE رضایت‌بخش است. همچنین امکان استفاده از مخلوط‌های XLPE با مقدار کمتر XLPE برای اکستروژن کردن در کاربردهایی مانند روکش کابل وجود دارد. از آنجا که تجهیزات آسیاب کننده موجود را برای قالب‌گیری دورانی می‌توان به کار گرفت، هزینه بازیافت کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.

۱- پیشگفتار

در این مقاله به یک روش بازیافت XLPE از ضایعات کابل می‌پردازیم. این کار توسط برنامه تحقیقاتی سیم و کابل صورت گرفته که بازیافت پلیمرهای مختلف در ضایعات را مورد توجه قرار داده است. شرکت‌های همکار در این برنامه شامل:

Borealis AB, IneosChlorVinyl AB, VCC AB, Volvo 3P AB, Nexans IKO AB, DrakaKabel AB, ABB Power Systems AB and Stena Recycling AB

هستند. اهداف پروژه بازیافت XLPE، ایجاد روشی برای جداسازی و بازیافت XLPE از ضایعات کابل و بررسی کاربردهای مناسب برای ترکیبات بازیافت شده است.

۲- مواد و فرآوری آنها

مخلوط‌های XLPE/HDPE

XLPE جداسازی شده با HDPE مخلوط شده و با روش قالب‌گیری تزریقی فرآوری می‌شود.

XLPE از نوع کراس لینک شده به روش سیلان، از کابل‌های عایق شده جداسازی می‌شود. عایق کابل‌ها را تکه‌تکه می‌کنند و سپس با آسیاب جزئی به صورت قطعاتی به ابعاد چند میلی‌متر (mm) درمی‌آورند. این قطعات را سپس با آسیاب کردن مجدد به ذراتی با ابعاد تقریباً $500 \mu\text{m}$ تبدیل می‌کنند. پودر XLPE به دست آمده با توزین به همراه HDPE، MG9601 تأمین شده از شرکت Borealis مطابق درصد‌های وزنی مورد نظر مخلوط می‌شوند. مطابق این برنامه مخلوط‌های زیر مورد آزمایش قرار گرفتند:

• XLPE/HDPE 50/50



مخلوط‌های زیر برای اکستروود کردن به صورت نوار آزمایش شدند:

- XLPE/LLDPE 0/100
- XLPE/LLDPE 30/70
- XLPE/LLDPE 50/50
- XLPE/LLDPE 70/30

اندازه ذرات XLPE در تمام مخلوط‌ها $600 \mu\text{m} \leq$ بوده است. عمل اکستروود کردن نوار با و بدون پیش آمیزه‌سازی برای ارزیابی لزوم از پیش آمیزه‌سازی، انجام شد. نمونه‌های اکستروود شده به وسیله آزمون استحکام کششی مطابق با استاندارد کابل IEC60811 ارزیابی و مدول استحکام کششی مطابق ISO 527، MFI مطابق IEC 60811 و مقاومت در برابر ترک خوردگی مطابق IEC 60811 انجام شد.

آزمایشی توسط شرکت DRAKA CABLE در خصوص اکستروود مواد بر روی سیم به‌عنوان ارزیابی قابلیت فرآیند سیم اکستروود شده از ترکیبات انجام شد. سیم‌های عایق شده با ترکیبات XLPE/LLDPE اکستروود شدند. همچنین در این آزمایش، تأثیر اندازه ذره XLPE مورد بررسی قرار گرفت.

ترکیبات از پودر XLPE به ترتیب با اندازه ذره $600 \mu\text{m} \leq$ و با اندازه ذره $400 \mu\text{m} \leq$ آماده شدند. مخلوط‌های زیر به‌عنوان عایق سیم، از پیش ترکیب و اکستروود شدند:

- XLPE/LLDPE 30/70، اندازه $400 \mu\text{m} \leq$
- XLPE/LLDPE 30/70، اندازه $600 \mu\text{m} \leq$
- XLPE/LLDPE 50/50، اندازه $400 \mu\text{m} \leq$
- XLPE/LLDPE 50/50، اندازه $600 \mu\text{m} \leq$

همچنین این آمیزه‌های به ترتیب ۳۰ درصدی و ۵۰ درصدی XLPE با LLDPE خالص برای دستیابی به مخلوط‌های زیر مخلوط شدند تا به عنوان عایق سیم اکستروود شوند:

- XLPE/LLDPE 5/95، اندازه $400 \mu\text{m} \leq$
- XLPE/LLDPE 5/95، اندازه $600 \mu\text{m} \leq$
- XLPE/LLDPE 15/85، اندازه $400 \mu\text{m} \leq$
- XLPE/LLDPE 15/85، اندازه $600 \mu\text{m} \leq$

ارزیابی سیم‌ها با اندازه‌گیری‌های استحکام کششی، کهنگی، آزمون ترک خوردگی و زبری سطح انجام می‌گیرد. این آمیزه‌های XLPE/LLDPE همچنین جهت کاربری در یک

• XLPE/HDPE 60/40

• XLPE/HDPE 70/30

دسته‌های مختلف مخلوط XLPE و HDPE بدون پیش آمیزه‌سازی مستقیماً به درون دستگاه قالب‌گیری تزریقی، وارد و نمونه‌ها به صورت دمبل فرم، قالب‌گیری شدند. آزمایش استحکام کششی مطابق با ISO 527 انجام و ترک‌برداری در اثر ضربه مطابق با ISO 179 و اندازه‌گیری شاخص جریان ذوب این مواد با پایه پلی‌اتیلن مطابق با ISO 1133 انجام گرفت.

مخلوط‌های XLPE/LLDPE

XLPE جداسازی شده که با LLDPE مخلوط شده، به ترتیب با قالب‌گیری تزریقی و اکستروود کردن فرآوری شد. قلمبه‌های مواد ضایعاتی XLPE حاصل از تولید مواد کراس‌لینک شده به روش سیلان به وسیله تولیدکنندگان کابل جمع‌آوری شدند. این قلمبه‌های XLPE ابتدا به صورت دانه‌های کوچک چند میلی‌متری درمی‌آید سپس این تکه‌های کوچک با آسیاب مجدد به دو صورت تبدیل می‌شوند یکی با اندازه ذرات $600 \mu\text{m} \leq$ و دیگری $400 \mu\text{m} \leq$. این پودر XLPE با توزین به همراه LLDPE مطابق درصد‌های وزنی مورد نظر مخلوط شدند.

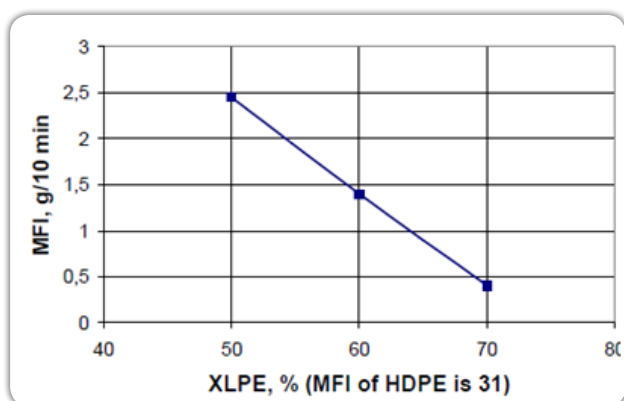
LLDPE مورد استفاده برای قالب‌گیری تزریقی از نوع LL6211 تهیه شده از شرکت Exxon Moblie بوده که با نام نوع a معروف است و LLDPE مورد استفاده برای اکستروود کردن از نوع LL1004YB تهیه شده از شرکت Exxon Moblie بوده که نوع b نامیده می‌شود.

مخلوط‌های زیر برای قالب‌گیری تزریقی مورد آزمایش قرار گرفتند:

- XLPE/LLDPE 0/100
- XLPE/LLDPE 40/60
- XLPE/LLDPE 50/50
- XLPE/LLDPE 60/40
- XLPE/LLDPE 70/30

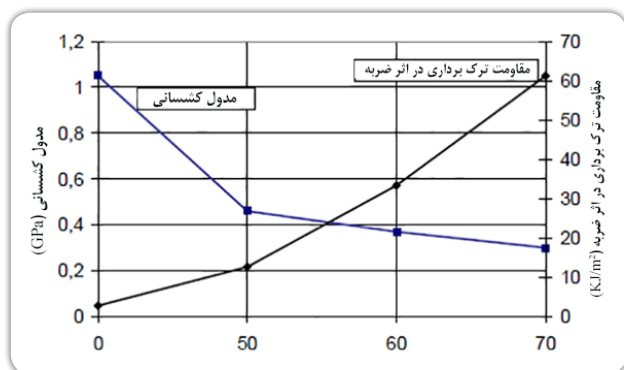
اندازه ذرات XLPE در تمام مخلوط‌ها $600 \mu\text{m} \leq$ بوده است. در آزمایش‌های صورت گرفته دسته‌های این مخلوط‌ها بدون پیش آمیزه‌سازی به درون دستگاه قالب‌گیری تزریقی تغذیه شدند. نمونه‌ها به صورت دمبل فرم قالب‌گیری شدند. نمونه‌های قالب‌گیری شده تزریقی با آزمون‌های استحکام کششی مطابق با ISO 527 و آزمون استحکام ترک برداری در اثر ضربه با میله مطابق با ISO 179 ارزیابی و اندازه‌گیری‌های شاخص جریان ذوب طبق ISO 1133 انجام شد.

۷۰ درصد XLPE کاهش یافته است، ولی با این وجود قالب‌گیری تزریقی به سادگی انجام شده است. نمونه‌های قالب‌گیری شده دارای سطح صاف و همگن هستند. نیازی به پیش آمیزه‌سازی نبوده است، پودر XLPE و گرانول HDPE می‌توانستند به سادگی درون دستگاه قالب‌گیری تزریقی، با هم مخلوط شوند. در دستگاه‌های قالب‌گیری تزریقی دارای دو تغذیه کننده، عمل تغذیه آسان‌تر و مؤثرتر انجام می‌شود.



شکل ۲. نمودار تغییرات شاخص جریان ذوب در مقابل مقدار XLPE از نظر درصد وزن در HDPE (نمونه‌های قالب‌گیری شده تزریقی)

از مواد تولید شده چنین برمی‌آید که ترکیب ۴۰/۶۰ از XLPE/HDPE دارای بهترین مجموعه ویژگی‌های مواد می‌باشد. این مواد دارای سختی واقعاً بالا و حد بالایی از شکل‌پذیری و مقاومت در برابر ضربه می‌باشند، به شکل ۳ مراجعه شود.



شکل ۳. نمودار تغییرات مدول کشسانی-E، مقاومت ترک برداری در اثر ضربه در مقابل محتوای XLPE از نظر درصد وزنی در HDPE (نمونه‌های قالب‌گیری تزریقی)

کابل در NEXANS IKO سوئد مورد آزمایش قرار گرفتند. این کابل ویژه، دارای دو روکش است، یک روکش داخلی شامل یک کوپلیمر پلی‌الفین و دیگری روکش بیرونی شامل پلی‌وینیل کلراید (PVC) است، به شکل ۱ مراجعه شود. در این آزمایش کوپلیمر پلی‌الفین در روکش داخلی با آمیزه XLPE/LLDPE مخلوط با LLDPE خالص جایگزین شده است، ترکیب‌های زیر به‌عنوان روکش داخلی اکستروود شدند:

- XLPE/LLDPE 10/90
- XLPE/LLDPE 15/85
- XLPE/LLDPE 20/80

اندازه ذرات XLPE در تمام مخلوط‌ها $\leq 600 \mu\text{m}$ بوده است. ارزیابی کابل‌ها با آزمون استحکام کششی و کهنگی انجام گرفت.

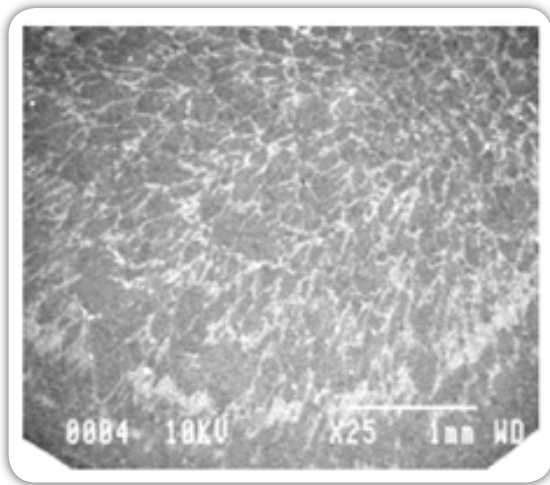


شکل ۱. کابل با یک روکش داخلی دارای ۲۰ درصد XLPE باز یافت شده مخلوط شده با LLDPE

۲- نتایج و بررسی نهایی

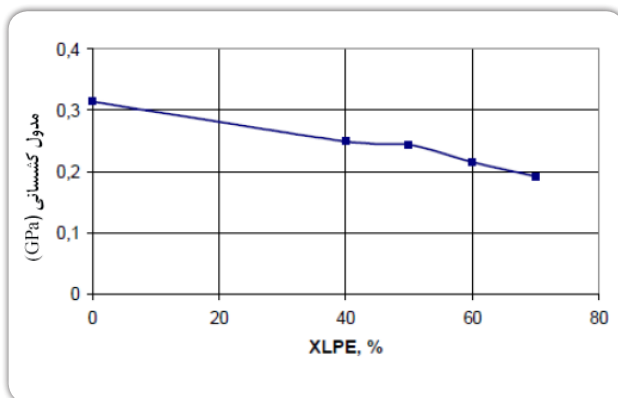
مخلوط‌های XLPE/HDPE

نتیجه آزمایش‌ها حاکی از آن بود که مخلوط‌های تا ۷۰ درصد XLPE را می‌توان با حفظ فرآیندپذیری همچون مواد گرمانرم قالب‌گیری تزریق نمود. نمودار تغییرات شاخص جریان ذوب (MFI) در مقابل مقدار XLPE موجود در مخلوط در شکل ۲ نشان داده شده است. اگرچه MFI کمتر از یک گرم در ۱۰ دقیقه در مخلوط



شکل ۵. تصویر SEM که نشان دهنده سطح مقطع نمونه قالب‌گیری تزریقی با ۷۰ درصد وزنی XLPE

WWW.SBARGH.IR



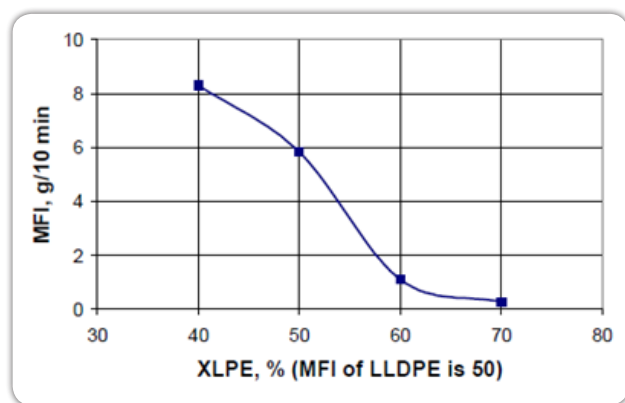
شکل ۶. نمودار تغییرات مدول کشسانی در مقابل درصد وزنی XLPE در نوع a LLDPE (نمونه‌های قالب‌گیری تزریقی)

مخلوط‌های XLPE/LLDPE را می‌توان جایگزین LLDPE و پلیمرهای قابل انعطاف در کاربردهای قالب‌گیری تزریقی نمود. اکستروژن کردن مخلوط‌های XLPE/LLDPE را می‌توان تا ۵۰ درصد وزنی XLPE فرآوری کرد اما در آزمایش‌ها سطح نوارهای اکستروژن شده با چنین محتوای بالای XLPE بسیار ناهموار به نظر می‌رسیدند.

