

## فصل اول

### مقدمه‌ای بر مسائل عایق‌های الکتریکی و فشار قوی

#### ۱-۱- مقدمه

اصولاً ولتاژهای کم‌تر از هزار ولت را فشار ضعیف، و بیش از هزار ولت را فشار قوی می‌گویند. دستگاه‌هایی را که با ولتاژهای بیش از هزار ولت کار می‌کنند، به اصطلاح "تجهیزات فشار قوی" می‌گویند. در عصر حاضر، برق فشار قوی موارد کاربرد فراوانی از قبیل استفاده در نیروگاه‌ها، ایستگاه‌های انتقال برق، خطوط انتقال برق، صنایع و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی دارد؛ به طوری که موارد ذکر شده، از عوامل اساسی ادامه بقای تمدن روزگار ما شده است. همچنین برق فشار قوی، در تحقیقات هسته‌ای و دستگاه‌های شتاب دهنده الکترون مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای انتقال مقادیر زیاد انرژی الکتریکی در فواصل طولانی، استفاده از ولتاژ فشار قوی، به منظور کاهش تلفات و افزایش بازده خطوط انتقال، اجتناب‌ناپذیر است. از موارد دیگری که برق با ولتاژ بیش از صد کیلوولت استفاده می‌شود، در سیم‌پیچ جرقه اتومبیل‌ها و همچنین وسایل پرتونگاری (که در پزشکی و صنعت به کار برده می‌شوند) می‌باشد. در آزمایش‌هایی که جدیداً انجام می‌شود، از ولتاژهای تا ۶۰۰ kV یا بیشتر نیز استفاده می‌شود.

در شرایطی که از ولتاژ فشار قوی استفاده می‌شود، طراحی دقیق سیستم عایقی

از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین منظور از عایق‌های مختلفی از قبیل گازها، جامدات و مایعات و ایجاد خلاء و یا ترکیبی از آن‌ها استفاده می‌شود. برای صرفه‌جویی و اطمینان از انجام موفق کار، باید دانش مربوط به عوامل فساد عایق و نیز عواملی را که باعث کاهش ولتاژ شکست و از بین رفتن عایق می‌شوند، در طراحی مورد توجه قرار داد. وظیفه عایق‌ها، ایزولاسیون (جدا سازی الکتریکی) ولتاژهای فشار قوی نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به زمین می‌باشد، تا هم ولتاژ و جریان فشار قوی در مسیر مربوط به خود قرار گیرند و هم از بروز خسارت و ضرر و زیان به افراد و تجهیزات جلوگیری شود. عایق ایده‌آل (طبق تعریف)، یک نارسانای جریان الکتریسیته است که هیچ جریان الکتریکی را از خود عبور نمی‌دهد؛ ولی عملاً هیچ ماده‌ای را در طبیعت نمی‌توان یافت که ویژگی‌های یک عایق ایده‌آل را داشته باشد. اما برای استفاده‌های کاربردی، یک عایق، ماده‌ای است که عبور جریان از خود را در حد بسیار کم و مطلوبی محدود نماید؛ به حدی که بتوان از آن صرف‌نظر کرد. به عبارت دیگر، در ولتاژهای عادی، مقاومت الکتریکی عایق خیلی زیاد است. اگر در ولتاژهای بسیار بالا از عایق، جریان قابل ملاحظه‌ای عبور کند در حقیقت، عایق دیگر خاصیت عایقی خود را از دست داده، دچار شکست الکتریکی می‌شود؛ به عبارت دیگر، عایق تبدیل به هادی می‌شود. قبل از بروز شکست در عایق‌ها، عایق شبیه به یک خازن است که دو الکتروود در دو طرف آن، صفحات خازن هستند و با اعمال ولتاژ به این خازن، شارژ می‌شود. پس از شکست الکتریکی عایق، این خازن در واقع دشارژ و تخلیه می‌گردد. به همین دلیل پدیده شکست الکتریکی عایق‌ها را، تخلیه الکتریکی نیز می‌گویند. استقامت الکتریکی عایق‌ها را بر حسب بالاترین شدت میدان الکتریکی قابل تحمل، قبل از تخلیه الکتریکی می‌سنجند و معمولاً آن بر حسب  $kV/cm$  یا  $kV/mm$  بیان می‌شود. بررسی عملکرد عایق‌ها، نیاز به بررسی‌های علمی (با استفاده از نظریه‌های فیزیکی و روابط ریاضی) و همچنین بررسی‌های تجربی (از طریق آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های لازم)، روی عایق‌ها دارد و پیشرفت‌های حاصل در زمینه مکانیزم تخلیه الکتریکی عایق‌ها همواره با این دو مورد همگام بوده است.

