عایق و فشارقوی

فصل چهارم

عایق‌های جامد

بهروز آدینه
دانشگاه فن‌آوری‌های نوین قوچان

مقدّمه

عایق‌های جامد بخش عمده‌ای از عایق‌های تأسیسات و تجهیزات الکتریکی را شکیل می‌دهند؛ زیرا استقامت مکانیکی آن‌ها معمولاً زیاد است و دارای خاصیت ایقی خوبی نیز هستند. از جمله مهمترین موادّ عایق جامد مورد استفاده در صنعت رق را می‌توان به کاغذ، مقوای فشرده، چوب (فیبر)، میکا، شیشه، سرامیک‌ها، لاستیک و پلی‌مرهای مصنوعی از جمله پلی‌اتیلن، پلی‌استر و پلی ونیل کلراید PVC[1]) اشاره نمود.

از نظر شکست عایقی، عایق‌های جامد با عایق‌های مایع و گاز خیلی متفاوت ی‌باشند؛ زیرا عایق‌های جامد پس از وقوع تخلیهٔ الکتریکی در آن‌ها (بر خلاف گازها و مایعات) دیگر قابل استفاده به‌عنوان عایق نخواهند بود. البتّه در گازها و مایعات، بعد از وقوع شکست، دوباره با پایین آمدن ولتاژ به‌عنوان یک عایق، قابل استفاده بوده و خاصیت عایقی خود را دوباره به‌دست می‌آورند. عایق‌های جامد با بروز جرقّه در آن‌ها سوراخ شده و یک کانال کربنیزه شده (هادی) در آن‌ها به‌وجود می‌آید و خاصیت عایقی خود را از دست می‌دهند.

1- *Poly Vinyl Chloride*

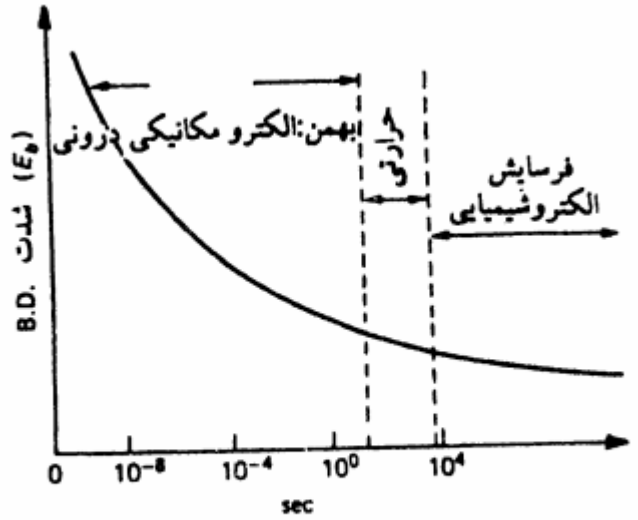
در شـرایـط مـعمولی، جـریان الکـتریکی در عـایق‌های جـامد بـه‌علّت آن‌کـه الکترون‌های آزاد بسیار کمی (کم‌تر از گازها و مایعات) در آن‌ها وجود دارد، بسیار

اندک است. معمولاً مقاومت اهمی عایق‌های جامد به‌قدری زیاد است که در هنگا اعمال ولتاژ به آن، جریان رسانایی عایق جامد در اثر الکترون‌های آزاد ناچیز است به‌علاوه، پلاریزاسیون در عایق‌های جامد نیز، می‌تواند بـاعث ایـجاد جـریان شـود (قطب‌بندی بارهای الکتریکی مثبت و منفی هر اتم تحت تأثیر مـیدان الکـتریکی). همچنین حضور ناخالصی‌ها در عایق‌های جامد، الکترون‌های آزاد آن را افزایش داده و باعث افزایش جریان رسانایی عایق‌های جامد می‌شود.

تا کنون مکانیزم‌های مختلفی برای شکست الکتریکی عایق‌های جامد ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به‌موارد زیر اشاره نمود:

۱ – مکانیزم شکست ذاتی
۲ – مکانیزم شکست الکترومکانیکی
۳ – مکانیزم شکست حرارتی
۴ – مکانیزم شکست فرسودگی
۵ – مکانیزم شکست لبه‌ها

در صورتی‌که ولتاژ لازم برای هر یک از این مکانیزم‌های شکست را بر حسب زمان رسم کنیم، شکل (۴–۱) به‌دست می‌آید.