با توجه به نیاز بدست آمده منطقی است این‌گونه تصور شود که ترکیب ۴۰/۶۰ از XLPE/HDPE را می‌توان برای کاربردهای مشابه LDPE استفاده نمود مگر در شرایطی که مقاومت ضربه بالایی مورد نیاز باشد. چنین کاربردی ممکن است شامل کاسه‌ها، سطل‌ها، تانکرهای آب سرد و کله قندی‌های جاده‌ای باشد. بعلاوه امکان اکستروژن کردن مواد بازیافت شده به صورت لوله یا صفحه نیز وجود دارد. همچنین نباید امکان استفاده از این مواد در صنعت کابل به عنوان مواد پرکننده و یا به عنوان مواد روکش را نادیده گرفت.

مخلوط‌های XLPE/LLDPE

از نتایج آزمایش‌ها چنین برمی‌آید که مخلوط‌های دارای تا ۷۰ درصد XLPE را می‌توان با حفظ فرآیندپذیری قالب‌گیری تزریقی نمود. نمودار تغییرات MFI در مقابل درصد XLPE موجود، در شکل ۴ نشان داده شده است. LLDPE لایه نازکی را در مجاورت نمونه‌ها تشکیل می‌دهد که باعث ایجاد یک سطح صاف می‌شود، به شکل ۵ مراجعه کنید. پودر XLPE و گرانول LLDPE را می‌توان در دستگاه قالب‌گیری تزریقی بدون نیاز به از پیش آمیزه‌سازی، مخلوط نمود.

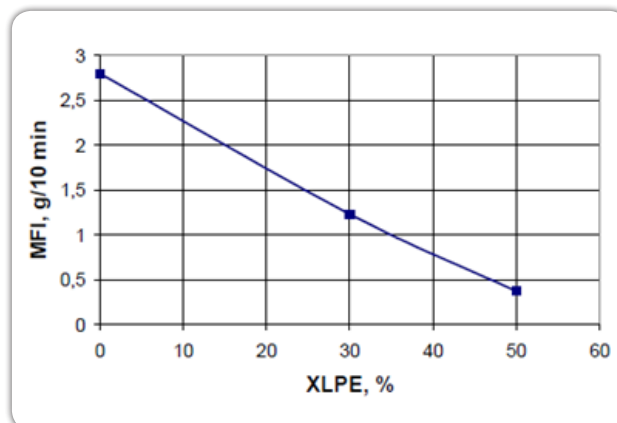


شکل ۴. نمودار تغییرات شاخص جریان ذوب در مقابل درصد وزنی XLPE موجود در مخلوط با LLDPE نوع a (نمونه‌های قالب‌گیری تزریقی)

مدول کشسانی با افزایش محتوای XLPE، اندکی کاهش یافته و مواد، کمتر سفت و چکش‌خوار شدند، به شکل ۶ مراجعه کنید. مقاومت در برابر ضربه بسیار خوب است زیرا تمام نمونه‌های آزمایش شده بدون پارگی قبول شدند.



XLPE/LLDPE تا حدود ۵۰ درصد XLPE توانسته با حفظ فرآیندپذیری، اکستروژن شود اما به خاطر زبری سطح، محتوای XLPE آن باید به حداکثر ۲۰ درصد محدود شود. با استفاده از پودر XLPE در اندازه ذرات متفاوتی در سطح سیمها مشاهده نشد. در آزمایش اکستروژن روکش مشخص شد که مخلوطهای XLPE/LLDPE را می توان در روکش کابل به کار برد. از جمله کاربردهای دیگر می توان به نخهای پرکننده و مواد بدینگ اشاره نمود. همچنین لوله های پوشش دهنده کابل در ساختمان و انواع لوله ها، کاربردهای دیگری از این نوع مواد مخلوط می باشد.



۴- سایر موارد

مرحله بعد بررسی امکانات برای بازیافت XLPE از ضایعات کابلی گرانول شده است، به مراحل کار در شکل ۸ مراجعه شود. ضایعات کابل از جانب تولیدکنندگان کابل جمع آوری می شوند و با برش، گرانول سازی، ذوب کردن و جداسازی پلاستیک فرآوری می شوند. روش مورد استفاده برای جداسازی XLPE و PVC، Plast Sep انجام می شود که فرآیندی است که با ترکیب روش شناور/غوطه وری عمل جداسازی XLPE به عنوان بخش سبک و میز آبدار لرزان برای جداسازی پلاستیک سنگین PVC و فلزات باقی مانده در آن انجام می شود. بخش XLPE آسیاب شده و به صورت مخلوط با LLDPE (HDPE)، بازیافت خواهد شد. سپس این مخلوطها در روکش کابل آزمایش خواهند شد. اگر XLPE را بتوان از کابل های گرانول شده بازیافت کرد، مقادیر زیادی از ضایعات کابل می توان بازیافت نمود. همچنین امکان بازیابی XLPE از کابل های موجود در شبکه نیز فراهم است.

شکل ۷. نمودار تغییرات شاخص جریان ذوب در مقابل درصد وزنی

XLPE موجود در LLDPE نوع b

(نمونه های اکستروژن شده)

مقدار MFI در مقابل محتوای XLPE در LLDPE در شکل ۷ نشان داده شده است. پیش آمیزه سازی باعث بهبود یکنواختی نوارهای اکستروژن شده، گردیده اما خواص مواد تقریباً با یا بدون پیش آمیزه سازی یکسان بوده است، به جدول ۱ مراجعه شود. آمیزه، کاربری آسان تری دارد ولی به خاطر پیش آمیزه سازی به هزینه ها افزوده می شود. در اکستروژن کردن با دو تغذیه کننده، نیازی برای از پیش ترکیب کردن وجود ندارد.

پیش آمیزه سازی PC

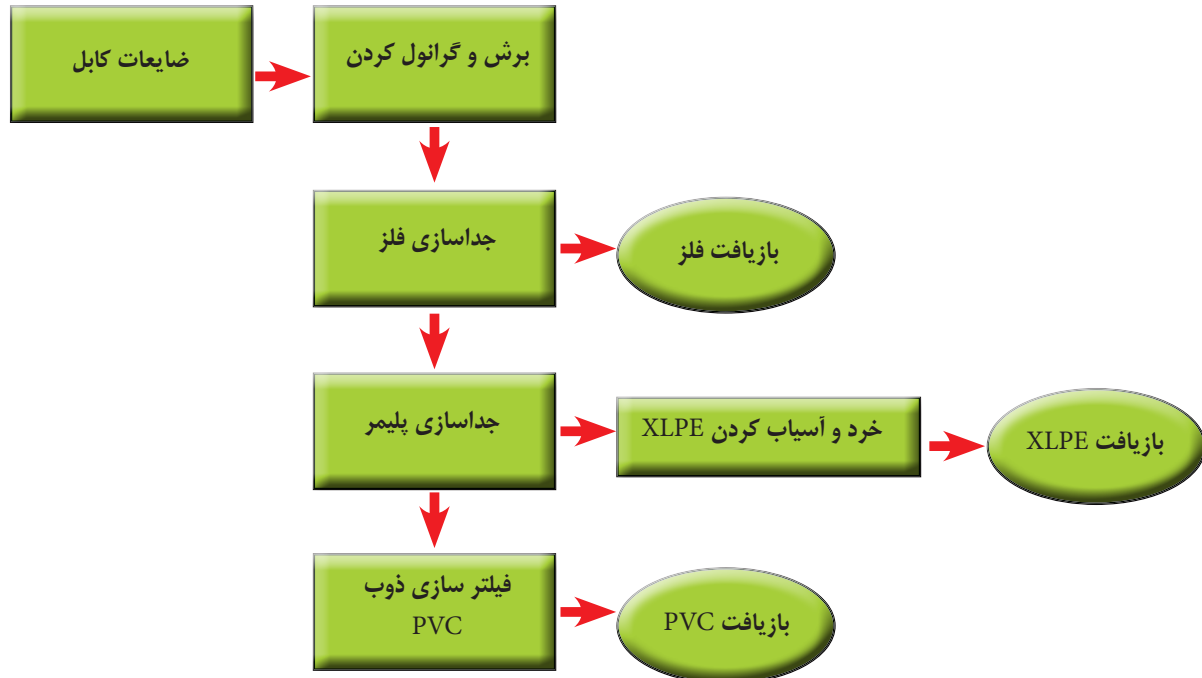
همچنین آزمایش اکستروژن سیم بیانگر آن است که مخلوطهای

WWW.SBARGH.IR

جدول ۱. خواص مکانیکی نوارهای اکستروژن شده

ترکیب محصول	ازدیاد طول در نقطه تسلیم (%)	تنش در نقطه تسلیم (MPa)	تنش در نقطه پارگی (MPa)	ازدیاد طول در نقطه پارگی (%)	مدول کشسانی ISO 527 (MPa)
30% XLPE	۲۳/۶	۹	۱۱/۵	۴۵۰/۲	۱۵۷/۲
30% XLPE PC*	۲۵/۴	۸/۹	۱۲/۸	۴۴۲/۴	
50% XLPE	۲۵/۸	۸/۰	۱۱/۱	۳۷۷/۴	۱۴۵/۸
50% XLPE PC	۲۵/۵	۸/۴	۱۱/۶	۳۰۰/۷	

* PC: پیش آمیزه سازی



WWW.SBARGH.IR

شکل ۸. مراحل فرآیند بازیافت کابل

متعدد بالقوه‌ای را در نظر گرفت.

- از طرفی XLPE را می‌توان مجدداً به صورت مخلوط با LLDPE در کابل‌ها به کار برد. روکش کردن کابل کاربردی مناسب در این زمینه است.
- هزینه بازیافت کاملاً منطقی و مقرون به صرفه است زیرا امکانات آسیاب و خرد کردن موجود برای مواد قالب‌گیری چرخشی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

منبع:

http://extra.ivf.se/Cable_Program/download/paper_nor-dis_xlpe_recycling_a_boss.pdf

۵- نتایج

- عایق‌های کابل XLPE و قلمبه‌های ایجاد شده از جانب تولیدکنندگان کابل‌ها می‌تواند کاملاً به سهولت با آسیاب کردن و مخلوط کردن XLPE با HDPE یا LLDPE بازیافت شوند.
- قالب‌گیری تزریقی را می‌توان در مخلوط دارای تا ۷۰ درصد XLPE به ترتیب در HDPE و LLDPE انجام داد. با در نظر گرفتن خواص مواد و هزینه‌ها، در مجموع این باور وجود دارد که قالب‌گیری تزریقی مخلوط‌ها دارای ۵۰ تا ۶۰ درصد فیلهای XLPE بهترین امکان فراهم گردد.
- سهولت قابلیت فرآوری به همراه خواص منطقی مواد به این معنی است که برای مخلوط‌های حاصله می‌توان کاربری‌های

برترین کشورهای صادرکننده سیم و کابل در سال ۲۰۱۸

مهندس محمد باقر پور عبدالله (کارشناس صنایع)

۱۰- جمهوری چک ۳,۳ میلیارد دلار (۲/۵ درصد)
۱۱- کره جنوبی ۳,۳ میلیارد دلار (۲/۵ درصد)
۱۲- لهستان ۳ میلیارد دلار (۲/۳ درصد)
۱۳- فرانسه ۲,۶ میلیارد دلار (۲ درصد)
۱۴- اسپانیا ۲,۵ میلیارد دلار (۱/۹ درصد)
۱۵- مجارستان ۲,۴ میلیارد دلار (۱/۸ درصد)
از نظر ارزش سیم و کابل صادراتی ۱۵ کشور در فهرست فوق ۷۰/۳ درصد کل محصولات سیم و کابل عایق‌دار را در سال ۲۰۱۸ صادر کردند.

در بین کشورهای صادرکننده بیشترین رشد صادرات سیم و کابل عایق‌دار از سال ۲۰۱۴ تا کنون مربوط به کشورهای زیر بوده است: ویتنام با رشد بالغ بر ۶۴ درصد، مراکش با رشد ۳۶/۲ درصد، رومانی با رشد ۲۱/۳ درصد و آلمان با رشد ۱۵/۵ درصد.

کشورهایی که در صادرات محصولات سیم و کابل عایق‌دار آنها کاهش داشته‌اند عبارتند از: کره جنوبی با کاهش ۱۴/۴ درصدی، اسپانیا با کاهش ۱۰/۱ درصدی، هنگ کنگ با کاهش ۸/۶ درصدی و مجارستان با کاهش ۱/۸ درصدی.

در ادامه ۱۰ کشور صادرکننده بعدی به صورت زیر فهرست شده‌اند:

- ۱۶- ترکیه ۲/۱ میلیارد دلار (۱/۶ درصد)
 - ۱۷- ژاپن ۲/۱ میلیارد دلار (۱/۶ درصد)
 - ۱۸- هلند ۲ میلیارد دلار (۱/۶ درصد)
 - ۱۹- فیلیپین ۱/۹ میلیارد دلار (۱/۵ درصد)
 - ۲۰- تونس ۱/۹ میلیارد دلار (۱/۵ درصد)
 - ۲۱- انگلستان ۱/۷ میلیارد دلار (۱/۳ درصد)
 - ۲۲- اسلواکی ۱/۶ میلیارد دلار (۱/۲ درصد)
 - ۲۳- اوکراین ۱/۵ میلیارد دلار (۱/۱ درصد)
 - ۲۴- اندونزی ۱/۴ میلیارد دلار (۱/۱ درصد)
 - ۲۵- سوئد ۱/۴ میلیارد دلار (۱/۱ درصد)
- کشورهای صادرکننده دیگر که میزان صادرات آنها از اهمیت

صادرات جهانی و فروش آن برای محصولات سیم و کابل عایق شده توسط کشورهای مختلف در سال ۲۰۱۸ بالغ بر ۱۳۰/۸ میلیارد دلار بوده است.

مقدار کلی صادرات سیم و کابل عایق شده از سال ۲۰۱۴ که در آن هنگام ارزش کلی صادرات ۱۲۱/۲ میلیارد دلار برآورد گردیده بود تا پایان سال ۲۰۱۸ با رشد ۷/۹ درصدی مواجه شده است. صادرات سالیانه سیم و کابل‌های عایق شده از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۱۸ رشدی معادل ۸/۴ درصد را نشان می‌دهد.

بین قاره‌های مختلف، قاره اروپا با فروش صادراتی به ارزش ۴۹/۹ میلیارد دلار یا ۳۸/۱ درصد کل صادرات، بیشترین مقدار صادرات سیم و کابل عایق شده را در سال ۲۰۱۸ به خود اختصاص داده است. دومین صادرکنندگان بلافاصله بعد از اروپا از قاره آسیا با ۳۶/۸ درصد و پس از آن صادرات جهانی سیم و کابل عایق‌دار با منشاء آمریکای شمالی بوده است.