همان‌گونه که گفتیم، مواد عایقی، مقاومت فوق‌العاده زیادی در برابر عبور جریان

از هادیهای دارای اختلاف پتانسیل نسبت به هم، از خود نشان می‌دهند که باعث می‌شود تا جریان نشتی در مقایسه با جریان‌های اصلی عبوری از سیم‌پیچ‌های ژنراتورها، موتورها و ترانسفورماتورها یا هادی‌های خطوط انتقال هوایی و یا کابل‌های زیرزمینی ناچیز باشد. به‌منظور درک بهتر جگونگی شکست مواد عایقی، یک مطالعه مختصر در مورد مواد عایقی الکتریکی لازم است. از سال‌های آغاز پیدایش مهندسی برق تا سال ۱۸۳۰ میلادی، در اختراعات و آزمایش‌های الکتریکی، مواد عایقی مورد نیاز در تجهیزات، به آسانی در دسترس بودند. اما با پیشرفت و رشد صنعت برق، بعضی از مواد عایقی مانند لاستیک، آسفالت، میکا، پنبه، شالاک (لاک شیشه‌ای)، پارچه ورنی و غیره استفاده عملی پیدا کردند. بنابراین تا قبل از جنگ جهانی دوم، میکا، پنبه نسوز، قیر و شالاک و مواد مصنوعی نیز، به صنعت عایق‌کاری راه یافتند. بعد از جنگ جهانی دوم هم مواد عایقی مانند پلپتین، PVC، پلاستیک‌ها، پلی‌نامیدها، پلی‌کربنات‌ها، پلی‌استرن، پلی‌اتیلن و غیره در امر عایق‌کاری مورد استفاده قرار گرفتند.

### ۱-۲- ویژگی‌های الکتریکی و خواص فیزیکی و شیمیایی مواد عایقی

کاربرد عایق‌ها در ساخت ژنراتورها، موتورها، ترانسفورماتورها، برقگیرها، خازن‌ها، کابل‌ها، کلیدهای فشار قوی، مقره‌ها و سایر تجهیزات فشار قوی بسیار گسترده است. با توجه به نوع کاربرد و شرایط محیطی که عایق در آن قرار می‌گیرد، علاوه بر خاصیت الکتریکی، سایر خواص فیزیکی و شیمیایی آن نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. ویژگی‌های یک ماده عایقی را برای استفاده‌های بخصوص می‌توان به صورت زیر، اولویت‌بندی نمود:

- ۱- رفتار مکانیکی
- ۲- رفتار گرمایی
- ۳- پارامترهای شیمیایی
- ۴- خصوصیت‌های الکتریکی
- ۵- عوامل اقتصادی

### ۱-۲-۱ رفتار مکانیکی ماده عایقی

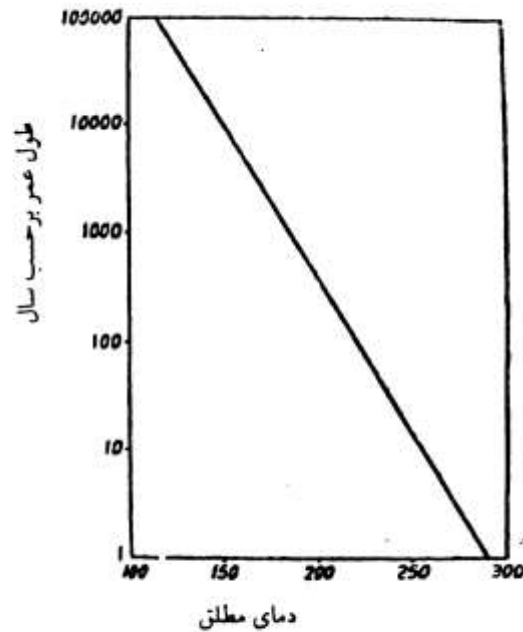
استحکام ماده عایقی، نیاز اصلی و اساسی آن می‌باشد. ضریب کشسانی برای یک ساختمان سخت، باید بالا و برای یک سیستم عایقی باید پایین باشد. به عنوان مثال، جنس صفحه آستر شیار ماشین‌های الکتریکی باید به اندازه کافی سفت باشد تا بتواند در مقابل صفحه داخلی شکاف منبسط شده، بدون شکستن تا بخورد و نیز باید لبه شکاف در مقابل ورقه ورقه شدن، ارتعاش، تأثیر شیمیایی روغن جلای به کار رفته، اثر افزایش دما، جذب رطوبت و غیره مقاومت کند. برآمدگی سیم‌پیچ باید در قبال فرسودگی، مقاومت زیادی کند و یا ضریب اصطکاک کمی داشته باشد. جلای عایقی باید کاملاً به سیم‌ها چسبیده باشد و الاستیته لازم برای انبساط را داشته باشد تا بر اثر تغییر دما، مس‌ها بتوانند به هم برسند. بنابراین، ملزومات مکانیکی بسته به نوع کاربرد برای یک عایق، متفاوت‌اند.