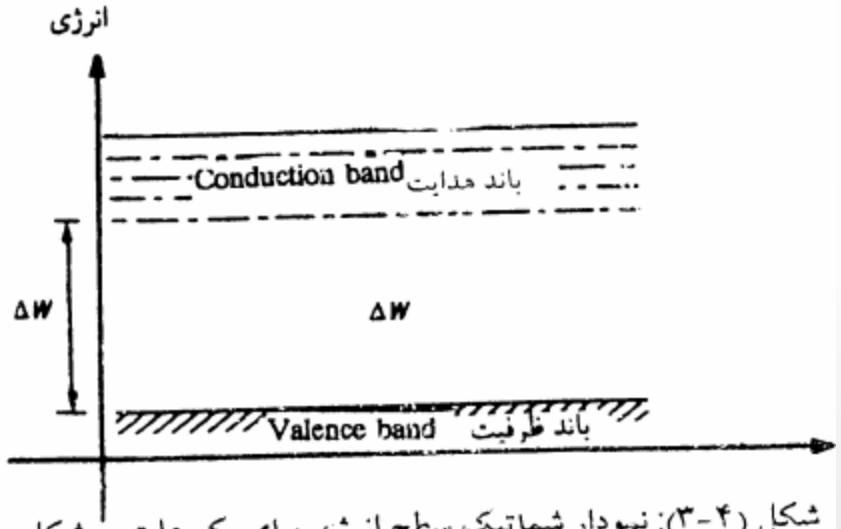
شکل (۴–۱): تغییرات استقامت الکتریکی بر اثر زمان اعمال ولتاژ

مکانیزم شکست ذاتی

اگر عایق جامد، خالص و همگن و درجه حرارت و شرایط معمولی محیطی کاملاً تحت کنترل باشد و به گونه‌ای در یک میدان الکتریکی قرار گیرد که تخلیهٔ الکتریکی خارجی وجود نداشته باشد، در آن‌صورت، شکست الکتریکی در شدّت میدان‌های بالا و در حدود ۱ تا ۱۵MV/cm رخ می‌دهد. چنین شکست الکتریکی را که تنها به ترکیب شیمیایی و خواصّ عایقی یک مادّه بستگی دارد "شکست ذاتی" می‌گویند. ولتاژ شکست ذاتی، حدّاکثر ولتاژی است که ممکن است یک عایق تحمّل کند. در عایق‌های معمولی، شکست الکتریکی در شدّت میدان‌های بسیار پایین‌تر رخ می‌دهد. با این وجود، تلاش‌های زیادی برای اندازه‌گیری شدّت میدان شکست ذاتی صورت گرفته است.

شکست ذاتی الکتریکی در زمانی بسیار کوتاه و در حدود 10^{-7} تا 10^{-8} ثانیه رخ می‌دهد. بنابراین، باید دارای ماهیتی الکترونی باشد. به‌طور کلّی شکست ذاتی در صورتی اتّفاق می‌افتد که الکترون‌های عایق از میدان اعمال شده، انرژی کافی برای عبور از باند ظرفیت را به باند هدایت به‌دست آورند. با وجود این‌که مکانیزم‌های مختلفی برای یافتن میدان بحرانی شکست ذاتی ارائه شده است، امّا هنوز هیچ کدام از آن‌ها نتیجهٔ کاملاً رضایت‌بخشی ارائه نمی‌دهند. مدل‌های ارائه شده در مکانیزم