درصدهای کم‌تر از صادرات از سوی آفریقا (۴/۸ درصد)، آمریکا لاتین (۱/۹ درصد) بدون مکزیک ولی شامل کشورهای حوزه دریای کارائیب و پس از آن کشور استرالیا از قاره اقیانوسیه با ۰/۱ درصد انجام شده است.

صادرات سیم و کابل عایق‌دار مربوط به کشورهای مختلف:

- ۱- چین ۲۳,۵ میلیارد دلار (۱۸ درصد کل صادرات سیم و کابل عایق‌دار)
- ۲- مکزیک ۱۲,۵ میلیارد دلار (۹/۶ درصد)
- ۳- ایالات متحده آمریکا ۱۰,۳ میلیارد دلار (۷/۹ درصد)
- ۴- آلمان ۹ میلیارد دلار (۶/۹ درصد)
- ۵- رومانی ۴,۷ میلیارد دلار (۳/۶ درصد)
- ۶- ویتنام ۴,۵ میلیارد دلار (۳/۴ درصد)
- ۷- هنگ کنگ ۳,۶ میلیارد دلار (۲/۷ درصد)
- ۸- ایتالیا ۳,۶ میلیارد دلار (۲/۷ درصد)
- ۹- مراکش ۳,۳ میلیارد دلار (۲/۵ درصد)



سعودی، لبنان، زامبیا، الجزایر، آنگولا، عمان، ترینیداد و توباگو، آذربایجان، فیجی، میانمار (برمه)، پاکستان، تانزانیا، ماکائو، مالت، سنگال و کنیا به چشم می‌خورد ولی متأسفانه نام کشور ایران با منابع غنی فلز مس، انرژی ارزان و منابع نفتی به عنوان مواد اولیه مورد مصرف در سیم و کابل در فهرست ۱۰۰ کشور صادرکننده مشاهده نمی‌شود.

کمتری برخوردار است شامل کشورهای زیر است:
 صربستان، تایلند، اتریش، بلژیک، تایوان، سنگاپور، هند، کانادا، مالزی، پرتغال، سوئیس، هندوراس، نیکاراگوئه، مقدونیه شمالی، نروژ، بلغارستان، مصر، فنلاند، برزیل، مولداوی، لیتوانی، روسیه، امارات، دانمارک و یونان.
 در لیست ۱۰۰ کشور صادرکننده اسامی کشورهایمانند اردن، عربستان

WWW.SBARGH.IR



اثر متقابل هادی با مواد پلیمری (XLPE / EPR) در تخلیه جزئی - بخش دوم

ترجمه: مهندس مرتضی خواجه افصلی (کارشناس برق - قدرت)

شروع PD در سطح PDIV ۱/۶، نسبت به شروع مرحله II حل و فصل شد. افزایش ولتاژ ابتدایی تخلیه جزئی در طی آزمون کهنگی نشان دهنده تحول ساختاری رخ داده و همچنین کربن‌سازی روی سطح مواد عایق است که همچنین بر روی توزیع میدان الکتریکی تأثیر می‌گذارد.

۴-۱-۲- سیر تکاملی از پارامترهای PD الگوی q-n-φ

الگوهای PD ثبت شده اطلاعات مربوط به تغییرات مکانیسم‌های PD و اطلاعات مربوط به تعاملات آنها با ساختارهای دی الکتریک را فراهم می‌کنند. الگوهای تخلیه جزئی حاشیه‌ای از تخلیه سطحی در اطراف الکتروود HV و تخلیه در لایه بسیار نازک هوا زیر الکتروود، بین Cu و سطح دی الکتریک است. حضور تخلیه‌ها در زیر الکتروود می‌تواند با فرسایش مشاهده شده در تصاویر مورفولوژیکی و مقایسه زبری سطح ناحیه ۱ و ۳ در قطعه زبر تأیید شود (شکل ۹). مشخصه شکل PD نمونه برای هر دو مراحل کهنگی (۵ kV) مرحله I و (۱۰ kV) مرحله II دو پیکربندی رابط Cu/EPR و Cu/XLPE در شکل ۵ ارائه شده است.

۴-۱-۲-۱- گام اول

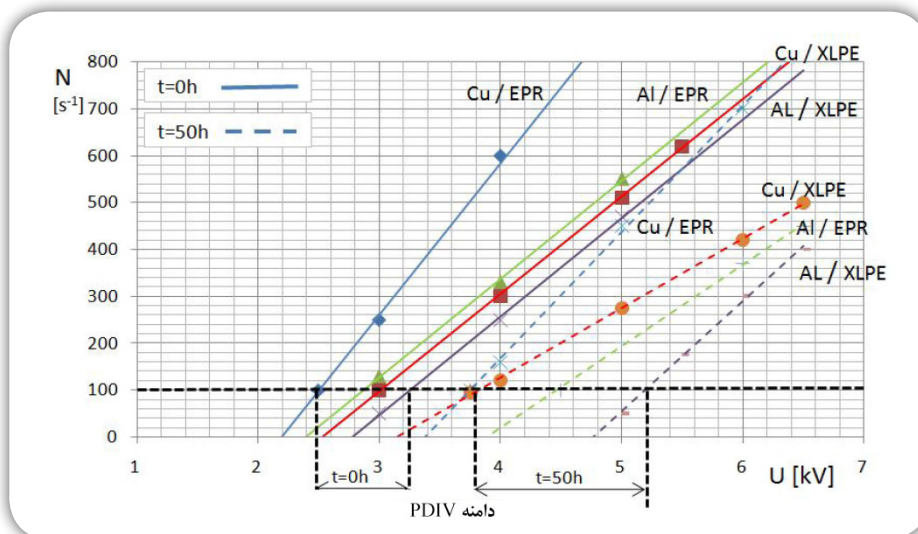
می‌توان کاهش فعالیت PD را بین آغاز مرحله اول (ردیف اول - شروع ۰ ساعت)

۴-۱- تحول PD در طول زمان کهنگی

۴-۱-۱- ولتاژ ورودی تخلیه جزئی

تخلیه‌های جزئی سطحی در زیر سطح ولتاژ موج کرونا PDIV آغاز می‌شود که یک ولتاژ لحظه‌ای است که پالس جاری نشان داده می‌شود. یک پالس جریان تنها در نزدیکی خم ولتاژ اعمال شده دیده می‌شود. در زمانی که پدیده PD آغاز می‌شود، پالس‌های PD پایدار نیستند، اما دارای یک ویژگی تصادفی هستند. برای تعیین PDIV، یک مقدار ولتاژ فرض شد، که در آن به طور متوسط ۱۰۰ پالس در ثانیه رخ می‌دهد. PDIV از خصوصیات مجموع تعداد پالس N در برابر ولتاژ حاصل از PD با الگوی q-n-φ، که طی دوره ۶۰ ثانیه ثبت شده است، محاسبه شد. روابط تعداد PD کل در ولتاژ آزمایش Vt برای همه انواع نمونه‌ها در مرحله I تست و در شکل ۴ نشان داده شده است.

افزایش PDIV می‌تواند به دلیل صفر شدن شکل تحریک PD در طی آزمون در ۵kV، پس از مدت زمان ۱۰۰ ساعت توضیح داده شود. این به خاطر این واقعیت بود که در طول مرحله II آزمون، ولتاژ آزمون ۱۰kV، دو برابر حداکثر مقدار مورد استفاده در مرحله I بود. در مرحله II آزمون کهنگی، روند افزایشی PDIV نیز برای نمونه Cu/EPR، Al/EPR، Cu/XLPE، Al/XLPE، PDIV، پس از حدود ۱۸۰ ساعت از ولتاژ



شکل ۴. تعداد پالس‌های PD در ولتاژ اعمال شده برای رابط‌های مختلف مواد الکتروود و دی الکتریک برای مرحله I آزمون



و در پایان مرحله I یعنی پس از ۱۰۰ ساعت (ردیف دوم) مشاهده کرد. این الگوی PD در ولتاژ آزمون PDIV ۱/۵ ثبت شد. افزایش PDIV در طول زمان کهنگی نشان داده شد. این مشاهدات نیز بر روی ویژگی‌های PDIV در زمان داده شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

۴-۱-۲-۲- گام دوم

مرحله دوم شامل زمان کهنگی بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ ساعت است. در ابتدای مرحله دوم مقدار PDIV در محدوده ۵kV تا ۶kV و بعد از ۲۵۰ ساعت افزایش تا ۸-۶ kV بود که نشان دهنده افزایش تا ۱/۶ برابر است. در اسلات‌های زمان II.1 و تا حدودی II.2 (یعنی حداکثر ۲۰۰ ساعت)، نسبتاً شدت کم پالس‌های بزرگ شارژ در هر دو حالت فاز از ۰ تا ۹۰ درجه و از ۱۸۰ درجه به ۲۷۰ درجه مشاهده شد. در ابتدای آزمون (شکل ۵) حداکثر بار پالس‌های PD(Qm) از ۲nC تجاوز نمی‌کند. بعد از زمان کهنگی (محدوده زمان II.3)، حداکثر بارجرم Qm تا حدود ۶ nC رشد می‌کند (شکل ۵ ردیف سوم). همچنین می‌توان یک گروه PD را با مقادیر زیاد و محدوده فاز باریک تشخیص داد که نشان می‌دهد تخلیه سطحی سطح، منجر به فرسایش در اطراف الکتروود HV می‌شود (ناحیه ۲ در شکل ۱).

در طی مرحله II، در ولتاژ دوگانه، به رغم روند صعودی PDIV به خصوص در شکاف‌های II.1، II.2، II.3، تعداد کل تخلیه N افزایش می‌یابد. در اسلات‌های II.4 و II.5، کاهش تعداد تخلیه‌ها مشاهده شد، که می‌تواند با تغییرات غیر قابل برگشت سطح مواد، به ویژه به علت تغییر در هدایت، توضیح داده شود.

۴-۱-۳- ویژگی‌های الگوهای PD در تخلیه‌های سطحی

زمانیکه هر دو مؤلفه‌های طبیعی و مماسی از میدان الکتریکی وجود داشته باشند در اتصالات بین دی الکتریک‌های جامد و گاز، تخلیه سطحی پایدار رشد می‌یابد. با توجه به مطالعات ادبی و مشاهدات ما آنها را با:

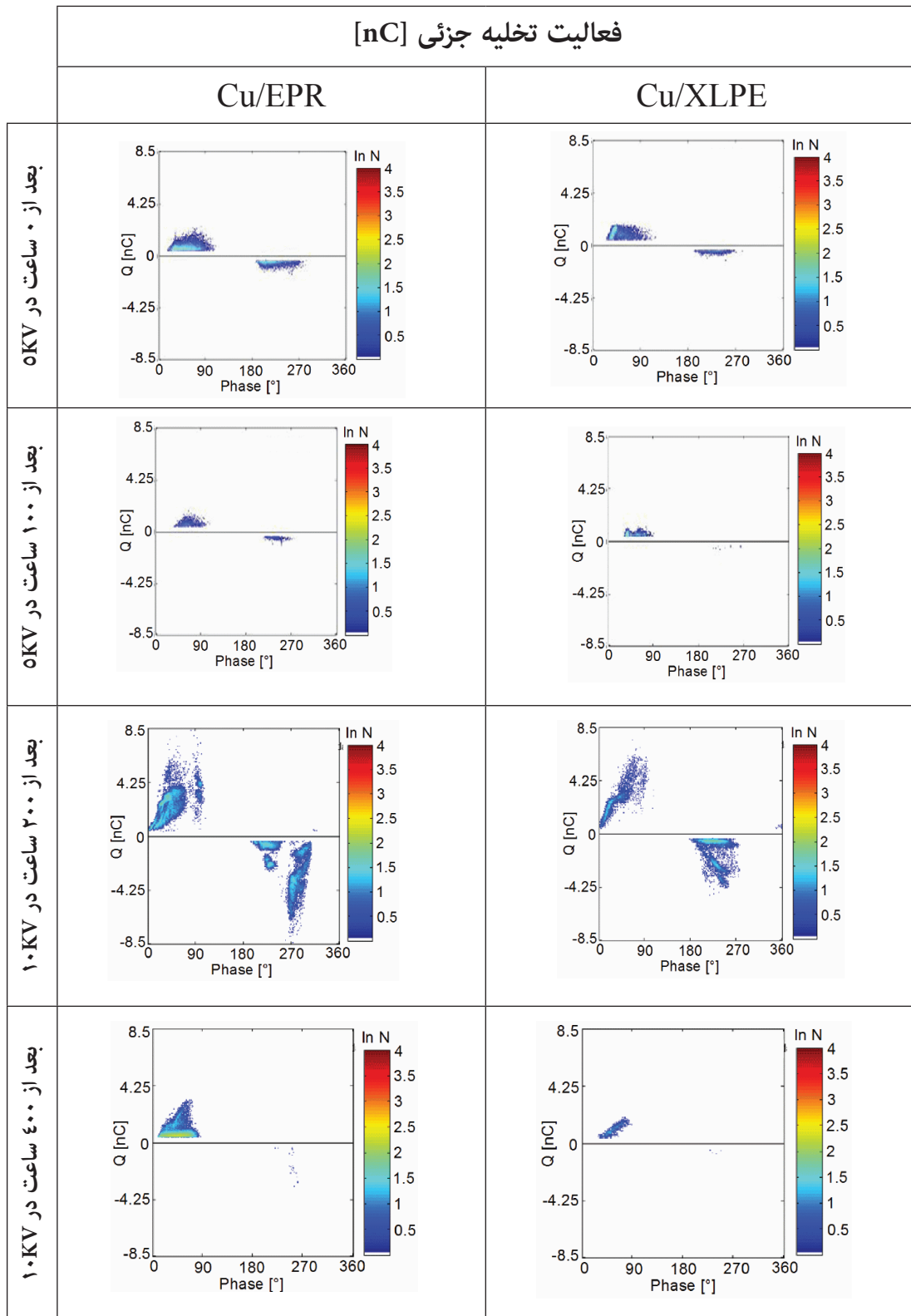
- * محدوده فاز PD از ۰ تا ۹۰ درجه، ناشی از تخلیه سطحی روان و در محدوده تقریباً ۱۸۰ تا ۲۷۰ درجه از تخلیه‌های پایدار به علت اثر حافظه تجمع شارژ از یک دوره ولتاژ قبلی،
- * معمولاً توزیع بار شارژ $Dn(q)$ نامتقارن است و شامل طیف گسترده‌ای از بار با نرخ نسبتاً کم تکرار، ایجاد جرقه‌های کشویی گسترده،
- * یک تعامل حرارتی از تخلیه سطح، باعث فرآیند فرسایش تغییرات

دی الکتریک و مورفولوژیکی جامد،

- * افزایش حداکثر بار Qm به همراه افزایش ولتاژ آزمایش اعمال شده
- * الگوهای PD q-p-q-n در طول روند فرسایش فرآیند تغییر می‌کنند و منجر به ایجاد آثار محلی در سطح مواد عایق می‌شود.

