

# عایق و فشارقوی

فصل چهارم

عایق‌های جامد

بهر روز آدینه

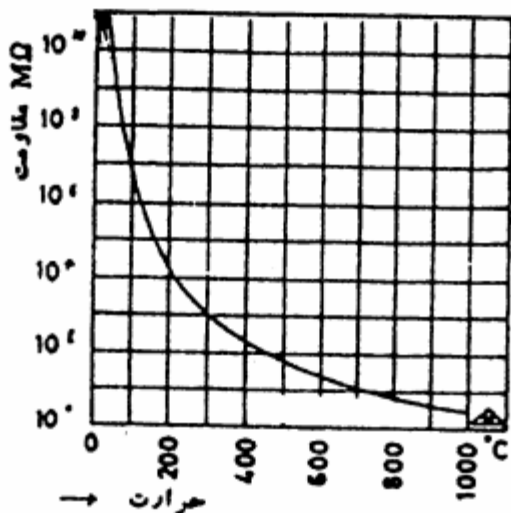
دانشگاه فن‌آوری‌های نوین قوچان

## مکانیزم شکست حرارتی

به طور کلی ولتاژ شکست عایق‌های جامد با ضخامت آن‌ها افزایش می‌یابد؛ اما اگر این ضخامت از حدّ معینی بیشتر شود حرارتی که بر اثر جریان هدایتی عایق ایجاد می‌شود تعیین‌کننده خواهد بود. هر عایق جامدی دارای یک مقاومت الکتریکی است که به‌علت استقامت الکتریکی بالای عایق‌های جامد، مقدار مقاومت آن بسیار بالا است؛ ولی بی‌نهایت نیست. در عایق‌ها و نیمه‌هادی‌ها بر خلاف هادی‌ها، با افزایش درجه حرارت عایق یا نیمه‌هادی، مقاومت آن کاهش یافته و قابلیت هدایت الکتریکی و رسانایی آن افزایش می‌یابد. این موضوع در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. هنگامی که یک عایق، تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، به‌علت جریان رسانایی بسیار کم آن و به‌خاطر تلفات دی‌الکتریک در اثر پلاریزاسیون (جدا شدن مرکز بارهای مثبت و منفی و حرکت دیپل‌ها برای قرار گرفتن در امتداد میدان)، به‌طور پیوسته در عایق حرارت تولید می‌شود. با افزایش دما، قابلیت هدایت عایق طبق رابطه زیر افزایش می‌یابد:

$$\sigma = Ae^{-U/KT} \quad (۴-۶)$$

در این رابطه،  $A$  و  $U$  اعداد ثابت،  $\sigma$  قابلیت هدایت عایق،  $T$  دمای عایق و  $K$  ثابت بولتزمن است.



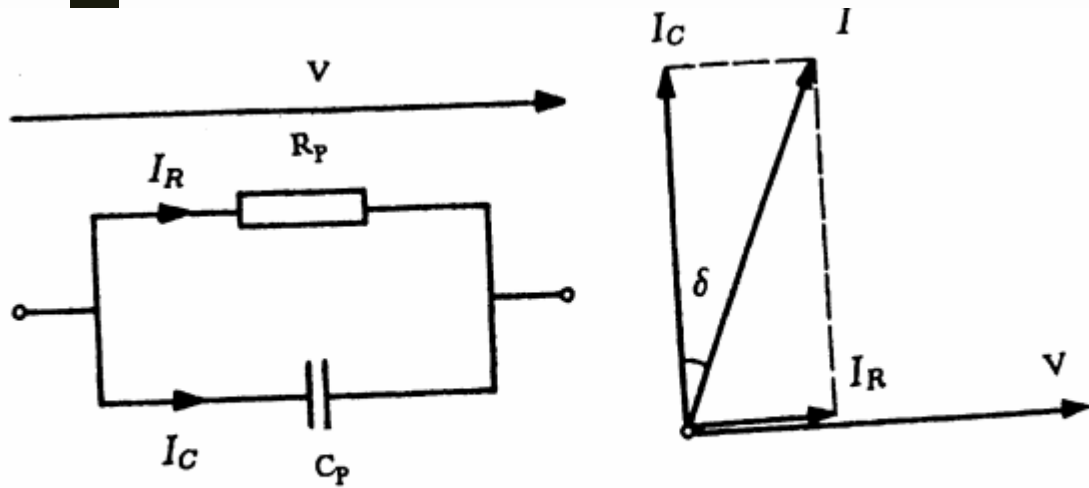
شکل (۴-۵): تغییر مقاومت عایق‌ها (سرامیک) بر اثر افزایش دما

دمای عایق جامد در اثر عبور جریان رسانایی  $I$  از آن (به سبب تلفات حرارتی  $RI^2$ ) زیاد می شود. افزایش دما باعث افزایش قابلیت هدایتی عایق و در نتیجه افزایش  $I$  خواهد شد که افزایش  $I$ ، خودش تلفات حرارتی  $RI^2$  را زیاد می کند و باعث بالاتر رفتن دمای عایق می شود. البته همزمان با افزایش دمای داخل عایق، حرارت ایجاد شده به محیط اطراف منتقل می شود. در این حالت، هر چه دمای محیط کم تر باشد انتقال حرارت بیشتر صورت می گیرد. دمای عایق، زمانی به حالت تعادل و پایدار می رسد که مجموع حرارت های انتقال یافته به محیط خارج، برابر مجموع حرارت های تولید شده در داخل عایق جامد باشد. اما اگر درجه حرارت محیط در حدّ درجه حرارت داخل عایق شود، دیگر هیچ گونه انتقال حرارتی صورت نگرفته و ناپایداری حرارتی به وجود می آید. این موضوع، موجب افزایش ناگهانی درجه حرارت عایق و در نتیجه افزایش سریع جریان رسانایی از عایق شده و قوس الکتریکی در داخل آن زده می شود و در نهایت، عایق دچار شکست الکتریکی می شود.