انتقال انرژی، از الکترون‌های هدایت به شبکهٔ عایق و همچنین توزیع الکترون‌ها
هدایت تفاوت دارند. در عایق‌های خالص همگن، باندهای هدایت و ظرفیت با یک
فاصلهٔ انرژی زیادی از هم جدا شده‌اند و در درجه حرارت معمولی الکترون، انرژ
کافی برای انتقال از باند ظرفیت به باند هدایت را به‌دست نمی‌آورد. بنابراین، هدایت
در عایق‌های کامل باید صفر باشد؛ لیکن در عمل، تمام بلورها (کریستال‌ها) شامل
ناخالصی‌ها و یا نقص‌های کریستالی در شبکهٔ خود هستند. اتم‌های ناخالصی‌ه
می‌توانند دارای باند هدایتی با انرژی پایین‌تر از باند هدایت عایق باشند (شکل ۴-
را ببینید). وجود ناخالصی‌ها، پهنای باند رسانایی را افزایش می‌دهد و ΔW را ک
می‌کند. همچنین افزایش درجه حرارت نیز فاصلهٔ ΔW را کاهش می‌دهد؛ زیر
حرارت، خود مقداری از انرژی را تأمین می‌کند. به‌طوری که در درجه حرارت‌های
بسیار پایین، میدان لازم برای شکست ذاتی به ۱۰۰MV/cm می‌رسد. با اعمال میدان
الکتریکی به عایق، الکترون‌های هدایت از میدان انرژی می‌گیرند و با برخورد بین
آن‌ها انرژی بین آن‌ها تقسیم می‌شود. در شرایط عادی این انرژی باید پراکنده شود.
اگر کریستال، خالص و تعداد کمی الکترون وجود داشته باشد، بیشتر این انرژی در
تأثیر متقابل الکترون – شبکه، به شبکهٔ عایق منتقل می‌شود. در شرایط ماندگار،
درجه حرارت الکترون‌ها (T_e) نزدیک یا مساوی با درجه حرارت شبکه (T) است.
در عایق‌های بی شکل، تأثیر متقابل الکترون‌ها بر همدیگر شدیدتر است و میدان،
نرژی الکترون‌ها را سریع‌تر از آنکه بتوانند آن را به شبکه منتقل کنند بالا می‌برد و



شکل (۴-۳): نمودار شماتیک سطح انرژی برای یک عایق بی‌شکل

درجه حرارت الکترون‌ها (T_e) بیشتر از درجه حرارت شبکه می‌شود. در نتیجه، تعداد بیشتری از الکترون‌ها به باند هدایت می‌رسند و افزایش انرژی الکترون‌ها تا شکست کامل عایق پیش می‌رود. به‌طور کلّی شکست ذاتی به حضور الکترون‌های آزاد که قابل حرکت در شبکه عایق هستند بستگی دارد. معمولاً تعداد کمی از این الکترون‌ها در عایق وجود دارند که با توجّه به نقص‌های ساختمانی شبکه و یا مقادیر اندک ناخالصی‌ها، و بسته به حرارت و شدّت میدان، ایجاد می‌شوند. با افزایش حرارت و شدّت میدان، الکترون‌های بیشتری از باند ظرفیت به باند هدایت منتقل می‌شوند و در هدایت شرکت می‌کنند.