باتوجه به یونیزاسیون هوا در لبه الکترودهای HV، تخلیه بار روی سطح مواد دی الکتریک رخ می‌دهد. هنگامیکه ولتاژ متناوب تغییر می‌کند، این هزینه‌ها منجر به اثرات حافظه می‌شوند. در نیمه بعد از ولتاژ AC این سطوح سطحی ممکن است روی مواد دی الکتریک خنثی شود. مکانیسم که الکترونها را به سطح دی الکتریک می‌کند، به شدت وابسته به قطب است. هنگامیکه الکتروود دارای قطب منفی است، الکترونها آزاد در نزدیکی الکتروود میله‌های میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و یک انفجار الکترون در امتداد خط الکتریکی به سمت مواد دی الکتریک ایجاد می‌شود. در ناحیه یونیزاسیون، برخی از الکترونها توسط اتم‌های گازهای الکترون‌گاتیو مانند اکسیژن در هوا متصل می‌شوند و یونهای منفی ایجاد می‌کنند. بار منفی باعث "تجمع بار" می‌شود که تأثیر تخریب بعدی توسط اثر اوجاج میدان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یونهای مثبت در نزدیکی الکتروود میله‌ای وجود دارند و میدان الکتریکی بین الکتروود و یون مثبت افزایش می‌یابد. به طور خاص، در زیر قطب منفی الکترودهای میله، الکترونها در سطح دی الکتریک قرار می‌گیرند. پس از انفجار میدان، این الکترونها به عنوان الکترونها آغازین تبدیل می‌شوند. هنگامیکه الکتروود دارای قطب مثبت است، در اطراف میله‌های پلیمری، میله‌ای از الکتروود به ماده دی الکتریک شروع می‌شود.

جریانهای مثبت، به نام روده‌های اولیه [۱۲]، بر روی سطح دی الکتریک تا حدی خنثی می‌شوند. صرفنظر از تعامل با اتلاف سطوح، تعامل الکترونها در سطوح انرژی پایین تحت سطح دی الکتریک رخ می‌دهد. انتشار انفجار الکترونی در تخلیه سطحی جریان، با در نظر گرفتن تله‌های سطح در دی اکسید کربن جامد هوا، ضرایب اصلاح شده یونیزاسیون الکترون α و اتصال Π_p صورت می‌گیرد. الکترونها ممکن است از تله‌ها منتشر شوند و به تشکیل بهمن کمک کنند، یا اینکه در فرآیند معکوس، رسوب الکترونها در تله‌ها (Π_p) مشارکت کنند. پوسیدگی سطحی به طور عمده به دلیل خنثی سازی حجمی، هدایت سطح و خنثی سازی گاز رخ می‌دهد [۱۳]. با اینحال این فرآیندها، به عنوان مثال در [۱۳] ارائه شده، خیلی کندتر از دوره ولتاژ آزمون هستند. هزینه‌های ذخیره شده روی سطح دی الکتریک



شکل ۵. تکامل الگوهای PD برای پی‌کربندی رابط Cu/EPR (ستون سمت چپ) و Cu/XLPE (ستون سمت راست) در طول آزمون کهنگی ۴۰۰ ساعت



توصیف شده از سطح پایدار PD توضیح می‌دهد که شکل‌های الگوهای فاز حل شده است. تغییرات آنها در طول مراحل کهنگی مربوط به تشکیل منابع محلی بر روی سطح مواد و اصلاح توزیع میدان الکتریکی است.

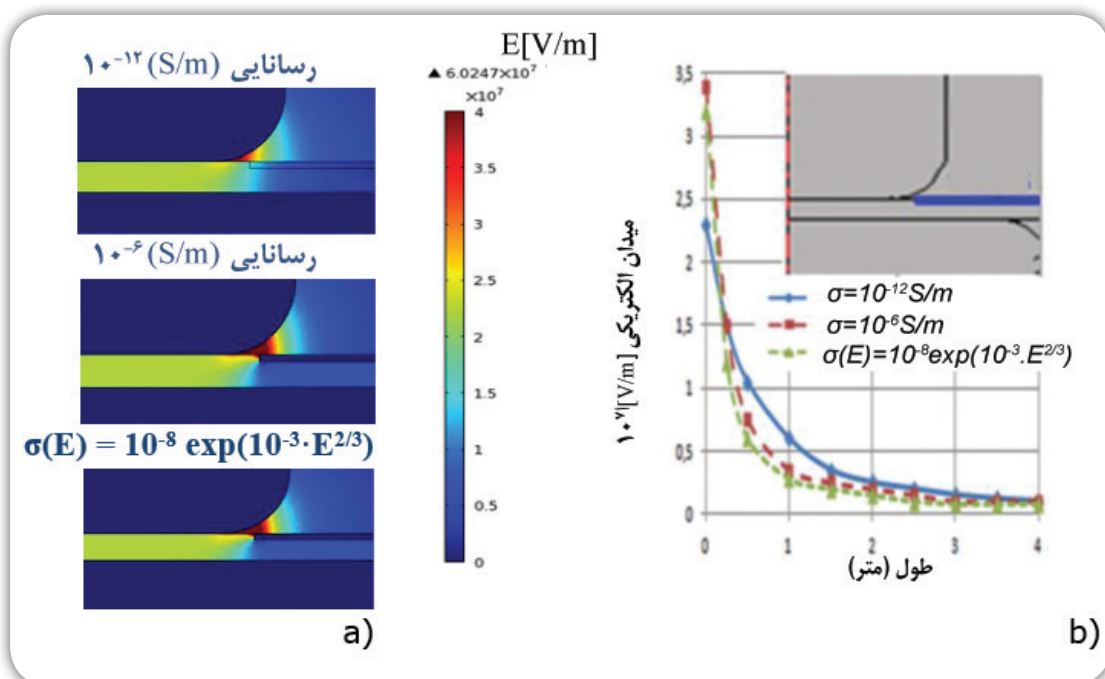
۴-۱-۴- مکانیسم تقویت PDIV در طی فرسایش

تخلیه جزئی بر روی سطح دی‌الکتریک در اطراف الکتروود HV باعث فرسایش می‌شود، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است. مدلسازی میدان الکتریکی در ناحیه مذکور به علت توزیع میدان الکتریکی در سیستم الکتروود (غیرهم‌جوار) و تغییرات آن در طی گسترش کانال‌های تخلیه، یک مشکل بسیار پیچیده است. در شرایط اولیه SPD و گسترش آن، هدایت هوا و سطح به علت یونیزاسیون، به ویژه در نزدیکی الکتروود HV تغییر می‌کند. در محاسبات میدان الکتریکی، در یک مدل ساده می‌توان حالت نیمه استاتیک را که حاوی موارد مرزی است نشان داد، اولین مرز، نمایانگر زمانی است که SPD رخ ندهد و مرز دوم نشان دهنده زمانی است که نوک باریک ثابت باقی می‌ماند و شرایط پیشرفته را نشان می‌دهد. تخلیه جریان یافته در ناحیه ۲ (شکل ۱) گسترش می‌یابد و جریان بر روی خط مرزی متوقف می‌شود. اگر جریان نوک کمتر از یک مقدار بحرانی باشد، جریان دهنده متوقف می‌شود.

بر روی میدان الکتریکی در انحراف قطبی الکتروود HV تأثیر می‌گذارد. آنها منجر به تخلیه پایدار می‌شوند که، مشخصه‌ای برای مکانیزم تخلیه سطح است. تخلیه که در امتداد سطح ماده عایق با ϵ_r ضریب نفوذ نسبی پخش می‌شود، همچنین دارای یک مؤلفه هوا است که در هوای آزاد پخش می‌شود. توصیف مکانیزم فرآیند فرسایش می‌تواند اینگونه فرض شود:

- * افزایش هدایت در لایه سطح نازک مواد جامد،
- * افزایش محلی دما در کانال جریان،
- * تغییرات هدایت سطح γ مواد جامد،
- * تعامل با بار جاری با سطح ماده، که به علت اثرات الکتریکی گرما منجر به تغییرات مورفولوژی مواد دی‌الکتریک می‌شود.

در مراحل اولیه آزمایش می‌توانیم یک سطح همگن و یک رسانای دی‌الکتریک جامد را در نظر بگیریم، جاییکه تراکم جریان جاری مربوط به مؤلفه‌های مماسی میدان الکتریکی E_t در سطح ماده است. با اینحال، در مراحل بعدی آزمایش، هدایت سطح ثابت نیست، ناهمگنی منجر به انباشت بار حجم در مواد می‌شود. به طور مشابه، عدم انحراف منجر به انباشت بار سطحی می‌شود. مکانیزم "اثر حافظه" به قطبش الکتروود میله بستگی دارد. این اثر بر روند فرسایش مواد دی‌الکتریک تأثیر می‌گذارد. مکانیسم



شکل ۶. قدرت میدان الکتریکی در ناحیه فرسایش به عنوان تابعی از مقاومت سطح: (a) مقطع عرضی، (b) میدان الکتریکی در امتداد طول مشخص شده به عنوان نوار آبی

(ستون سمت راست شکل 6b - سمت چپ صفحه طرح)، اما پس از آن میدان الکتریکی تمایل به افت دارد (سمت راست صفحه طرح در شکل 6b)، در نتیجه PD ولتاژ شروع فرسایش افزایش می‌یابد.

۴-۲- تأثیر زمان کهنگی برتنزل پلیمر

۴-۲-۱- تجزیه و تحلیل سطح میکروسکوپی نوری

تصویر میکروسکوپی سطحی به دست آمده از میکروسکوپ نوری در شکل ۷ نشان داده شده است. پس از تعامل با الکتروند Cu، در طول زمان کهنگی ۴۰۰ ساعت، ۳ ناحیه قابل تشخیص برای نمونه‌های XLPE و EPR وجود دارد (در شکل ۱ نشان داده شده است). در مورد EPR، ردیفه‌های کریستالی به شکل امواج منظم در زیر الکتروند در ناحیه ۱ و در شکل ضخیم‌تر در ناحیه ۲ شکل می‌گیرند. برای XLPE، سطح زیر الکتروندهای Cu و در منطقه فرسایش، تا شده و سوراخ‌دار است.

برای شبیه‌سازی میدان الکتریکی در یک آرایش الکتروند از شکل ۱، رویکرد مقاومت-خازنی در مدل‌سازی استفاده شد. سطح مواد دی‌الکتریک حاوی آثار فرسایش نشان دهنده یک بخش تخلیه در مدار معادل است، سطح مقاومت قطعه تخلیه (نشان داده شده به عنوان نوار آبی در شکل 6a) در طی کهنگی کاهش می‌یابد، زمانیکه ساخت یک لایه رسانا رخ می‌دهد. سه مورد مقایسه شده است، اولین مورد نشان دهنده هدایت سطح پایین 10^{-12} S/m ، مورد دوم با 10^{-6} S/m و آخری که در آن هدایت سطح تقریباً با یک تابع وابسته به زمینه E غیرخطی برطبق $\sigma(E) = 10^{-8} \exp(10^{-3} \cdot E^{2.3}) \text{ [S/m]}$ می‌باشد.

رابطه میدان نیروی الکتریکی در ناحیه فرسایش به عنوان تابعی از مقاومت سطح در شکل 6a نشان داده شده است. میدان الکتریکی بالا در اطراف نقطه سه گانه (هوا-دی‌الکتریک-الکتروند) به طور شعاعی در ناحیه ۲ که در جهت مقاومت سطح پایین، تحت فشار قرار می‌گیرد، می‌توان اثر را مشاهده کرد. به دلیل بالا بودن یونیزاسیون در الکتروند، این ناحیه را می‌توان به عنوان رسانایی

سطح	۱- زیر الکتروند	۲- پیرامون	۳- جدید
Cu/EPR			
Cu/XLPE			

شکل ۷. میکروسکوپی‌های سطحی سه ناحیه (کدگذاری شده به شکل ۱) پس از ۴۰۰ ساعت کهنگی برای XLPE و EPR با الکتروندهای Cu. نوار سیاه نشان داده شده در تصاویر با $500 \mu\text{m}$ مطابقت دارد



الکتروُد Al و اکسید جاسازی شده در EPR سخت بود، اما در EPR، محتوای Al پایین می‌باشد (کمتر از ۳٪)، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش Al زیر الکتروُد به دلیل نفوذ از الکتروُد است. جدول ۱. متوسط ترکیب بنیادی سه ناحیه مختلف پس از تعامل عایق

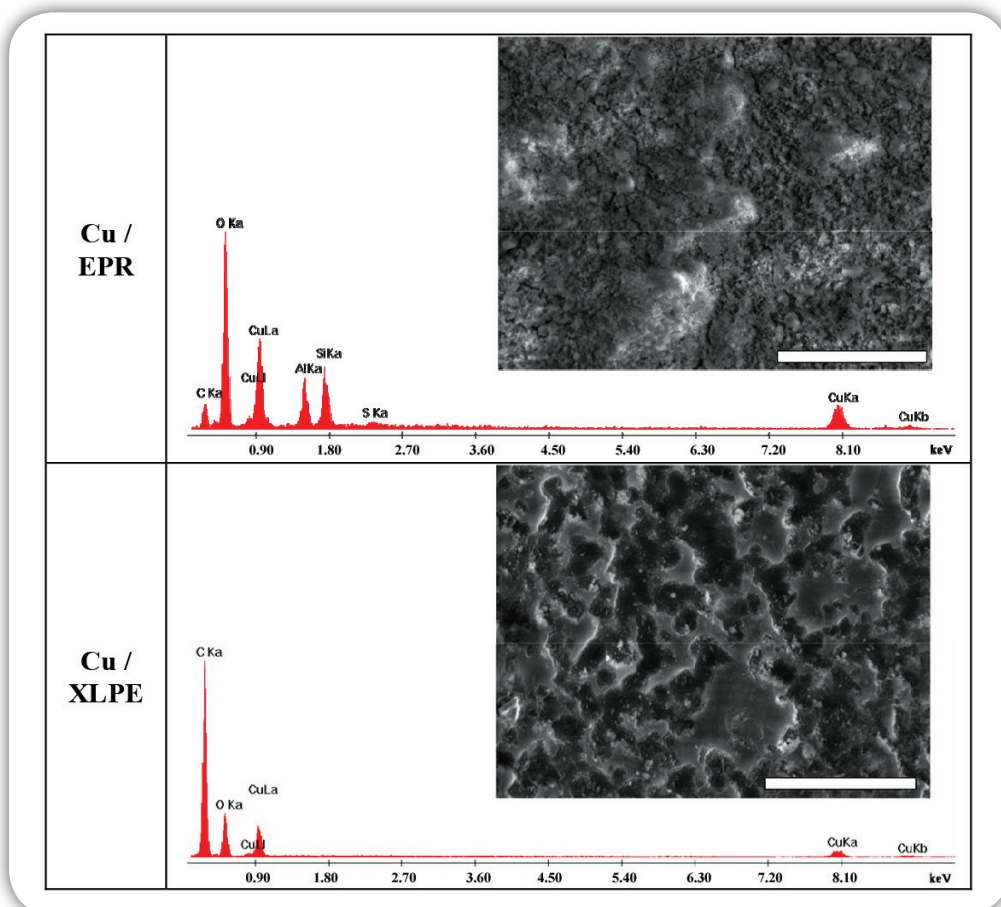
Cu و EPR با الکتروُد XLPE

مواد عایق	ناحیه	مقدار مس (%)		
		۴۰۰ ساعت	۲۰۰ ساعت	۵۰ ساعت
EPR	۱	۵/۵۰	۰/۳۰	۰/۱۸
	۲	۰/۵۱	۰/۱۸	۰/۱۷
	۳	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۷
XLPE	۱	۱/۴۰	۰/۲۰	۰/۱۰
	۲	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰
	۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