با اعمال ولتاژ AC، شکست حرارتی عایق جامد در ولتاژ کم‌تری نسبت به اعمال ولتاژ DC ایجاد می‌شود؛ زیرا در ولتاژ AC، علاوه بر جریان ناشی از الکترون‌ها (که موجب ایجاد تلفات حرارتی در عایق جامد می‌شوند)، به واسطه این‌که پلاریزاسیون در هر نیم سیکل تغییر داده می‌شود، در اثر جابجایی قطب‌های پلاریزاسیون، انرژی حرارتی اضافی (علاوه بر  $RI^2$ ) به وجود می‌آید و می‌تواند ناپایداری حرارتی را زودتر انجام دهد. زیرا درجه حرارت عایق بیشتر می‌شود. بنابراین، استقامت الکتریکی عایق‌های جامد در ولتاژ متناوب AC نسبت به ولتاژهای DC و ضربه‌ای کم‌تر است. هدایت عایق‌ها به صورت نمایی با افزایش درجه حرارت، افزایش می‌یابد. بنابراین، حرارت تولید شده در عایق، خود عاملی برای افزایش جریان هدایتی می‌شود و تولید حرارت باز هم افزایش می‌یابد. اگر حرارت ایجاد شده به گونه‌ای از عایق خارج نشود، افزایش آن، سرانجام به شکست حرارتی عایق می‌انجامد.

## نقش پارامتر ضریب تلفات عایقی در مکانیزم شکست حرارتی

هر عایق جامد بین دو الکتروود فلزی، یک خازن به وجود می آورد. اگر خازن کاملاً ایده آل باشد، تلفات انرژی حرارتی ندارد. در ولتاژ متناوب AC، جریان خازن ایده آل  $90^\circ$  جلوتر از ولتاژ آن است. با توجه به این که خازن ها (عایق ها) ایده آل نیستند، در نتیجه یک مقاومت اهمی  $R$  نیز همواره وجود دارد؛ بنابراین، جریان و ولتاژ آن دارای اختلاف فاز کم تر از  $90^\circ$  خواهد بود و زاویه بین آنها به مقدار  $\delta$  از  $90^\circ$  کم تر است. مدار معادل یک خازن واقعی با تلفات را می توان به صورت شکل (۸-۴)، از ترکیب موازی یک مقاومت اهمی  $R_p$  و یک خازن ایده آل  $C_p$  شبیه سازی



شکل (۸-۴): نمودار برداری یک عایق واقعی و مدار معادل آن

کرد. در این حالت، جریان خازن در ولتاژ متناوب از دو مؤلفه تشکیل شده است:

$$I_c = j c_p \omega V \quad \text{مؤلفه خازنی} \quad (20-4)$$

$$I_R = \frac{V}{R_p} \quad \text{مؤلفه اهمی} \quad (21-4)$$

در نتیجه، جریان کل خازن برابر است با،

$$I = I_R + I_c = \frac{V}{R_p} + j c_p \omega V = \left( \frac{1}{R_p} + j c_p \omega \right) V \quad (22-4)$$

جریان  $I_R$  با ولتاژ  $V$  هم جهت است، ولی جریان  $I_c$  عمود بر  $V$  می باشد. از این رو، ضریب تلفات عایقی به صورت زیر تعریف می شود:

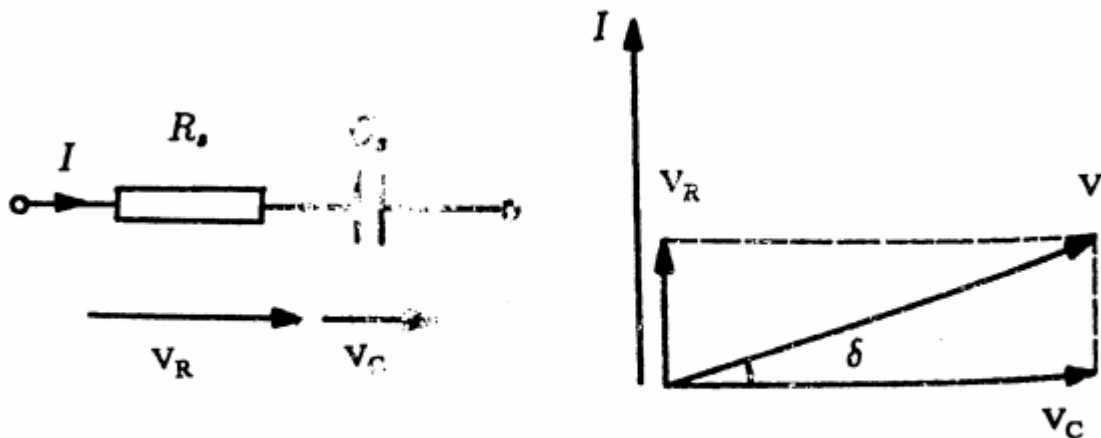
$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_c} = \frac{V/R_p}{\omega C_p V} = \frac{1}{R_p C_p \omega} \quad (23-4)$$

به  $\tan \delta$  "ضریب تلفات عایقی" می‌گویند. علت قرار دادن این اسم آن است که تلفات حرارتی عایق، ضریبی از  $\tan \delta$  است. در عایق‌ها معمولاً  $\tan \delta$  خیلی کوچک است و جریان  $I$  تقریباً با  $I_c$  برابر است. ضریب تلفات عایقی مشخص‌کننده مناسب بودن عایق است و به ابعاد عایق بستگی ندارد. البته با تغییر ابعاد عایق، ظرفیت  $C$  تغییر می‌کند، ولی  $R$  هم به نسبت عکس آن تغییر می‌نماید و در نتیجه، تقریباً  $\tan \delta$  ثابت می‌ماند. البته مقدار  $\tan \delta$  با فرکانس و درجه حرارت عایق تغییر می‌کند. مدار معادل دیگری که برای عایق‌ها می‌توان شبیه‌سازی کرد، از سری نمودن یک خازن ایده‌آل  $C_s$  و یک مقاومت سری  $R_s$  به دست می‌آید. البته این مدار معادل، فقط برای ولتاژهای AC به کار می‌رود که در شکل (۴-۹) نشان داده شده است.