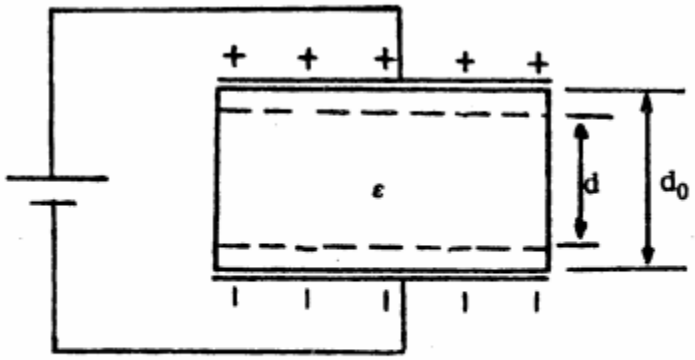
مکانیزم شکست الکترومکانیکی

هنگامی‌که یک عایق با عدد دی‌الکتریک ε در یک میدان الکتریکی قوی قرار می‌گیرد، تحت تأثیر میدان، نیروی جاذبهٔ مکانیکی بر عایق، وارد می‌شود و بسته به میزان مقاومت مکانیکی آن، طول اوّلیهٔ عایق از d_0 به d می‌رسد (مطابق شکل ۴-۴). در شدّت میدان $10^6 V/cm$ ممکن است فشار مکانیکی بر عایق به چند kN/m^2 برسد. اگر d_0 ضخامت اوّلیهٔ قطعه عایقی با ثابت یانگ Y (که وابسته به میزان پلاستیسیته عایق جامد است) باشد و با اعمال ولتاژ V ضخامت عایقی به d کاهش یابد، آنگاه در صورت تحمّل نیروی الکترواستاتیکی توسّط قطعه عایق جامد، تنش فشاری ناشی از نیروی الکترواستاتیکی در تعادل با استقامت مکانیکی خواهد بود. در این حالت، خواهیم داشت:

$$\varepsilon \frac{V^2}{2d^2} = Y \ln\left(\frac{d_0}{d}\right) \qquad (۱-۴)$$

$$V^2 = d^2 \frac{2Y}{\varepsilon} \ln\left(\frac{d_0}{d}\right)$$

$$V = \sqrt{\frac{2Yd^2}{\varepsilon} \ln\left(\frac{d_0}{d}\right)} \qquad (۲-۴)$$



شکل (۴-۴): نیروی الکترومکانیکی در عایق‌های جامد

ثابت جروناییزن (Grüneisen)

مدول الاستیسیته (E) یا همان مدول یانگ برابر است با نسبت تنش بر کرنش ایجاد شده به واسطه ی تنش وارده بر جسم در حالتی که جسم در ناحیه الاستیک قرار گرفته باشد. واحد مدول الاستیسیته در SI پاسکال (همواحد با تنش) می باشد.

$$E \equiv \frac{\sigma(\varepsilon)}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{FL_0}{A_0 \Delta L}$$

مدول یانگ را به پیروی از توماس یانگ، دانشمند قرن نوزدهم میلادی بریتانیایی نام نهادند.

که در آن:

E مدول یانگ است (مدول الاستیسیته) F نیروی وارد بر یک شیء تحت تنش است. A0 ناحیه واقعی مقطعی که از طریق آن نیروی اعمال شده است. ΔL مقدار متوسط طول تغییرات شی است. L0 طول اولیه جسم است.

مدول یانگ بعد از توماس یانگ، دانشمند انگلیسی قرن نوزدهم به این نام نامگذاری شد.
در فیزیک به خصوصیات ماده و اینکه بعد از کشیدن یا متراکم کردن آن چگونه و تا چه میزان به شکل اولیه بازمی‌گردد کشسانی یا خاصیت ارتجاعی گفته می‌شود. به بیان دیگر، اینکه یک ماده تا چه اندازه به تغییر شکل مقاوم باشد جزء ویژگی‌ها و مشخصه‌های آن ماده محسوب می‌شود. این مطلب دقیقاً مقابل این تصور ابتدائی است که اگر شیئی را بتوان بیشتر از بقیه اجسام کشید، آن شیء فنری شکل بوده و خاصیت ارتجاعی دارد. به همین دلیل، یک میله فلزی نسبت به لاستیک کشسان‌تر بوده و خاصیت ارتجاعی بیشتری دارد. یک میله فلزی، بعد از قطع نیروهای کششی یا فشاری که باعث تغییر شکل جسم می‌شود، نسبت به لاستیک خیلی بهتر شکل قبلی خود را دوباره بدست می‌آورد.
ماده می‌تواند در تمامی جهات تغییر شکل دهد. وقتی ماده‌ای در مقابل کشش یا فشارهای خطی مقاومت می‌کند، در واقع استحکام ارتجاعی و کشسانی از خود نشان می‌دهد. مقدار این استحکام با مدول یانگ داده می‌شود.

تنش (Stress):

• وقتی جسمی تحت نیرویی فشرده یا کشیده می‌شود، نیروهای بازگرداننده داخلی در آن جسم بوجود می‌آیند که با این تغییر شکل مخالفت می‌کنند.
• به این نیروهای بازگرداننده داخلی در واحد سطح مقطع جسم تنش گفته می‌شود.
• مقدار تنش برابر است با مقدار نیروی خارجی اعمال شده در واحد سطحی که نیرو به آن سطح وارد می‌شود.
• تنش با فرمول زیر بیان می‌شود:

$\sigma = F / A$

که در آن F علامت نیرو و A مساحت است.