۲-۲-۴- تجزیه و تحلیل میکروسکوپی سطح پلیمر توسط

SEM و تجزیه و تحلیل بنیادی توسط EDS

میانگین ترکیبات بنیادی که در چندین محل در سه ناحیه از عایق‌های EPR و XLPE در آزمایشات کهنگی با الکتروُد‌های مس انجام شده‌اند، در جدول ۱ نشان داده شده است. هر دو میانگین (گرفته شده از کل تصویر SEM) و تجزیه و تحلیل EDS بر روی نقاط انتخاب شده در زیر الکتروُد (ناحیه ۱) حضور اتم‌های فلزی در پلیمر را نشان می‌دهد. شکل ۸ تصاویر SEM و سیگنال EDS عناصر مختلف را روی سطح در زیر الکتروُد پس از ۴۰۰ ساعت کهنگی نشان می‌دهد. به طور کلی برای تمام نمونه‌های مورد بررسی، مشخص شد که مواد الکتروُد از فلزات به عایق منتقل می‌شوند. به طور خاص، دو قله در حدود ۸/۹ keV و ۸ keV و یک قله در ۰/۸۵ keV برای Cu/XLPE از Cu نشان می‌دهد. در مورد EPR به علت اضافه شدن Al_2O_3 ، بین سیگنال Al از



شکل ۸. تصاویر SEM و طیف EDS نشان‌دهنده اثرات متقابل نوع الکتروُد مختلف بر روی عایق در ناحیه ۱ پس از زمان کهنگی ۴۰۰ ساعت. میله‌های مقیاس سفید به اندازه ۵۰ μm می‌باشد

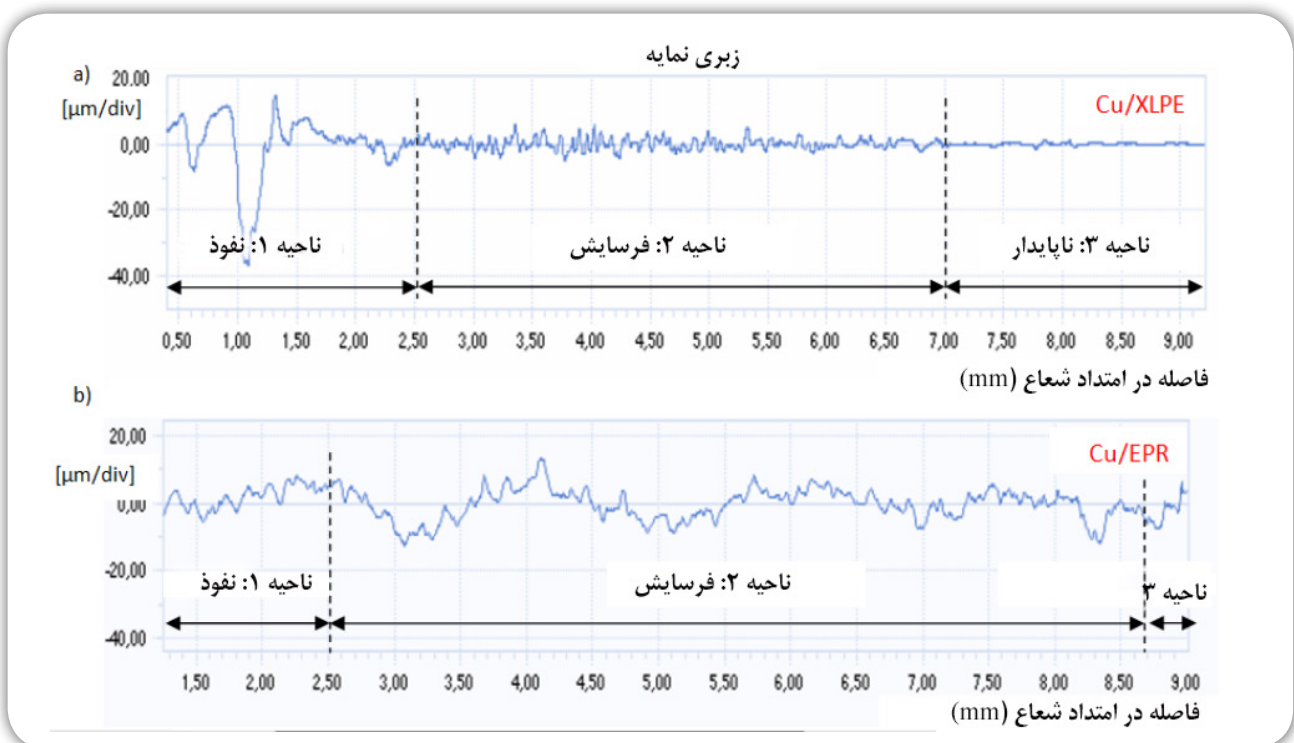
به پلیمر ونیز واکنش‌های شیمیایی AL با یک ماده سازنده EPR مربوط باشد زیرا Al_2O_3 در فرآیند فن‌آوری افزوده می‌شود.

۴-۲-۳- میکروسکوپ الکترونی از سطح الکتریکی

قطعه‌های ریز شده برای نمونه‌های EPR و XLPE با الکتروند Cu در شکل ۹ نشان داده شده است. ۳ ناحیه متناظر با نفوذ، فرسایش و غیر قابل تحمل است. مقایسه مشخصات زبری سطح Cu/XLPE (شکل ۹a) بین ناحیه ۱ (زیر الکتروند) و ناحیه ۲ (منطقه تخلیه سطحی) می‌تواند اثرات متمایز را تشخیص دهد.

ایجاد فرسایش شعاعی با توجه به سطح PD در ناحیه ۲ نشان داده شده است که در آن رگه‌های کوچک تا ارتفاع $5\mu m$ شکل می‌گیرند. درحالی‌که در ناحیه ۱ زیر الکتروند، سطح نسبتاً صاف است، اما نوع شیب‌دار $30\mu m$ و شکل‌دهی دیده می‌شود. این ممکن است فعالیت‌های حرارتی را در ناحیه الکتروند، روی رابط Cu/XLPE نشان دهد. مشخصات زبری در مورد Cu/EPR اثرات چین و چروک در منطقه ۲ را با مقدار تا $10\mu m$ به طور مداوم هر $2/5\text{ mm}$ در امتداد شعاع با ردیابی فرسایش زیاد تکرار می‌کند. در زیر الکتروند (ناحیه ۱)، سطح EPR در مقایسه با XLPE بهتر

ساختار سطح XLPE نشان داد که پس از فرایند کهنگی بیش از حد حرارت داده شده و احتمالاً ذوب شدن پلیمر در طی کهنگی رخ داده است. در حالیکه در حالت مذاب، پلیمر می‌تواند به راحتی توسط یون‌های فلزی نفوذ کند. علاوه بر این، قابل توجه است که افزایش مقدار اکسیژن در ناحیه زیر و اطراف الکتروند در رابطه با مواد عایق نشده تحت پوشش قرار گرفته است، که به وضوح نشان می‌دهد که اکسیداسیون مواد عایق ساخته شده است. ساختارهای شیمیایی EPR و XLPE مشابه هستند، هر دو از زنجیرهای هیدروکربن هستند، اما با درجه بلوری متفاوت، برای EPR ۵ تا ۲۵ درصد و برای XLPE ۵۰ تا ۶۰ درصد پس از زمان کهنگی، حضور هر دو Cu و Al در پلیمر ثبت شد. محتوای متوسط Cu در سطح صاف EPR حدود ۰/۲ درصد و در XLPE در حدود ۲ درصد بود. محتوای متوسط Al در EPR حدود ۴ درصد و در XLPE حدود ۶ درصد بود. می‌توان گفت که محتوای مس در جریان فرایندهای تکنولوژیکی در هر دو تای XLPE و EPR وجود ندارد. بنابراین، فرض بر این است که حضور سطحی Cu به دلیل نفوذ اتم در فعالیت PD است. به طور مشابه، مشاهده AL در XLPE ممکن است به عنوان نفوذ از اتم‌های آلومینیوم به پلیمر مورد استفاده قرار گیرد. ظاهر سطح آلومینیوم در EPR ممکن است به نفوذ اتم‌های آلومینیوم



شکل ۹. نمای ریز شده برای Cu / EPR و Cu / XLPE به دست آمده در ناحیه ۳ (SIN، ۴۰۰ ساعت).



در طول یونیزاسیون در هوا و تعامل بین فلز و پلیمر حاصل شود. هر دو اثر با استفاده از SEM در XLPE/EPR و در الکتروود Cu/Al مشاهده شد.

ممکن است فرض کنیم که ذرات یونیزه شده توسط میکرویزاسیونها منبع انباشت بار هستند. مطالعات تجربی ما نشان می‌دهد که چگالی بار سطح در طول زمان کهنگی افزایش می‌یابد.

برای دوره کهنگی PDهای کم مقدار، که ممکن است در توزیع فاز شارژ ضبط شده در ابتدای دوره آزمایشی دیده شوند، ناپدید می‌شوند و به شدت کم و PDهای شار بالا جایگزین می‌شوند. پلیمر رابط - فلزی ساختار غیرایده‌آل است، در نتیجه اثرات پیچیده‌ای را برای بارگذاری، انتقال یونی و اتمی به همراه می‌آورد. در تنظیمات تحقیق، پدیده‌های مشاهده شده در دو ناحیه دیده می‌شود که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. فرسایش ناحیه اطراف الکتروود HV که به علت مقاومت شدید میدان الکتریکی و تخلیه سطحی، تخریب سطح را با افزایش زبری، در نتیجه در طول کهنگی PDIV افزایش می‌یابد. منطقه بحرانی که SPD رخ می‌دهد، تشکیل شده از خازن تقسیم - خازن هوا C_A - جامد خازن دی‌الکتریک C_S ، که در شکل ۱۰ در اطراف الکتروود HV مشخص شده است. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، PDIV نشان دهنده گرایش افزایش رشد فرسایش و کاهش مقاومت سطح می‌باشد.

این بدان معنی است که شکل پالس تخلیه از بین می‌رود زیرا ردیابی‌های فرسایشی یک لایه رسانایی در کشش ناحیه بحرانی جاییکه یونیزاسیون رخ می‌دهد، ایجاد می‌کند. فیلم هدایت کننده، توزیع میدان الکتریکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوری که در خارج از این ناحیه قطب زمین زیر سطح بحرانی، برای شروع PD مورد نیاز است.

نتایج ارائه شده جنبه حیاتی تفسیر اندازه‌گیری PD را برای ارزیابی فرآیندهای تخریب در ساختار مواد پلیمری نشان می‌دهد، به دلیل کاهش شدت PD و PDIV با کهنگی و رشد ردیابی ریزش‌های رسانا افزایش می‌یابد. هنگامیکه به درستی تفسیر شود، معیارهای ارزشمندی برای تحلیل روند بر مبنای تحولات الگود PD و ارزیابی PDIV فراهم می‌کند. در ناحیه تحت الکتروود HV، قدرت میدان الکتریکی پایین‌تر و پایدارتر است، بنابراین فرسایش کمتر رخ می‌دهد. با اینحال، در این منطقه، نفوذ اتمهای الکتروود (به عنوان مثال Cu/Al) به سطح دی‌الکتریک مشاهده شد. غلظت افزایش اتمهای Cu در هر دو لایه رابط EPR و XLPE در هنگام کهنگی مشاهده شد.

است. در مقایسه با هر دو نمایه XLPE و EPR، نتایج یک ساختار درشت‌تر را به ویژه در ناحیه ۲ بوجود می‌آورند. حداکثر ریزش‌دگی در ناحیه ۳، ناحیه ناپایدار نمونه Cu/EPR، در سطح $7\mu\text{m} \pm$ و در متوسط $3\mu\text{m} \pm$ می‌باشد.

۵- بحث

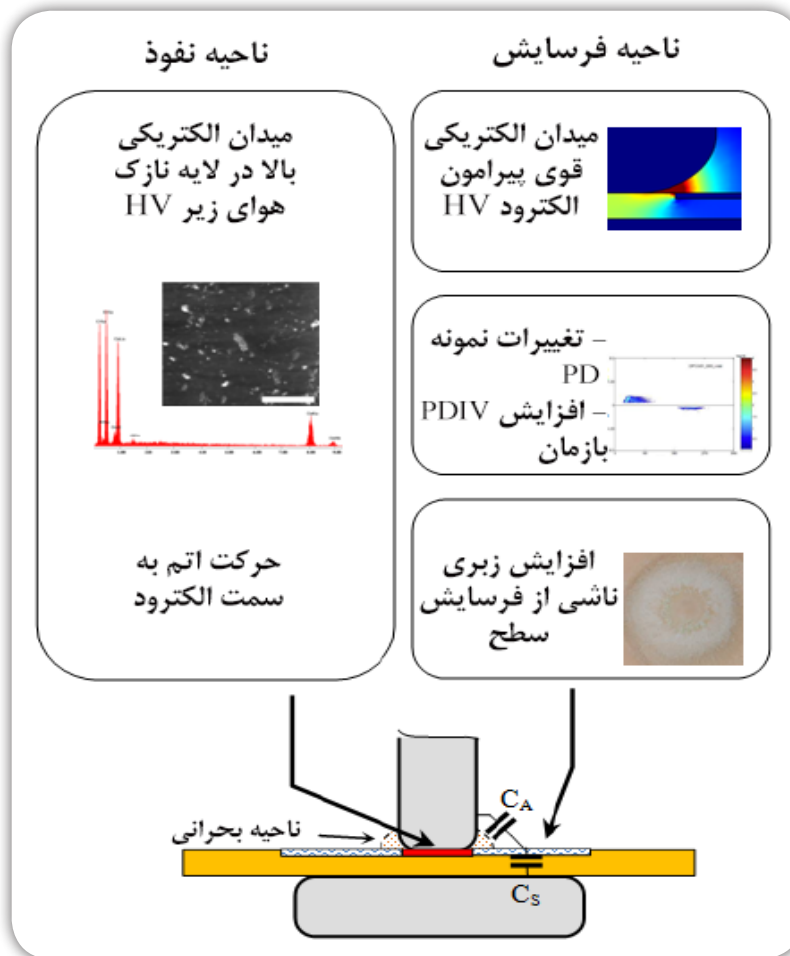
تغییرات قابل توجهی از سطح دی‌الکتریک پس از کهنگی حاصل فرایندهای الکتریکی، حرارتی و شیمیایی بوجود می‌آید. الکترون‌ها، یون‌ها و اتم‌های فعال با انرژی زیاد در جو ذره‌ای با تخلیه‌های جزئی در میدان الکتریکی بالا درجاییکه هادی/دی‌الکتریک جامد/ گاز وجود دارد تولید می‌شود. آنها انرژی را از طریق برخورد با سطح مواد پلیمری انتقال می‌دهند و باعث ایجاد نقاط داغ در مواد می‌شوند. این واکنش‌ها باعث ایجاد حفره‌ها و آثار درختی مانند، در سطح پلیمر می‌شوند. بررسی سطوح پلی اتیلن در غلظت اکسیژن مختلف نشان می‌دهد که تخریب اکسیداتیو یک فرآیند اصلی و تولید چاله‌ها در یک سطح تخریب شده نمونه‌هایی است که درون یک فضای گاز حاوی اکسیژن قرار دارند.