مشابه حالت قبل،  $\tan \delta$  را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود.

$$V = V_c + V_R \quad (۴-۲۴)$$

$$\tan \delta = \frac{V_R}{V_c} = \frac{R_s I}{I/c_s \omega} = R_s c_s \omega \quad (۴-۲۵)$$



شکل (۴-۹) نوع دیگر مدار معادل خازن واقعی

در حالت شبیه‌سازی موازی، تلفات حرارتی ایجاد شده در عایق در اثر مقاومت  $R_p$  عایق برابر است با:

$$W = R_p I_R^2 = R_p \frac{V^2}{R_p^2} = \frac{V^2}{R_p} \quad (26-4)$$

اما از معادله (23-4) داریم:

$$\frac{1}{R_p} = \omega C_p \tan \delta \quad (27-4)$$

با توجه به معادلات (26-4) و (27-4) می‌توان نوشت:

$$W = V^2 2\pi f C_p \tan \delta \quad (28-4)$$

در این رابطه  $W$  توان حرارتی تولید شده در عایق بر حسب وات است. از رابطه (28-4) مشاهده می‌شود که مقدار این تلفات با  $f$ ،  $V$ ،  $C_p$  و  $\tan \delta$  در ارتباط است. با افزایش دمای عایق، بالطبع  $\tan \delta$  نیز افزایش می‌یابد. رطوبت و ناخالصی‌ها نیز، باعث افزایش ضریب تلفات عایقی و افزایش تلفات حرارتی ( $W$ ) در عایق می‌شوند.

## مکانیزم شکست فرسودگی

غالباً در عایق‌های جامد بر اثر گذشت زمان و به سبب وجود حفره‌های حاوی گاز، شکست الکتریکی اتفاق می‌افتد. هر چند که فناوری ساخت عایق‌های جامد روز به روز پیشرفت می‌کند، ولی باز هم نمی‌تواند خالی از حفره‌های کوچک باشد. سطح الکترودها و عایق‌های جامد نیز، کاملاً صیقلی نیستند. بنابراین، معمولاً حفره‌های گازی حاوی هوا یا مایع، در داخل عایق‌های جامد وجود دارد که غالباً میدان الکتریکی شکست آن‌ها خیلی کم‌تر از میدان الکتریکی شکست عایق جامد است. از طرف دیگر، به علت پایین بودن عدد دی‌الکتریک این حفره‌ها، شدت میدان الکتریکی داخل این حفره‌ها بزرگتر از شدت میدان الکتریکی داخل عایق جامد می‌شود. بنابراین، تحت شرایط کار، معمولاً ولتاژ دو سر این حفره‌ها ممکن است از حد ولتاژ شکست آن‌ها افزایش یابد و سبب شکست الکتریکی در آن‌ها شود. به عنوان مثال، شدت میدان شکست هوا، ۲۰ تا ۳۰ kV/cm است؛ ولی در سرامیک، شدت میدان شکست حدود ۱۰۰ kV/cm می‌باشد.



در صورتی که در یک حفره گازی، شکست الکتریکی اتفاق بیفتد، لایه های کربن روی سطح عایق در محل حفره ها می نشینند و باعث رسانایی و افت مقاومت عایقی می شود. در نتیجه، به تدریج این حفره های درونی بزرگتر شده و به یکدیگر رسوخ کرده و یک کانال را به وجود می آورد تا در نهایت، منجر به تخلیه الکتریکی عایق جامد می شوند. برای محاسبه ولتاژ شکست در اثر تخلیه موضعی در عایق های جامد، فرض می شود که درون یک عایق به ضخامت  $d$ ، یک حفره مکعب مستطیل به ضخامت  $t$  به وجود آید (مطابق شکل ۴-۱۱). در این شکل،  $C_c$  ظرفیت خازنی حفره،  $C_b$  ظرفیت عایق جامد در قسمت های بالا و پایین حفره، و  $C_a$  ظرفیت بقیه قسمت های عایق جامد است. با توجه به این که  $t \ll d$  و با فرض این که داخل حفره هوا باشد با یکنواختی میدان و مساوی بودن چگالی شار الکتریکی می توان نوشت:

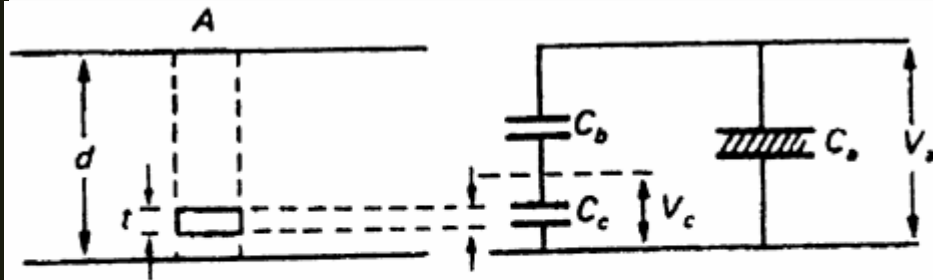
$$\epsilon_0 E_c = \epsilon_0 \epsilon_r E_b$$