• واحد تنش در دستگاه استاندارد SI برابر است با واحد نیرو تقسیم بر واحد سطح که برابر است با نیوتن بر مترمربع یا همان پاسکال.

بنابراین واحد تنش همان واحد فشار است.

کرنش (Strain):

• وقتی جسمی تحت تأثیر نیرویی فشرده یا کشیده می‌شود، شکل آن تغییر می‌کند.
• به تغییر شکل جسم که در اثر این نیرو ایجاد می‌شود کرنش گفته می‌شود.
• بنابراین کرنش نسبت تغییرات طول جسم است نسبت به طول اصلی جسم.
• کرنش با فرمول زیر بیان می‌شود:

کرنش = میزان کشیدگی یا فشردگی بخش بر طول، یا

کرنش = $\Delta l/l$

• واحد کرنش: کرنش هیچ واحدی نداشته و یک مقدار بدون بعد است. زیرا برابر است با نسبت دو طول با واحد یکسان.

مدول یانگ:

- مدول یانگ در واقع مدول یا قدر مطلق استحکام کشسانی ماده است.
- خاصیت کشسانی ماده بیانگر آن است که ماده تا چه میزان نیروهایی که باعث تغییر شکل ماده می‌شوند را تحمل می‌کند، چقدر با آن مقابله می‌کند و تا چه میزان دستخوش تغییر می‌شود.
- ماده وقتی تغییر شکل می‌دهد که در طول یک محور فشرده یا کشیده شود. مدول یانگ برابر است با مقدار تنش به کرنش:

فرمول مدول یانگ = تنش تقسیم بر کرنش

$= \sigma / \varepsilon$

$= (F/A)/(\Delta L/L)$

واحد مدول یانگ در دستگاه SI برابر است با واحد تنش به واحد کرنش.

واحد تنش پاسکال، و کرنش بدون بعد است. بنابراین واحد مدول یانگ نیز همان پاسکال می‌باشد. در عمل بیشتر از مگاپاسکال، MPa، که برابر N/mm2، و یا گیگاپاسکال، GPa، که برابر KN/mm2 است استفاده می‌شود.

بعنوان مثال، مدول یانگ استیل برابر با 200×109 GPa می‌باشد.

با مشتق‌گیری از رابطهٔ (۴-۲) نسبت به d، ولتاژی که به ناپایداری مکانیکی عایق می‌انجامد، در شرایط زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\mathrm{d}\,V}{\mathrm{d}\,d} = ۰$$

$$\frac{d}{d_۰} = e^{-۱/۲} = ۰/۶ \qquad (۴-۳)$$

بنابراین، هیچ ولتاژی نمی‌تواند مقدار پایداری $d/d_۰$ کم‌تر از ۰/۶ تولید کند؛ زیرا اگر در این مقدار شکست ذاتی رخ ندهد، افزایش بیشتر در مقدار V به ناپایداری و فروپاشی مکانیکی عایق و همزمان شکست الکتریکی می‌انجامد. بنابراین، حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی که برای عایق قابل تحمّل است، عبارت است از:

$$V_{max} = ۰/۶\ d_۰ \sqrt{\frac{Y}{\varepsilon}} \qquad (۴-۴)$$

و میدان شکست الکتریکی عایق:

$$E_{\max} = \frac{V_{\max}}{d_۰}$$

$$E_{max} = ۰/۶ \left[\frac{Y}{\varepsilon}\right]^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۴-۵)$$

ملاحظه می‌شود که میدان شکست الکترومکانیکی عایق به مشخصه الکتریکی (ε) و مشخصهٔ مکانیکی (Y) جسم توأماً بستگی دارد. البتّه رابطهٔ اخیر تقریبی است؛ زیرا که Y به تنش مکانیکی بستگی دارد. همچنین در تنش‌های فشار قوی، نظریهٔ الاستیته به خوبی مؤثّر نخواهد بود و تغییر شکل‌های پلاستیک نیز باید در نظر گرفته شوند.