تخلیه‌های جزئی موجب تغییرات ناحیه فرسایش و ناحیه نفوذ شده که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. اولین عنصر مربوط به سطح دی‌الکتریک در اطراف الکتروود HV (ناحیه ۲)، نشان دهنده افزایش زبری سطح است، در حالیکه جنبه دوم مربوط به رابط metaldielectric (فلز دی‌الکتریک) (ناحیه ۱) است.

اثرات سطحی از اکسیداسیون و افزایش هدایت حاصل می‌شود. این اکسیداسیون ممکن است در محدوده $100\mu\text{m}$ در ماده گسترش یابد [۷].

همانطور که می‌دانیم، اکسیداسیون مواد مانند پلی اتیلن منجر به افزایش هدایت از طریق تشکیل ترکیبات شیمیایی مانند گروه‌های کربونیل است که به محل‌های hopping به دی‌الکتریک کمک می‌کند، به عنوان مثال تله‌های عمق نسبتاً کم عمق [۸]. اثر دوم توسط نویسندگان مشاهده شده است، محتوای مس در پلی اتیلن، ممکن است توسط یک اثر قوی یونی الکتروود فلز با ماتریس پلی اتیلن ایجاد شود. فعالیت‌های تخلیه سطحی باعث تکامل نانو ساختار پلیمرها می‌شود. زبری سطح مواد اطراف الکتروود در طول آزمون‌های طولانی افزایش یافت.

در طی کهنگی، الگوهای PDIV و PD تغییر و برای مدت زمان طولانی‌تر تخلیه، PDIV افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد اثر افزایش PDIV نشان دهنده تغییرات مرتبط در توزیع میدان الکتریکی در اطراف الکتروود است. این می‌تواند از طریق اکسیداسیون پلیمر



شکل ۱۰. تصویری از فرسایش و مناطق نفوذ به دلیل فعالیتهای تخلیه جزئی

ایتمهای الکترودهای Cu و Al تأیید شد. در این مکانیسم تمرکز تحقیقات بیشتری باقی می ماند و علت آن ممکن است مربوط به الکترودهای الکترونیکی باشد. اگرچه ولتاژ اعمال شده سینوسی و متقارن است، اثر نامتقارن ممکن است توسط یک لایه نازک اکسید تشکیل شده در سطح پلیمری و توسط تخلیه شتاب ایجاد شود. چنین لایه اکسیدی مانع، ممکن است حمل و نقل یونهای فلزی نسبت به پلیمر را افزایش دهد. نفوذ اتم هادی به دی الکترونیک به عنوان یک پروسه طولانی مدت در سیستمهای عایق الکترونیک HV می تواند بر تغییرات ساختاری پلیمر و ایجاد منابع تخلیه تأثیر بگذارد.

Barbara Florkowska, Jozef Roehrich, Pawel Zydron
AGH University of Science and Technology, Department
of Electrical and Power Engineering
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

این اثر برای الکترودهای Cu و Al تأیید شد. در این مکانیسم تمرکز تحقیقات بیشتری باقی می ماند و علت آن ممکن است مربوط به الکترودهای الکترونیکی باشد. اگرچه ولتاژ اعمال شده سینوسی و متقارن است، اثر نامتقارن ممکن است توسط یک لایه نازک اکسید تشکیل شده در سطح پلیمری و توسط تخلیه شتاب ایجاد شود. چنین لایه اکسیدی مانع، ممکن است حمل و نقل یونهای فلزی نسبت به پلیمر را افزایش دهد. نفوذ اتم هادی به دی الکترونیک به عنوان یک پروسه طولانی مدت در سیستمهای عایق الکترونیک HV می تواند بر تغییرات ساختاری پلیمر و ایجاد منابع تخلیه تأثیر بگذارد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله دو جنبه در محرکهای سینوسی، فرسایش و نفوذ



پارامترهای اساسی در طراحی دوزه‌ها و مفاهیم مربوط به فرآیند کشش مفتولها

ترجمه: مهندس حمید اوجاق فقیهی (کارشناس ارشد برق - قدرت)

مقدمه

امروزه صنعت سیم و کابل در بخش کشش مفتول نیاز به یافتن روشهای تولیدی دارد که کیفیت بهتر مفتول کشیده شده را با کمترین هزینه در پی داشته باشد. تلاشها و تحقیقات بسیاری در این زمینه به کار گرفته شده است و نتیجه آن دستگاههای مدرن با سرعت بالای امروزی می‌باشد. با ماشین‌آلات بسیار مدرن بدون دوزه، هیچ مفتولی کشیده نخواهد شد و همچنین دوزه با کیفیت پایین می‌تواند تمام تلاشهای فوق را نقش بر آب کند، پس باید قبل از هر بهبودی در خطوط تولید و ماشین‌آلات، بتوانیم تکنیک دوزه‌سازی خود را بهبود بخشیم. کشش مفتول، عملیاتی است جهت کاهش قطر یا تغییر شکل مقطع مفتول توسط دوزه یا حدیده کشش با ترانس محدود و صافی سطح متفاوت. عملیات کشش هیچگونه تغییری در درصد عناصر شیمیایی آلیاژ مفتول ایجاد نمی‌کند و فقط خواص مکانیکی یا فیزیکی از قبیل: سختی، حد مقاومت کشش، حد الاستیسیته و همچنین کیفیت سطح را تغییر می‌دهد.

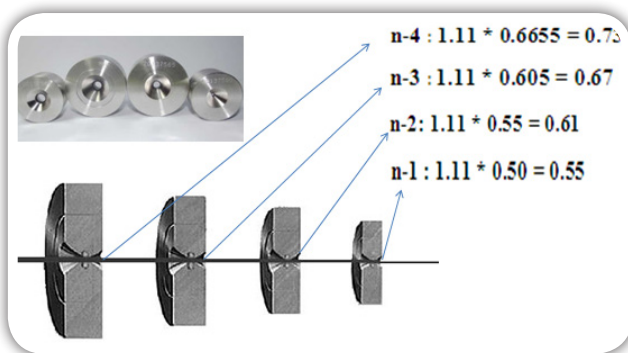
مفهوم کشش مفتول



در این فرآیند حجم مفتول ثابت باقی می‌ماند، بنابراین با کاهش قطر مفتول، طول آن افزایش می‌یابد. معمولاً برای رسیدن به قطر مطلوب، لازم است مفتول بیش از یک مرتبه و در هر مرحله

فرآیند کشش مفتول، مفهوم نسبتاً ساده‌ای دارد. به وسیله کشش، مقطع ابتدای مفتول کوچک می‌شود تا ابتدای مفتول بتواند از قالب (حدیده) عبور کند، سپس مفتول از درون حدیده کشیده می‌شود.

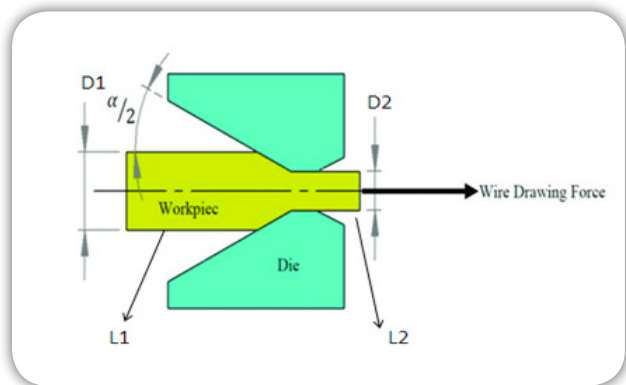
برای مقایسه نرمی و سختی دو مفتول با یکدیگر، می توان از کمیت درصد افزایش طول نیز بهره برد. به این معنی که در آزمون کشش، مفتولی که درصد ازدیاد طول آن تا حد گسیختگی بیشتر باشد قطعاً نرمتر و شکل پذیرتر می باشد. با مشخص بودن درصد ازدیاد طول دستگاه کشنده و قطر مفتول نهایی می توان از رابطه فوق برای حدیده گذاری در دستگاه کشش استفاده کرد. به عنوان مثال اگر قطر مفتول نهایی ۰/۵ و ازدیاد طول دستگاه ۲۵ درصد باشد، بر این اساس حدیده گذاری در چهار خط متوالی به صورت زیر انجام می شود:



طراحی دای یا دوزه

طراحی دوزه های کشش بستگی زیادی به نوع و جنس مفتولی که باید توسط آنها کشیده شود، دارد. شکل زیر شمای کلی یک دوزه را نشان می دهد.

از میان حدیده ای با قطر کوچکتر کشیده شود. در مقیاس کوچک، این فرایند می تواند با استفاده از صفحه کشش و در مقیاس تجاری بزرگ با استفاده از ماشین آلات خودکار انجام می شود. فرایند کشش مفتول، نوعی کار سرد است؛ به همین دلیل خواص ماده را تغییر می دهد. کاهش سطح مقطع در مفتولهای با مقطع کوچک عموماً ۱۵ تا ۲۵ درصد و در مفتولهای با مقطع بزرگ ۲۰ تا ۴۵ درصد است. در فرایند کشش مفتول، توالی دقیق حدیده ها تابعی از کاهش سطح مقطع، اندازه مقطع مفتول ورودی و اندازه مقطع مفتول خروجی است. هنگامیکه میزان کاهش سطح مقطع مفتول تغییر کند، توالی حدیده ها هم باید تغییر کند. شکل زیر مفهوم ساده کشش مفتول را نشان می دهد:



با استفاده از رابطه تساوی حجم مفتول قبل و بعد از کشش داریم:

$$(\eta/4)D_1^2L_1 = (\eta/4)D_2^2L_2$$

$$L_2/L_1 = D_1^2/D_2^2$$

$$D_1/D_2 = \sqrt{1+e\%}$$

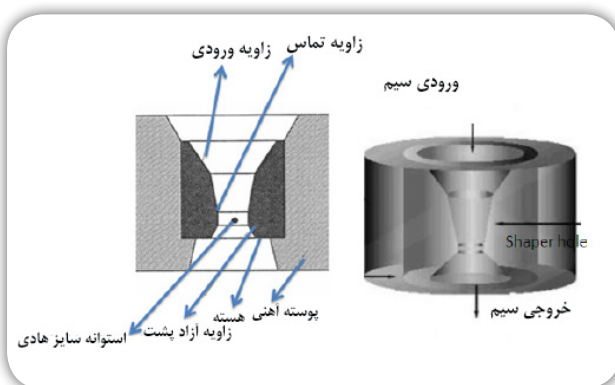
e به عنوان درصد ازدیاد طول می باشد. در اثر کاهش سطح مقطع در عملیات کشش با افزایش طول مواجه می شویم. این کمیت نیز به صورت درصد افزایش طول (Elongation) طبق فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$E = \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 - 1 \right] \times 100$$

E درصد افزایش طول

D₁ قطر مفتول اولیه

D₂ قطر مفتول بعد از کشش



پوسته

جنس پوسته اصلی از آهن معمولی بوده و وظیفه اصلی آن در برگرفتن هسته و جلوگیری از ترکیدن آن در اثر نیروهای کشش می باشد. در موقع ساخت پوسته خارجی دوزه، رعایت دو نکته حائز اهمیت است. یکی هم مرکز بودن پوسته خارجی با هسته مرکزی



به طرف زاویه تماس است. یعنی جایی که پودر یا روانساز به سطح مفتول در هنگام کشش می‌چسبد. وضعیت سطح این زاویه نیز چندان اهمیت ندارد.

زاویه تماس^۱

زاویه تماس مهمترین قسمت یک دوزه کشش مفتول می‌باشد. تمام کاهش سطح مقطع و فشردگی پودرکشش برروی مفتول درحال عبور در این قسمت رخ می‌دهد. بازدهی هر دوزه کشش مفتول بستگی به طراحی و دقت عمل این سطح تماس دارد که می‌بایست به دقت تراشیده و کاملاً پرداخت گردد. ضلع‌های این زاویه می‌بایست صاف و بدون هرگونه شعاع یا برآمدگی در تمام سطح باشد. زاویه تماس می‌بایست با دقت و با تجهیزاتی ماشینکاری گردد که سطوح آن با استوانه قسمت سایز دارای یک محور باشند. به علاوه این زاویه با پوسته آهنی نیز باید هم مرکز باشد. زاویه تماس و ابعاد هسته و پوسته بر طبق استاندارد مطابق جدول زیر است:

و دیگری لق نبودن هسته در جای خود. برای رفع چنین مشکلی محفظه هسته را چند صدم میلی‌متر تنگتر از اندازه اصلی هسته تراش داده و سپس پوسته را در کوره قرار می‌دهند و پس از سرخ شدن هسته را در محل خود گذاشته و به آرامی و دقت آن را پرس می‌کنند. پس از سرد شدن در دمای محیط می‌توان عملیات بعدی را بر روی آن انجام داد.

در مورد هسته‌های بسیار کوچک و ارزان قیمت از پوسته‌های پیچ و مهره‌ای استفاده می‌کنند یعنی هسته را در محفظه خود توسط پیچ و مهره مخصوصی محصور می‌نمایند.

هسته^۲

همانگونه که قبلاً هم اشاره شد در اکثر موارد جنس هسته از تنگستن کارباید انتخاب می‌شود و دارای زوایای مختلفی به شرح زیر می‌باشد:

زاویه ورودی^۳

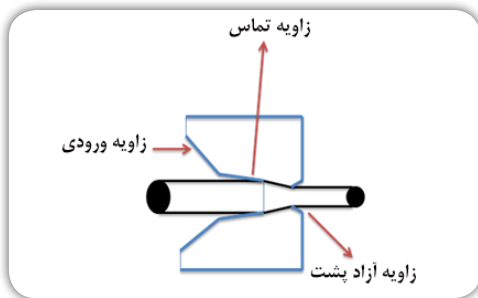
عمل زاویه ورودی جهت دادن به پودر یا سایر روانسازهای کشش

WWW.SBARGH.IR

اندازه استاندارد هسته mm		اندازه استاندارد پوسته mm		زاویه تماس (درجه)	حداکثر اندازه مفتول ورودی (mm)
قطر	ارتفاع	قطر	ارتفاع		
۸/۳	۶	۲۵/۴	۱۲/۷	۱۲	۳
۱۱/۴	۹/۶	۳۱/۷	۱۹	۱۲	۵/۳
۱۲/۷	۱۱/۴	۳۱/۷	۲۲	۱۲	۶/۷۵
۱۵/۸	۱۵/۲	۳۸/۱	۲۲	۱۲	۸/۲
۱۸	۱۷/۷	۵۰/۸	۲۸/۵	۱۲	۱۰/۱۶
۱۹/۵	۱۹/۵	۷۶/۲	۳۴/۱	۱۶	۱۲/۴۴
۲۵/۴	۲۰/۸	۷۶/۲	۴۴/۴	۱۶	۱۵/۲۴
۳۰/۲	۲۰/۸	۷۶/۲	۴۴/۴	۱۶	۲۰
۳۸/۱	۲۵/۴	۸۶/۳	۵۰/۸	۱۶	۲۴/۷۶



شکل زیر نیز یک برخورد غیر صحیح مفتول ورودی با زاویه تماس را نشان می‌دهد. زاویه برای کاهش سطح مقطع زیاد مورد نیاز، بسیار کوچک می‌باشد. مفتول ورودی در نزدیکی بالای زاویه تماس با دوزه تماس پیدا می‌کند که این باعث کاهش سطح لازم برای فشردن پودر و در نتیجه کوتاه شدن عمر دوزه می‌گردد.