$$E_c = \epsilon_r E_b \quad (۳۰-۴)$$

که  $E_b$  و  $E_c$ ، به ترتیب، شدت میدان الکتریکی در داخل حفره و قسمت های بالا و پایین حفره است. همچنین  $\epsilon_r$  عدد دی الکتریک نسبی عایق جامد است. ظرفیت خازنی  $C_b$  و  $C_c$  را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$C_b = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d - t} \quad (۳۱-۴)$$

$$C_c = \frac{\epsilon_0 A}{t} \quad (۳۲-۴)$$



شکل (۴-۱۱): تخلیه الکتریکی در حفره و مدار معادل آن

روابط خازن‌های سری، مشابه مقاومت‌های موازی هستند که ولتاژ دو سر آنها به نسبت عکس ظرفیت آنها تقسیم می‌شود. بنابراین، ولتاژ دو سر حفره برابر است با:

$$V_c = \frac{C_b}{C_c + C_b} V = \frac{\frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d-t}}{\frac{\epsilon_0 A}{t} + \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d-t}} V = \frac{V}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left[ \frac{d}{t} - 1 \right]} \quad (33-4)$$

اگر میدان الکتریکی لازم برای شکست الکتریکی حفره، برابر  $E_s$  (در ارتباط با ولتاژ  $V_s$ ) باشد، آنگاه ولتاژ لازم برای دو سر عایق جامد که منجر به شکست الکتریکی درون حفره شود، برابر  $V_{cb}$  خواهد بود؛ آنگاه:

$$E_s = \frac{V_s}{t}$$

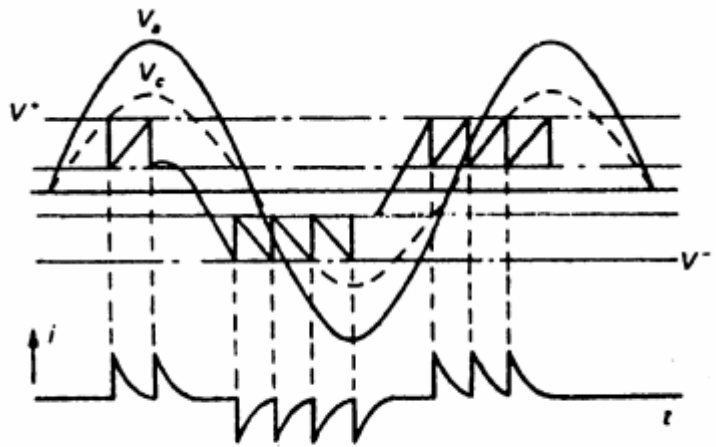
$$V_s = E_s \cdot t \quad (34-4)$$

با جایگزینی رابطه (34-4) در رابطه (33-4) داریم:

$$E_s \cdot t = \frac{V_{cb}}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left[ \frac{d}{t} - 1 \right]}$$

$$V_{cb} = E_s \cdot t \left[ 1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left[ \frac{d}{t} - 1 \right] \right] \quad (35-4)$$

اما حفره‌های داخل عایق‌های جامد، معمولاً به شکل کره هستند و میدان الکتریکی داخل آنها حدوداً به  $1/5$  برابر میدان الکتریکی داخل عایق جامد می‌رسد.



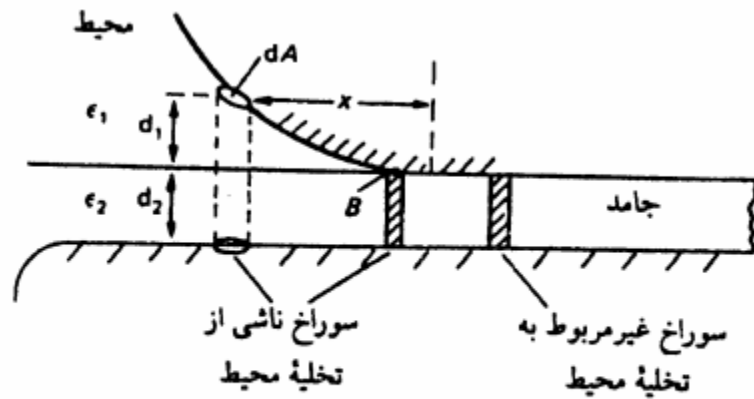
شکل (۴-۱۲): زنجیره شکست حفره در اثر اعمال ولتاژ متناوب

شکل (۴-۱۲)، ولتاژ دو سر حفره  $V_c$  (که با خط چین نشان داده شده است، به شرط این که شکست در داخل آن اتفاق نیفتاده باشد) و ولتاژ دو سر عایق  $V_a$  را نشان می‌دهد. زمانی که ولتاژ دو سر حفره به مقدار  $V^+ = V_s$  می‌رسد، تخلیه‌ای رخ می‌دهد و ولتاژ آن کاهش یافته و جرّقه در حفره خاموش می‌شود. آن‌گاه دوباره ولتاژ حفره هماهنگ با افزایش ولتاژ دو سر عایق ( $V_a$ ) افزایش می‌یابد تا به  $V^+$  برسد و دوباره تخلیه روی می‌دهد. بنابراین، در خلال بالا رفتن ولتاژ اعمالی، تعداد زیادی پالس تخلیه می‌تواند رخ دهد. همچنین پس از کاهش ولتاژ دو سر عایق در نیم‌سیکل منفی، وقتی ولتاژ دو سر حفره به مقدار  $V^- = -V_s$  می‌رسد، تخلیه رخ می‌دهد. بدین ترتیب، در هر دوره (سیکل) کامل، تعداد زیادی پالس تخلیه مطابق شکل (۴-۱۲) رخ می‌دهد. در هر بار شکست حفره، جریان زیاد ناشی از تخلیه الکتریکی عبور می‌کند که در شکل (۴-۱۲)، پالس‌های جریان تخلیه نیز ترسیم شده است.

با نفوذ آب در داخل کابل‌های فشار قوی با عایق پلی اتیلن، حفره‌های آب تشکیل می‌شود و در نتیجه، شکست الکتریکی در مدت زمان کوتاه‌تری انجام می‌شود. در اثر تخلیه جزئی اتفاق افتاده در سطح داخلی حفره‌ها، پدیده فرسودگی اتفاق می‌افتد و به تدریج لایه‌های کربنی ایجاد شده در سطح داخلی حفره‌ها بزرگتر شده و بعضی از آن‌ها به هم وصل شده و کانال‌های تخلیه شبیه به یک درخت در عایق رشد می‌کنند و به تدریج با گذشت زمان، استقامت الکتریکی عایق کاهش می‌یابد.

با توجه به این نوع مکانیزم شکست، ضعف عایق‌ها در مقابل اضافه ولتاژهای AC کاملاً روشن می‌شود. مشخصات فنی گوناگون بین‌المللی در آزمایش تحمل ولتاژ AC، ولتاژهایی را به کار می‌گیرند که می‌توانند چند برابر ولتاژ نامی بوده و مدت اعمال آن یک دقیقه یا بیشتر باشد. هدف این آزمایش، آشکار سازی نقاط ضعف اصلی عایق است؛ ولی چنین آزمایشی می‌تواند باعث ایجاد کانال‌های تخلیه شده و ولتاژ شروع تخلیه را به حدی کم‌تر از ولتاژ نامی سیستم برساند و موجب تشدید نقطه ضعف جزئی عایق شود. به منظور رفع این مشکل تا حدودی، آزمایش تحت ولتاژ DC یا ولتاژهایی با فرکانس کم (به جای اعمال ولتاژ AC)، پیشنهاد شده است. به عنوان مثال، معمولاً کابل‌های فشار قوی AC را به جای آزمایش با ولتاژ AC، با ولتاژ فشار قوی DC به طور مداوم آزمایش می‌کنند (آزمایش‌های دوره‌ای که سالی یک یا دو بار انجام می‌شود، با ولتاژ DC انجام می‌گیرد). علت این امر آن است که اگر یک نقطه ضعف جزئی در عایق کابل باشد، در صورت آزمایش با ولتاژ AC بدلیل همین پالس‌های تخلیه و ایجاد جرقه در حفره‌های ریز در مدت زمان آزمایش، موجب تشدید آن نقطه ضعف و آسیب رسیدن به کابل می‌شود. دلیل دیگر آزمایش کابل‌های AC با ولتاژ DC، اقتصادی بودن آن است؛ زیرا بدلیل بالا بودن مقدار جریان خازنی کابل، منبع ولتاژ آزمایش باید قدرت تأمین جریان خازنی را داشته باشد که باعث گران شدن آن خواهد شد.

## مکانیزم شکست لبه‌ها



شکل (۴-۱۳): مدل بررسی اثر لبه در عایق جامد

در سیستم‌های عایق‌بندی عملی، معمولاً عایق جامد به یک یا چند مادهٔ دیگر متصل است. اگر یکی از این مواد (به‌عنوان مثال) گاز یا مایع باشد، آنگاه ولتاژ شکست بیشتر تحت تأثیر ناحیهٔ ضعیف‌تر قرار می‌گیرد. معمولاً در تماس الکترودهای فلزی با عایق‌های جامد در لبه‌ها، میدان‌های الکتریکی خیلی قوی ایجاد می‌شود که می‌تواند منجر به ایجاد جرقه‌های سطحی روی عایق‌های جامد شوند. این جرقه‌های سطحی می‌توانند به تدریج باعث کربنیزه شدن سطح عایق و گسترش آن در داخل عایق نیز بشوند. این جرقه‌ها به صورت شاخه‌های درخت ادامه یافته و از این‌رو، به این جرقه‌ها، "شکست شاخه‌ای" می‌گویند. بدین منظور یک قطعه عایق جامد بین الکترودهای صفحه-کره مطابق شکل (۴-۱۳) در نظر می‌گیریم، که در آن، از غیریکنواختی میدان در یک استوانه با سطح قاعده  $dA$  در فاصله  $x$  از نقطه  $B$  که با عایق تماس دارد، صرف‌نظر می‌کنیم. با اعمال ولتاژ  $V$  بین الکترودها، بخشی از ولتاژ ( $V_1$ ) روی محیط گازی (مثلاً هوا) و بخشی دیگر از این ولتاژ ( $V_2$ ) روی عایق جامد می‌افتد. با فرض یکنواختی میدان، چگالی شار الکتریکی در هر دو عایق ( $D_1$  و  $D_2$ ) با هم برابر هستند. بنابراین:

$$D_1 = D_2$$

$$\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$$

$$E_1 = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} E_2$$

(۴-۳۶)