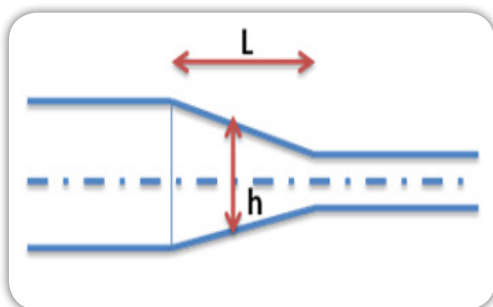


برخورد غیر صحیح مفتول در زاویه تماس

پارامتر دلتا

زاویه تماس شاید مهمترین پارامتر دوزه کشش برای اغلب کاربردها محسوب گردد. تأثیر زاویه تماس بر جاری شدن فلز (تغییر شکل) نمی‌تواند مستقل از کاهش سطح مقطع باشد و تکنیک‌های مدرن کشش هر دو این فاکتورها یعنی اندازه زاویه تماس و میزان کاهش سطح مقطع را در تغییر شکل فلزی مرتبط دانسته و پارامتر Δ را معرفی می‌نمایند.

دلتا (Δ) یک تعریف هندسی از ناحیه تغییر شکل یافته و نسبت اندازه ناحیه تغییر شکل یافته عمود به محور کشش (h) به اندازه ناحیه موازی با محور کشش (L) یا (h/L) می‌باشد.



تعریف دیگر دلتا در کشش مفتول به صورت تقسیم قطر متوسط مخروط کشش بر طول مخروط کشش می‌باشد محاسبه مقدار آن براساس فرمول زیر صورت می‌گیرد:

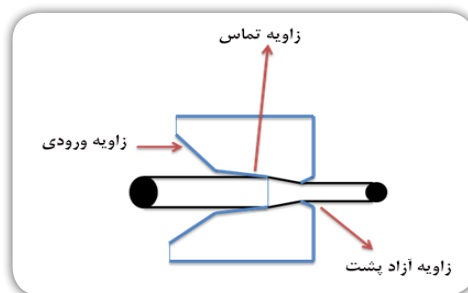
$$\Delta = \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1 - r})^2$$

امروزه سیستم‌های مدرن کشش مفتول، دیگر استاندارد زاویه تماس را به تنهایی معتبر نمی‌دانند و کاهش سطح مقطع و اندازه زاویه تماس را در ارتباط مستقیم با هم به صورت فرمول تجربی زیر تعریف می‌نمایند:

$$2\alpha = \frac{\text{درصد کاهش سطح مقطع}}{2} + 1$$

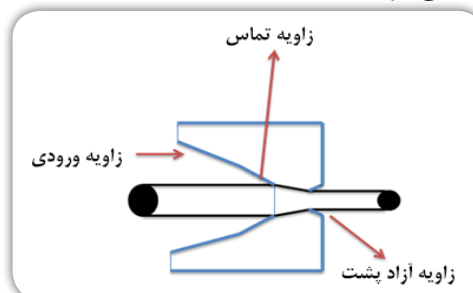
در این فرمول 2α زاویه تماس دوزه برحسب درجه می‌باشد.

نحوه تماس مفتول با دوزه کشش در زاویه تماس



برخورد صحیح مفتول در زاویه تماس

شکل بالا نقطه تماس صحیح مفتول در زاویه تماس را نشان می‌دهد، مفتول ورودی می‌بایست در وسط این سطح با دوزه تماس پیدا کند. در بالای نقطه تماس باید فضای کافی جهت ایجاد فشار برای تماس مواد کشش و فضای کافی برای مخروط کردن مفتول وجود داشته باشد. به این ترتیب عمر یک دوزه تا زمان از بین رفتن نصف سطح مخروطی زاویه تماس ادامه خواهد داشت. شکل زیر یک نقطه تماس غیر صحیح مفتول ورودی با زاویه تماس را نشان می‌دهد. زاویه برای کاهش سطح مقطع کم، بسیار باز است و مفتول ورودی در انتهای مخروط تماس پیدا می‌کند. تمام تغییر شکل فلزی در فاصله کوتاهی صورت می‌گیرد که باعث فرسایش سریع دوزه می‌گردد.



برخورد غیر صحیح مفتول در زاویه تماس



مقدار Δ برای زوایا و کاهش سطح مقطع‌های مشخص، بدون نیاز به محاسبه در اختیار می‌باشد. این مسأله بسیار مهم است که بدانیم تأثیر زاویه دوزه و کاهش سطح مقطع با همدیگر در نظر گرفته شوند. آنها بسیار مهم هستند زیرا شکل ناحیه تغییر فرم مفتول در دوزه را تعیین می‌کنند. (یعنی همان Δ) کنترل پارامتر Δ جهت جلوگیری از ایجاد ترک مرکزی در مفتول که عامل اصلی بریدن مفتول در پروسه کشش می‌باشد، بسیار مهم است. همچنین با این کنترل همواره سیلان یکنواخت فلز در هنگام مفتول کشی را خواهیم داشت.

پی‌نوشت‌ها:

1. Shell
2. Core
3. Input angle
4. Contact angle
5. Delta parameter

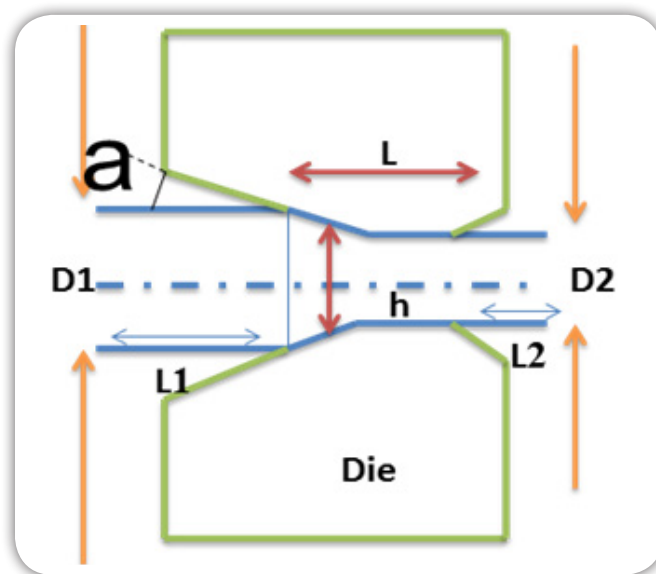
مراجع و منابع:

- ASTM E2575:08 - ASTM E1019:08
- Tungstan carbides drawing die(www. kingway technology.com)
- Elongation of wire drawing die(www. kingway technology.com)
- Elongation of wire drawing die falconer electronics (www. kingway technology.com)

که در این فرمول α نصف زاویه تماس در دوزه برحسب رادیان و r کاهش سطح مقطع می‌باشد. همانگونه که از فرمول پیداست و در ابتدای بحث نیز به آن اشاره شد، اندازه ناحیه تغییر شکل مفتول در دوزه به دو عامل بستگی دارد یکی زاویه تماس و دیگری کاهش سطح مقطع مقادیر مختلف Δ را در سه شکل زیر بررسی می‌کنیم. در شکل زیر یک مقدار کم برای Δ همانگونه که مقادیر پارامترها در جدول زیر آمده است، به معنی یک ناحیه بلند تغییر شکل و تماس زیاد مفتول با دوزه می‌باشد یک مقدار زیاد Δ به معنی یک ناحیه کوتاه تغییر شکل با تماس کم مفتول با دوزه کشش می‌باشد. یک مقدار Δ مساوی با یک به معنی برابری طول و ارتفاع ناحیه کشش می‌باشد:

زاویه تماس (α)	کاهش سطح مقطع (r)	دلته (Δ)
۴	۰/۲۵	۰/۹۷
۱۰	۰/۲	۳/۱۴
۱۰	۰/۱۰	۶/۶۵

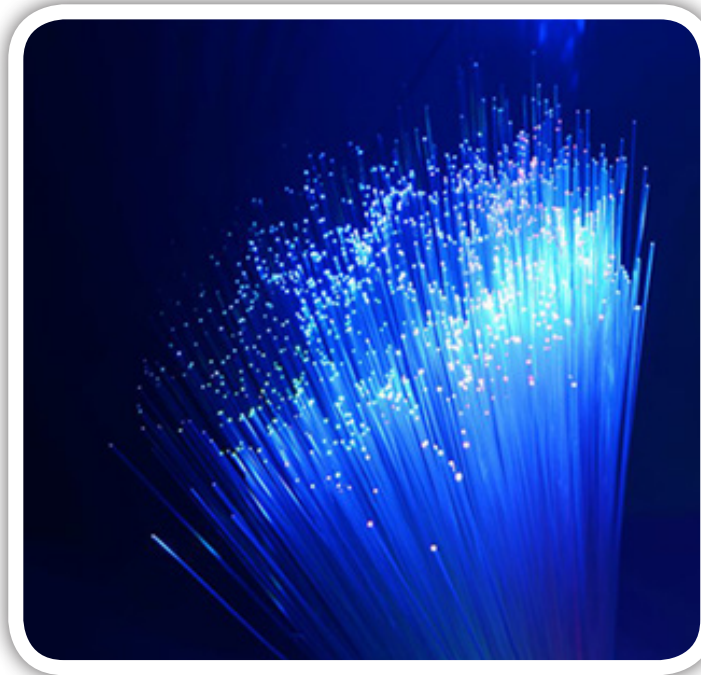
بنابراین زوایای کم دوزه‌ها با کاهش سطح مقطع زیاد، به معنی مقدار Δ کم است و زوایای زیاد دوزه‌ها با کاهش سطح مقطع کم، به معنی مقدار Δ زیاد می‌باشد. در جدول بالا یک لیست مفید از پارامتر Δ نشان داده شده است، که با استفاده از این جدول،



نمایش مقادیر مختلف پارامتر دلته Δ

انواع حسگرهای نوری

ترجمه: مهندس محمدعلی مساواتی (کارشناس برق و الکترونیک / کارشناس ارشد صنایع)



فیبرنوری، سبک، انعطاف‌پذیر و مقاوم در برابر صاعقه است. این ماده عمدتاً برای ارتباطات نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد، با این حال، هنگام استفاده از آن به عنوان سنسور، می‌توان توزیع دما، تنش و لرزش را در کل طول یک فیبرنوری طولانی اندازه گرفت. از این خصوصیات سنسورهای فیبرنوری می‌توان به عنوان ابزاری برای تشخیص سلامتی زیرساخت‌های اجتماعی از جمله پل‌ها، تونل‌ها و سایر سازه‌های بزرگ و یا کشف زودهنگام خرابی تجهیزات و سایر خرابی‌ها در نیروگاه‌های نفتی و شیمیایی استفاده نمود. در بخش قبلی به معرفی کلی حسگرهای فیبرنوری و طبقه‌بندی آن پرداختیم. در این قسمت کلاس نسبتاً جدید حسگرهای فیبرنوری، یعنی حسگرهای گریتینگ معرفی و حسگری بر اساس بازتاب برولوئین ارائه خواهد شد.

بر فاز نیز اغلب به دلیل وجود انحرافات دما و لرزش به خطر می‌افتد. در بین طیف حسگرهای فیبر، امیدوارکننده‌ترین پیشرفت‌ها بر اساس تکنولوژی گریتینگ هستند. یک گریتینگ فیبرنوری از القای یک آشفستگی تناوبی ضریب شکست به طول اندازه قطر هسته فیبرنوری ایجاد می‌شود. آشفستگی تناوبی ضریب شکست مؤثر امکان کوپل شدن یک مد در هسته فیبر، به مود انتقال رو به عقب و یا رو به جلو را می‌دهد. گریتینگ‌های

۱- حسگرهای مبتنی بر گریتینگ فیبری

حسگرهای فیبری مبتنی بر مدولاسیون شدت و فاز مشکلاتی دارند که لازم است در کاربردهای عملی رفع شوند. مشکلات مرتبط با نوسانات نیروی منبع، اتلاف‌های کوپلر، اتلاف‌های خم شدن، اتلاف‌های مکانیکی ناشی از ناهمترایی و اثرات جذب به طور قابل توجهی بر روی عملکرد اندازه‌گیری حسگرهای فیبری مبتنی بر شدت، اثر خواهند گذاشت. دقت اندازه‌گیری حسگرهای فیبر مبتنی



در نتیجه FBG های نرمال نمی‌توانند به عنوان حسگرهای شیمیایی یا زیستی استفاده شوند. برای استفاده از FBG به عنوان یک عامل حسگر انکسارسنج، شعاع روکش اطراف ناحیه گریتینگ باید کاهش یابد، تا ضریب شکست موثر هسته فیبر به طور قابل توجه تحت تأثیر ضریب شکست محیط خارجی قرار گیرد. به عنوان یک نتیجه، تغییرات در طول موج Bragg به همراه تعدیل نوسان بازتاب شده مورد انتظار است.

باند‌های تضعیف LPG تابعی قوی از آشفتگی‌های خارجی مثل کشش، دما، خم شدگی و ضریب شکست اطراف است. حضور این آشفتگی‌های خارجی، قدرت کوپلینگ بین مودهای هسته و روکش را تحت تأثیر قرار می‌دهد، که می‌تواند سبب تغییر در دامنه و طول موج باند‌های تضعیفی در طیف انتقال LPG شود.

اندازه‌گیری این پارامترهای طیفی در پاسخ به محیط اطراف ناحیه گریتینگ، اساس سنجش با LPG ها است. در یک LPG نور هدایت شده با محیط خارجی برهم کنش دارد و ضریب نفوذ مودهای روکش به ضریب شکست هسته، روکش و جنس محیط خارجی بستگی دارد.

در حال حاضر، سنجش ضریب شکست بر اساس گریتینگ فیبر، یک موضوع فوق‌العاده مهم در زمینه سنجش بیوشیمیایی است که گرایش‌های تحقیقاتی قابل توجهی را به خود جذب می‌کند. FBG ها به طور کلی به اختلافات ضریب شکست محیط اطراف کمتر حساس‌اند زیرا هسته فیبر با لایه روکش به خوبی کاور شده است. این امر کاربرد FBG ها را در سنجش زیستی و شیمیایی محدود می‌کند. در نتیجه، گریتینگ‌های بلند تناوب (LPG) برای کاربردهای سنجش شیمیایی و زیستی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

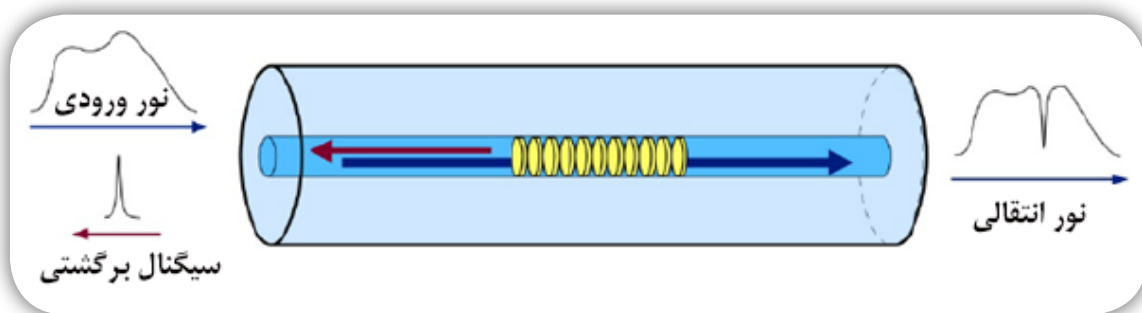
فیبری بر اساس تناوب گریتینگ و نوع مدل ورودی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

فیبر گریتینگ‌های Bragg (FBGs) - که گریتینگ‌های بازتابی یا کوتاه تناوب نیز نامیده می‌شوند. جایی که کوپلینگ بین دو مود در حال حرکت در جهات مخالف اتفاق می‌افتد.