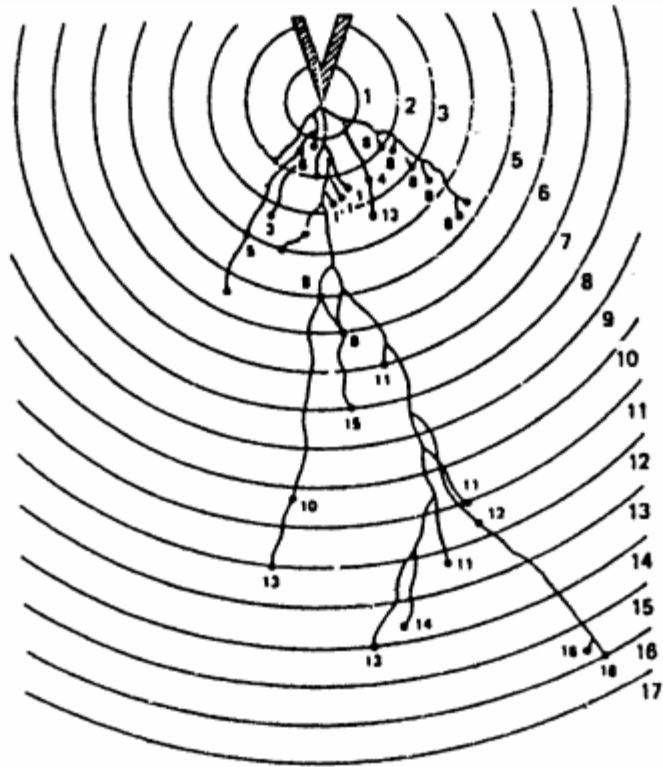
با توجه به این که  $\epsilon_2 > \epsilon_1$  (عدد دی الکتریک هوا می باشد) است، در نتیجه  $E_1 > E_2$  خواهد بود. به عبارت دیگر، میدان الکتریکی در قسمت هوا (یعنی در فاصله  $d_1$ ) قوی تر از عایق جامد می شود. با توجه به این که استقامت الکتریکی هوا پایین تر از عایق جامد است، ممکن است  $E_1$  به حد ولتاژ شکست هوا برسد؛ ولی  $E_2$  به حد شکست نرسد و در قسمت هوا شکست عایقی و جرقه زده شود.

$$V_1 = E_1 d_1 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1} E_2 d_1 = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \frac{V_2}{d_2} d_1 = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \frac{(V - V_1)}{d_2} d_1$$

$$V_1 = \frac{V d_1}{d_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} d_2} \quad (4-37)$$

همان گونه که از شکل (۴-۱۳) مشاهده می شود، هر چه فاصله  $x$  کوچکتر شود، مقدار  $d_1$  کوچکتر، ولی  $d_2$  ثابت باقی می ماند. در نزدیکی نقطه  $B$ ؛ میدان  $E_1$  خیلی قوی تر است و احتمالاً می تواند باعث شکست موضعی در هوا شود و منجر به ایجاد تخلیه جزئی و جرقه در سطح عایق گردد و به تدریج به طور شاخه ای به داخل عایق جامد سرایت کند (مانند شکل ۴-۱۴). با ادامه این شاخه ها، قوس الکتریکی

داخل عایق جامد ایجاد شده و شکست عایقی در جامد رخ می دهد. البته به علت غیریکنواختی میدان در این فضای گازی شکل، معمولاً شکست هوا به واسطه استریمر اتفاق می افتد. گاهی به این مکانیزم شکست لبه، شکست به واسطه استریمر هم می گویند. در این حالت، کانال های استریمر به سطح عایق جامد برخورد کرده و آن را به تدریج سوراخ می کند. یک روش برای کاهش اثر لبه ها، افزایش قطر الکترودهاست. در شکل (۴-۱۴) نحوه ایجاد کانال های شکست در یک میدان الکتریکی بین میله - صفحه، با منبع ولتاژ ضربه ای نشان داده شده است.

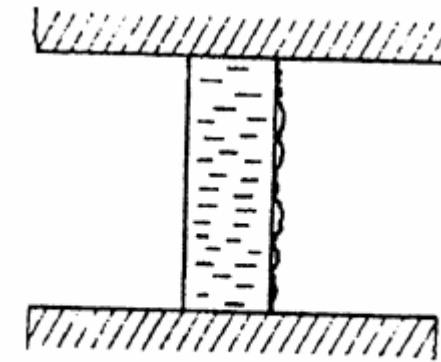


شکل (۴-۱۴): کانال های شکست بین الکترودهای صفحه-میله با منبع ولتاژ ضربه ای

## تخلیه الکتریکی سطحی

با قرار دادن یک عایق در بین دو الکتروود، ولتاژ شکست نسبت به وضعیت عدم حضور عایق به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. در این حالت، جنس عایق، وضعیت سطح عایق (که تخلیه در امتداد آن صورت می‌گیرد)، و به‌ویژه شکل میدان‌های الکتریکی، دارای اهمیت هستند. منظور از تخلیه سطحی، تخلیه‌ای است که روی سطح خارجی عایق جامد صورت می‌گیرد و در حقیقت، تخلیه الکتریکی بر روی فصل مشترک دو عایق جامد و گاز ایجاد می‌شود (شکل ۴-۱۵ را ببینید).

ولتاژ شکست عایق‌های جامد معمولاً بالاتر از عایق‌های گازی است. اگر در یک میدان یکنواخت به فاصله  $d$  (فاصله دو الکتروود از هم) ولتاژ را به تدریج بالا ببریم، در ولتاژی مانند  $V_1$  در عایق گازی (مانند هوا) شکست ایجاد می‌شود. حال اگر یک عایق جامد را در آزمایش دیگری بین الکتروودها قرار دهیم که استقامت الکتریکی آن از هوا بیشتر باشد، و