گریتینگ‌های تناوب بلند (LPGs) - که گریتینگ‌های انتقالی نیز نامیده می‌شوند. جایی که کوپلینگ بین دو مود در هسته (Core) و پوسته (Cladding) در حال حرکت در جهت یکسان اتفاق می‌افتد. این مودهای پوسته به سرعت در حین انتشار ضعیف شده و سبب اتلاف باند در طول موج‌های ناهمسان در طیف انتقال گریتینگ می‌شوند. هنگامی که منبع پهن باند، نور را تزریق می‌کند، یک طول موج خاص بازتاب شده و بقیه منتقل می‌شوند. هرگاه کمیت محیطی بر روی ناحیه گریتینگ اثر گذارد، بالاترین طول موج جابه‌جا می‌شود. در FBG طیف بازتاب شده مطالعه می‌شود، در حالی که در LPG طیف منتقل شده مورد بررسی است.

مورد استفاده‌ترین حسگر مبتنی بر طول موج، حسگر گریتینگ Bragg است. FBG ها تکنولوژی مخابرات مدرن و متعاقباً حسگر فیبرنوری را متحول کرده‌اند. در مورد دوم، FBG ها به علت حساسیت بالای خود، قابلیت تسهیم و هزینه تولید منطقی یک عامل سنجش عالی هستند. به علاوه، انواع مختلفی از FBG ها برای پاسخگویی به نیازهای علمی توسعه یافته‌اند.

اساس کار یک حسگر FBG بر اساس تغییر طول موج Bragg در هنگامی است که تحت اثر یک کمیت باشد. طول موج برگ تابعی از فاصله آشفتگی‌های ضریب شکست در هسته فیبر می‌باشد و کشش و دما دو پارامتر پایه هستند که با تغییر در این فاصله می‌توانند مستقیماً طول موج برگ FBG را تنظیم کنند.



شکل ۱. اساس کار یک حسگر FBG

اندازه‌گیری در جهت طولی یک فیبرنوری) اندازه‌گیری کند. این فناوری از این اصل استفاده می‌کند که فرکانس نور پراکنده بریلوئین بسته به این پارامترها در یک فیبرنوری تولید می‌شود. با اتصال تنها یک انتهای فیبرنوری به یک دستگاه اندازه‌گیری، دما، تنش و لرزش در کل طول یک فیبرنوری را می‌توان به سرعت با وضوح مکانی بالا اندازه‌گیری کرد.

- مزایای اندازه‌گیری توزیع و وضوح مکانی

از آنجا که فیبرنوری خود به عنوان یک سنسور توزیع شده استفاده می‌شود، می‌توان محدوده‌ای از ۱ کیلومتر یا بیشتر را بدون فواصل تاریک اندازه‌گیری کرد. اگر یک مکان مشکوک به نظر برسد، می‌توان نقطه را با تفکیک‌پذیری مکانی زیاد با جزئیات تجزیه و تحلیل نمود.

۲- چشم انداز برای آینده

• زیرساخت‌های اجتماعی

با استقرار فیبرنوری در زیرساخت‌های اجتماعی مانند پل‌ها و تونل‌ها و استفاده از آن به عنوان یک سنسور توزیع تنش/لرزش، می‌توان موارد زیر را تحقق بخشید:

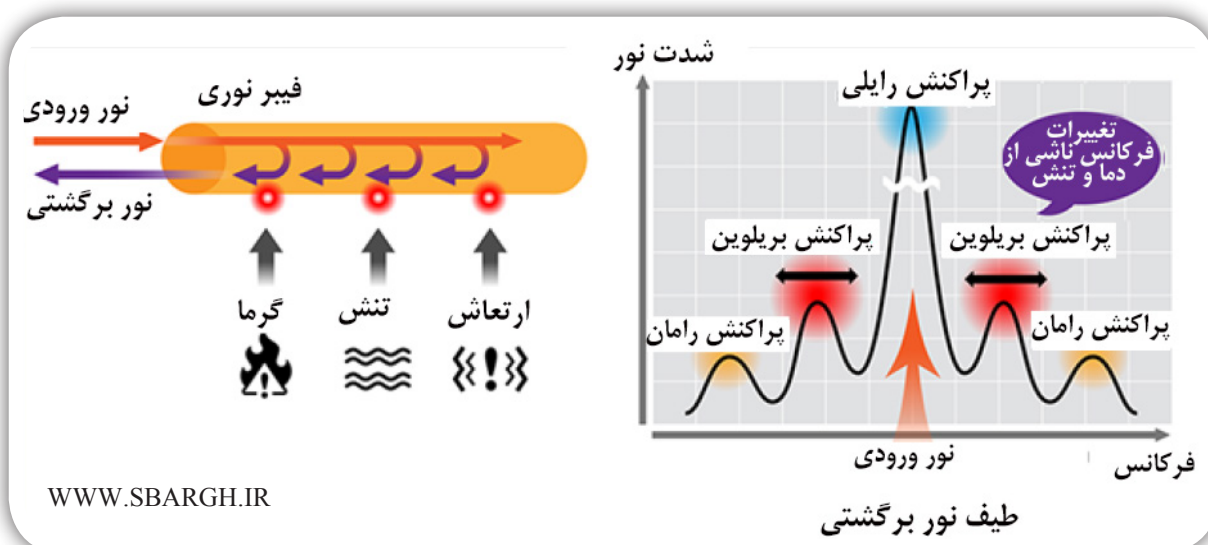
الف- توانایی بهبود ایمنی با تشخیص آسیب‌ها یا نقص‌ها در مراحل اولیه و یا با مشاهده‌های بعدی از نقاط مشکل. همچنین می‌تواند برای تشخیص اولیه سلامتی زیرساخت‌ها پس از زلزله

۲- دستگاه‌های مبتنی بر بازتاب سنج نوری

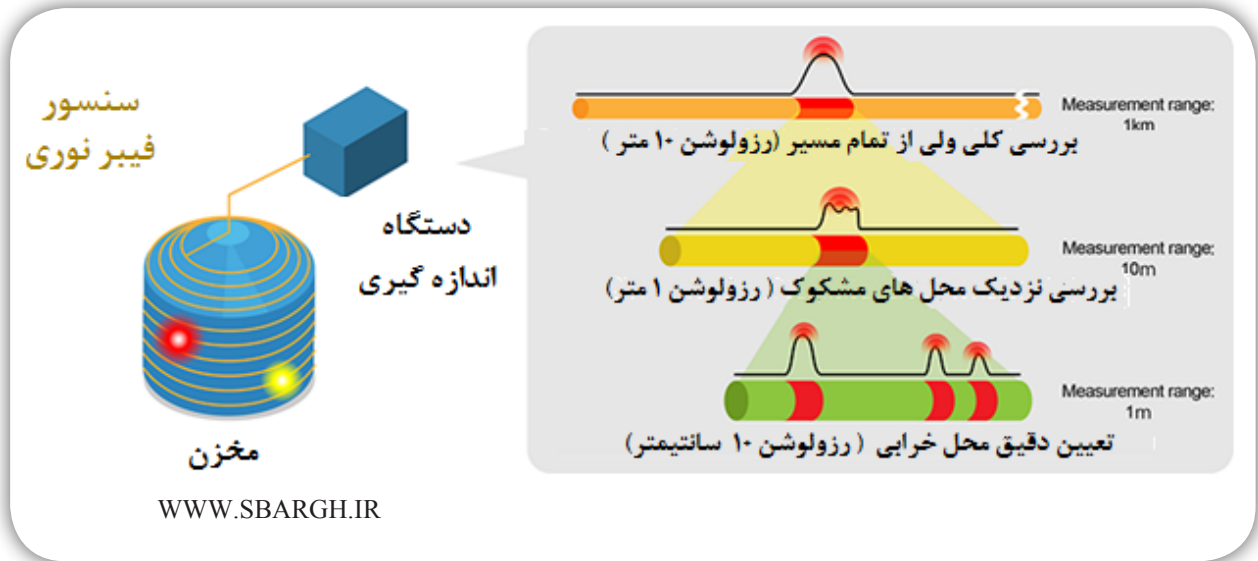
وقتی نور وارد محیط شفاف می‌شود، قسمتی از توان آن بر اثر پدیده پراکنش (Scattering) به اطراف پراکنده شده که بخشی از آن به عنوان نور برگشتی (Backscatter) به مبدأ ارسال بر می‌گردد. پراکنش نور ممکن به علت برخورد نور با ذرات با اندازه کمتر از طول موج ایجاد شود قسمت اعظم آن از نوع الاستیک می‌باشد یعنی طول موج نور برگشتی تغییر نمی‌کند که آن را پراکندگی رایلی می‌نامیم و قسمت بسیار کمی از آن با تغییر طول موج همراه است که پراکندگی رامان نام‌گذاری شده است. نور برگشتی رایلی مبنای عمل دستگاه‌های بازتاب سنج نوری در حوزه زمان (OTDR) بوده که برای اندازه‌گیری افت فیبر و یا محل‌یابی خطاهای فیبر در مسیر نصب بکار گرفته می‌شود. دلیل دیگر پراکندگی می‌تواند به علت تغییر چگالی محیط انجام گیرد. این تغییر ممکن است به دلیل اعمال فشار و یا گرادیان دمایی انجام گیرد نور برگشتی در این حالت غیر الاستیک بوده و با تغییرات فرکانس همراه است. این پدیده را پراکندگی بریلوئین می‌نامیم. دستگاه‌های بازتاب‌سنج بریلوئین در دامنه زمان (BOTDR) و یا با دامنه همبستگی (BOCDR) طراحی و ساخته شده‌اند که برای سنسورهای پیوسته مورد استفاده گسترده می‌باشند.

- بازتاب سنجی دامنه همبستگی نوری بریلوئین (BOCDR)

BOCDR می‌تواند دما، تنش و لرزش را با وضوح مکانی سانتی‌متر



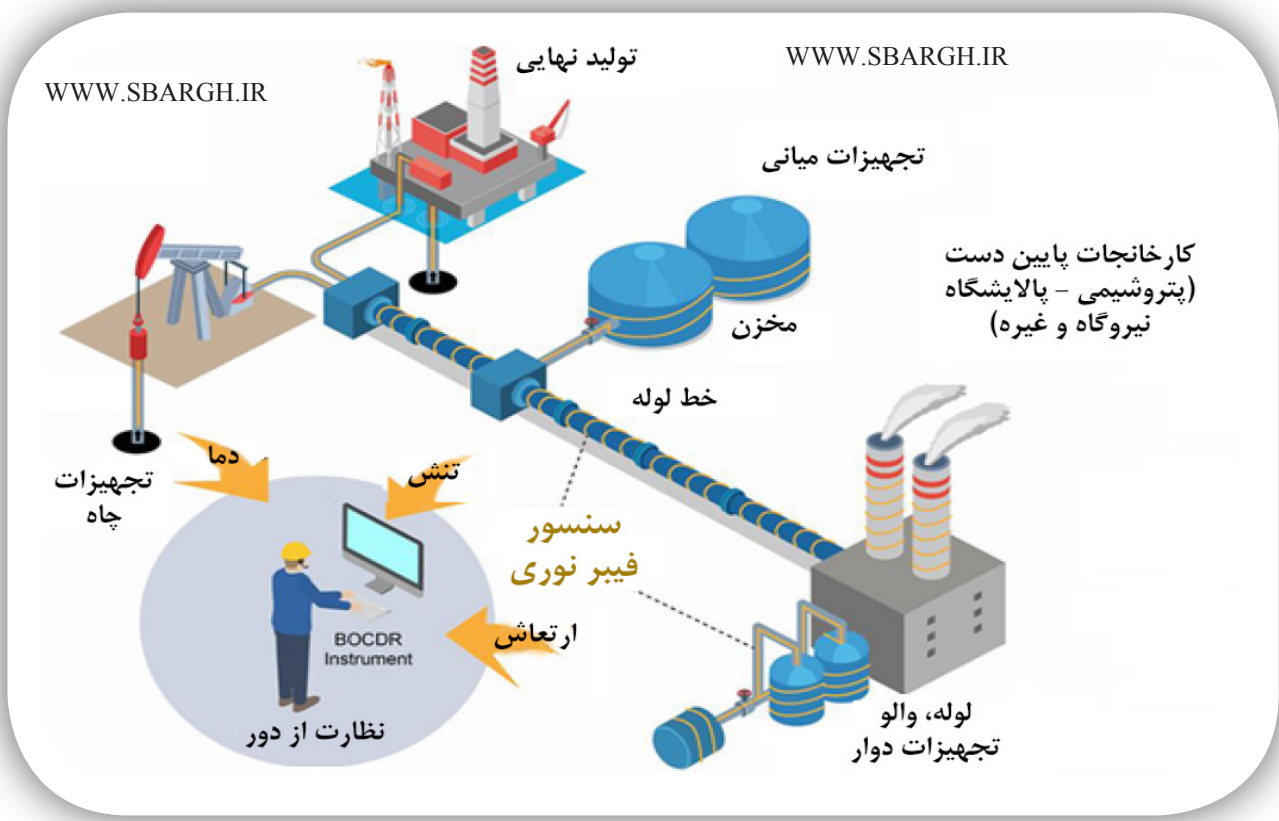
شکل ۲. پراکندگی بریلوئین در سنسور نوری



شکل ۳. وضوح مکانی در سنسورهای نوری



شکل ۴. زیرساخت‌های نیازمند به نظارت دائم



شکل ۵. نمونه کاربردی سنسورهای نوری در مجتمع های صنعتی

بهره‌وری جمع‌آوری کارآمد اطلاعات دما، کرنش و لرزش با نصب حسگرهای فیبرنوری در تأسیسات گیاهی و تجزیه و تحلیل داده‌ها به منظور بهبود سلامت، ایمنی، همسویی با محیط زیست و قابلیت حفظ آن است.

مورد استفاده قرار گیرد.
ب- کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری با باریک کردن نقاط بازرسی و قطع کار حادثه‌ای مانند جداسازی قطعات / نصب مجدد و تنظیم داربست.

منبع:

1. Design and Development of Fiber Grating Based Chemical and Bio-Sensors
2. www.yokogawa.com/fr/about/research-development/inv_center/ofs/

• برنامه‌های کاربردی در صنعت کشاورزی

در صنعت کشاورزی بناها و تأسیسات پیچیده‌ای استفاده می‌شود که تعداد زیادی از امکانات در یک سایت وسیع به هم وصل می‌شوند. بنابراین، ممکن است یا بهره‌وری کاهش یابد یا حادثه رخ دهد، مگر اینکه امکانات به درستی نگهداری و مدیریت شوند. روش بهبود