شکل (۴-۱۵): شکست روی سطح عایق جامد

ولتاژ منبع را افزایش دهیم، در ولتاژی مانند  $V_2$  ( $V_2 < V_1$ ) شکست گاز هوا روی سطح عایق جامد مانند شکل (۴-۱۵) اتفاق می‌افتد. علت این امر آن است که اولاً، سطح عایق جامد کاملاً صاف نیست و دارای برآمدگی و فرورفتگی‌هایی است که باعث می‌شود شدت میدان الکتریکی در داخل فرورفتگی‌ها، از شدت میدان یکنواخت گاز بیشتر شود. در نتیجه، در این فرورفتگی‌ها گاز یونیزه می‌شود و شرایط تخلیه به وجود می‌آید. ثانیاً، به علت آن‌که سطح خارجی عایق جامد کاملاً تمیز نیست و یا حداقل میزان تمیزی در سطح آن یکنواخت نیست، بر اثر قرار گرفتن مواد مختلف روی سطح خارجی عایق (مانند گرد و غبار یا رطوبت غیر یکنواخت سطح)، تقسیم ولتاژ روی سطح عایق به طور یکنواخت صورت نمی‌گیرد. بنابراین، قسمت‌های کثیف و مرطوب دارای قابلیت هدایت بیشتری، و قسمت‌های خشک و تمیز دارای قابلیت هدایت کم‌تری است. در نتیجه، روی قسمت‌های کثیف و مرطوب، ولتاژ افت نمی‌کند و روی قسمت‌های خشک و تمیز (که مقاومت الکتریکی بیشتری دارند)، افت ولتاژ بیشتری وجود دارد و باید شدت میدان الکتریکی بالاتری را تحمل کنند. این مقدار زیاد شدن شدت میدان الکتریکی در بعضی قسمت‌ها، باعث یونیزاسیون گاز و شکست عایق گازی مجاور آن می‌شود و منجر به بروز جرقه روی سطح عایق جامد می‌گردد. به علاوه حضور آلودگی و رطوبت روی سطح عایق جامد، موجب افزایش جریان رسانایی روی سطح (به علت تشکیل همین لایه رسانا) شده، با زیاد شدن این جریان رسانایی روی سطح، ممکن است جرقه روی سطح عایق زده شود.

## ردگذاری<sup>(۱)</sup> در سطح عایق‌های جامد

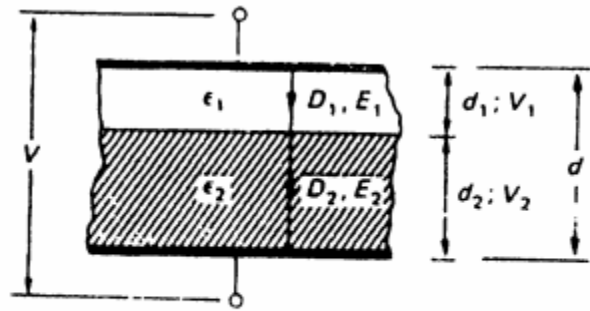
این پدیده نشان دهندهٔ به‌وجود آمدن یک مسیر هدایت به‌صورت لایهٔ کربنی و دائمی روی سطح عایق جامد است که در نتیجه، پایین آمدن استقامت الکتریکی عایق‌های جامد را به‌همراه خواهد داشت. این پدیده معمولاً در عایق‌های جامدی که از مواد آلی ساخته شده‌اند، به‌وجود می‌آید. برای عایق‌هایی که در فضای آزاد قرار می‌گیرند، به‌مرور زمان، آلودگی‌های صنعتی یا املاح روی آن‌ها را می‌پوشاند. لایهٔ آلودگی به‌همراه رطوبت، جریان ناشی سطح عایق را افزایش می‌دهد که باعث گرم شدن سطح عایق و در نتیجه خشک شدن لایهٔ رطوبت می‌شود. البته بین نقاط مرطوب جرقه زده می‌شود و این جرقه‌ها ممکن است بین دو الکترود هم زده شوند. گرمای ناشی از جرقه‌های کوچک سبب کربنیزه شدن سطح عایق شده و برای همیشه ردّ اثر آن روی سطح عایق تشکیل می‌شود. این پدیده، استفاده از عایق‌های با مواد آلی را برای محیط‌های خارجی محدود می‌سازد. شدت اثرگذاری روی سطح، به‌ساختمان پلیمری عایق بستگی دارد. همچنین میزان گرد و غبار و ذرات فلزی روی عایق، تأثیر بسیار مهمی روی این موضوع دارد.



## عایق‌های چندگانه در میدان‌های یکنواخت

در بعضی از دستگاه‌ها (مثل ترانسفورماتورها) چند عایق با عدد دی‌الکتریک مختلف در مجاور یکدیگر قرار می‌گیرند. یکی از دلایل این موضوع، می‌تواند به سبب مسایل مکانیکی باشد. مثلاً یک عایق معینی به دلیل نداشتن استقامت مکانیکی کافی، در مجاور یک عایق دیگر با استقامت مکانیکی قرار می‌گیرد، و یا مثلاً وقتی چندین لایه نازک عایق کاغذ را مجاور هم قرار می‌دهیم به علت توزیع آماري نقاط ضعیف در لایه‌های مختلف، مجموعه آن‌ها نسبت به یک لایه ضخیم از استقامت مکانیکی بهتری برخوردار خواهد بود. در ابتدا دو عایق با ضریب نفوذپذیری الکتریکی  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  را در یک میدان یکنواخت و در یک ولتاژ  $V$  در نظر بگیرید (مطابق شکل ۴-۱۶).

با توجه به این‌که چگالی شار در هر دو عایق برابر است، در نتیجه می‌توان نوشت:



شکل (۴-۱۶): عایق‌های مختلف در میدان‌های یکنواخت

$$D_1 = D_2$$

$$\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$$

$$E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_1$$

$$V = V_1 + V_2 = E_1 d_1 + E_2 d_2 = E_1 d_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_1 d_2$$

و در نتیجه،

$$(۴-۳۸)$$

به طریق مشابه می‌توان نوشت:

$$(۴-۳۹)$$

$$E_1 = \frac{V}{d_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} d_2}$$

$$E_2 = \frac{V}{d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} d_1}$$

$E_1$  هنگامی بیشترین مقدار را دارد که مقدار  $d_2 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} d_1$  کمترین مقدار را داشته باشد. در این صورت، شرایط شکست الکتریکی برای عایق لایه (۱) بدترین حالت است؛ زیرا باید میدان بیشتری را تحمل کند. بنابراین، باید همیشه عایق‌ها را طوری انتخاب کنیم که با توجه به استقامت الکتریکی هر یک از آنها، مقادیر  $E_1$  و  $E_2$  به نسبت مناسبی توزیع شوند. البته هیچ ارتباطی بین عدد دی‌الکتریک عایق‌ها و استقامت الکتریکی آنها وجود ندارد. در طراحی عایقی باید لایه‌های عایقی مجاور هم با انتخاب مناسب لایه‌ها طوری طراحی شوند که توزیع شدت میدان الکتریکی بین آنها متناسب با استقامت الکتریکی آنها باشد تا از مجموعه آنها، استفاده مناسبی به عمل آید. در نهایت از این رابطه، برخی نتایج را می‌توان به دست آورد:

الف) جایگزینی بخشی از یک ماده عایقی با ضریب  $\epsilon_1$  (مثلاً گاز موجود در یک فاصله هوایی دارای میدان یکنواخت)، با عایق دیگری با ضریب  $\epsilon_2$  ( $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ) سبب کاهش طول فاصله هوایی مؤثر می‌شود؛ زیرا با فرض ثابت بودن  $E_1$  در فاصله هوایی اولیه، طول فاصله هوایی  $d' = d_1 + d_2 (\epsilon_1/\epsilon_2)$  به دست می‌آید که در آن ضخامت لایه دوم به مقدار  $d_2 (\epsilon_1/\epsilon_2)$  کاهش یافته است. همچنین با ثابت ماندن  $V_1$ ،  $d$ ، و  $\epsilon_1/\epsilon_2$  شدت میدان  $E_1$  پیوسته با افزایش ضخامت لایه ۲،

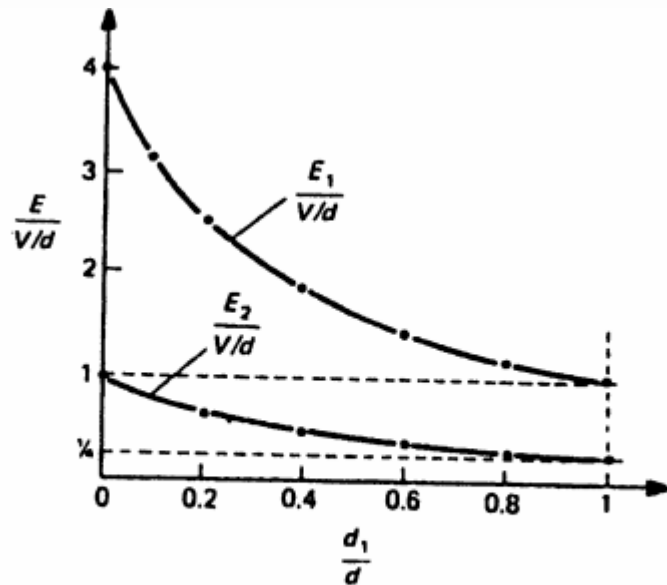
ضریب دی‌الکتریک بزرگتر افزایش می‌یابد.

ب) افزایش مداوم شدت میدان‌های  $E_1$  و  $E_2$  در سیستم صفحات موازی، متناسب با افزایش ضخامت  $d_2$  برای  $\epsilon_2 < \epsilon_1$  در شکل (۴-۱۷) رسم شده است. بدترین حالت، برای وضعیتی است که  $d_1 \rightarrow 0$  (یعنی، لایه‌های خیلی نازکی از ماده دارای ضریب نفوذپذیری الکتریکی کوچکتر) می‌رود؛ زیرا در این حالت، شدت میدان به مقدار  $\epsilon_2/\epsilon_1$  برابر حالتی است که فاصله بین دو الکترود با یک عایق پر شود. از این نظر، سیستم عایقی چندگانه بسیار مضر است، ولی با وجود این، به سبب هزینه بالای آن‌ها از عایق‌های چندگانه نمی‌توان صرف نظر نمود.

ج) با استفاده از مطالب موجود، می‌توان ضریب نفوذپذیری عایق‌های مخلوط را به دست آورد. این حالت، مثل مخلوط عایق‌های جامد با روغن است. فرض کنید دو عایق با ضریب دی‌الکتریک  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  و عایق منتهجه دارای ضریب دی‌الکتریک  $\epsilon_{res}$  باشد. در این حالت می‌توان نوشت:

$$D = \epsilon_{res} E = \epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 \quad (4-40)$$

آن‌گاه با استفاده از رابطه (۴-۳۸) در معادله (۴-۴۰) داریم:



شکل (۴-۱۷): تغییر مقادیر نسبی  $E_1$  و  $E_2$  به ازای ولتاژ  $V$  با  $d_1$  متغیر و  $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = 4$

$$\epsilon_{res} \frac{V}{d} = \epsilon_1 \frac{V}{\epsilon_1 (d_1/\epsilon_1 + d_2/\epsilon_2)} \quad (41-4)$$

در نتیجه،

$$\epsilon_{res} E = \frac{1}{\left(\frac{d_1/d}{\epsilon_1}\right) + \left(\frac{d_2/d}{\epsilon_2}\right)} \left(\frac{V}{d}\right) \quad (42-4)$$

که  $\frac{V}{d}$  بیانگر مقدار متوسط شدت میدان درون عایق مخلوط است. همچنین  $d_1/d$  و  $d_2/d$  را می توان متناسب با حجم های عایق اول و دوم نسبت به حجم کل ( $v$ ) دانست.

$$\text{حجم نسبی عایق اول} = v_1 = v_1/v$$

$$\text{حجم نسبی عایق دوم} = v_2 = v_2/v$$

در نهایت می توان ضریب دی الکتریک عایق منتجه را به صورت زیر بیان نمود.

$$\epsilon_{res} = \frac{1}{\frac{v_1}{\epsilon_1} + \frac{v_2}{\epsilon_2}} \quad (43-4)$$