### ۱-۲-۲ رفتار گرمایی ماده عایقی

در به کارگیری بسیاری از عایق‌ها به نوعی از مواد عایقی نیاز است که در یک دوره کوتاه اضافه بار<sup>(۱)</sup> و در دماهای بسیار بالا منبسط نگردند. معمولاً ویژگی‌های فیزیکی مواد با افزایش دما، تغییر می‌کنند. نیروی کششی در عایق‌ها نباید به نقطه‌ای برسد که باعث تغییر شکل و فرسودگی بیش از اندازه آن شود. همچنین یک ماده عایقی از نوع ترموپلاستیک<sup>(۲)</sup>، نباید دمای عملکرد آن (حتی برای یک زمان کوتاه) به دمای نقطه ذوب برسد. وقتی مواد عایقی برای مدت طولانی‌تری در معرض حرارت قرار می‌گیرند، ترکیب شیمیایی آن‌ها تغییر می‌کند. این تغییر شیمیایی باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی از حالت مجاز به حالت غیرمجاز می‌شود و در نتیجه، کهنگی و فرسودگی ماده را به همراه خواهد داشت. بنابراین، می‌توان گفت که مدت زمان عملکرد عایق با دمای مطلق آن عایق، نسبت عکس دارد که نمودار آن برای اغلب عایق‌ها، یک نمودار تقریباً خطی خواهد بود. در شکل (۱-۱) این ارتباط نشان داده شده است.

#### 1- Over Load

۲- موادی که در اثر گرما دادن به آن، نرم می‌شوند.



شکل (۱-۱): رابطه بین دمای مطلق و کارکرد عایق

### ۱-۲-۳- رفتار شیمیایی

رفتار شیمیایی به تأثیر محیط روی ماده عایق بستگی دارد. معمولاً این محیط همان هوای حامل رطوبت است. اکسیژن موجود در هوا قادر است عایق را به گونه‌ای اکسید کند که به شکل زیان‌آوری، ویژگی‌های فیزیکی آن از بین رود. همچنین می‌تواند باعث تخریب بعضی عایق‌ها شود. به علاوه اثرات تخریبی روی سطح عایق باعث می‌شود که مقاومت عایقی پایین بیاید.

### ۱-۲-۴- خصوصیات الکتریکی

از مهم‌ترین خصوصیت‌های هر عایقی، استقامت الکتریکی آن است. استقامت الکتریکی عایق‌ها بر حسب حداکثر شدت میدان الکتریکی قابل تحمل آن‌ها سنجیده می‌شود و معمولاً بر حسب  $kV/cm$  بیان می‌گردد. ولتاژ شکست یک قطعه

## عایق‌ها و فشارقوی

عایق، به ضخامت آن بستگی دارد؛ لیکن میدان شکست عایق تقریباً مستقل از ضخامت آن است و به جنس عایق بستگی دارد.

## ۱-۲-۵- عوامل اقتصادی

یکی از عوامل مؤثر در طراحی عایق‌ها، طرح یک سیستم عایقی است، به گونه‌ای که بهترین عملکرد را به ازای قیمت مناسب داشته باشد. البته این موضوع به معنای تلاش برای کم کردن قیمت‌های در واحد وزن، برای سیستم‌های عایق‌کاری و تجهیزات آن نمی‌باشد. اگر با صرف هزینه بیشتری برای یک یا چند قطعه در سیستم، بتوان ابعاد سیستم را کاهش داد، در نتیجه عاقلانه‌تر است که از عایق‌های گران‌تر، بیشتر استفاده شود. جملگی این مسائل باید پیرامون قیمت در واحد وزن، تولید، مصرف و تغییر طراحی برای انطباق در دماهای بالاتر مورد بررسی قرار گیرد.

## ۱-۳- طبقه‌بندی مواد

مواد عایقی همیشه بر اساس دمای کار نامی آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. با ظهور بسیاری از مواد جدید عایقی، طبقه‌بندی جدید مواد نیز مانند جدول (۱-۱) به وجود آمده است. این دسته‌بندی بر اساس دمای نامی عایق‌هاست. البته طول عمر نامی عایق‌ها وقتی معتبر است که دمای کار عایق در شرایط بهره‌برداری، همواره از دمای نامی آن بیشتر نشود.

جدول (۱-۱): طبقه‌بندی مواد عایقی بر حسب دما

دما (°C)	طبقه
۹۰	Y
۱۰۵	A
۱۲۰	E
۱۳۰	B
۱۵۵	F
۱۸۰	H
بالای ۱۸۰	C

نمونه‌ای از مواد عایقی در هر یک از طبقات جدول (۱-۱) عبارتند از:

طبقه Y: کاغذ، پنبه، ابریشم، PVC، و لاستیک طبیعی؛

طبقه A: پنبه و ابریشم یا کاغذی که به‌طور کامل در یک دی‌الکتریک مایع غوطه‌ور، آغشته و یا کاملاً پوشیده شده باشد؛

طبقه E: پلی‌اتیلن، سلولز؛

طبقه B: میکا، پشم شیشه، پنبه‌نسوز، پلی‌استر، باکلیت، آسبست، و غیره همراه با مواد چسب‌دار مناسب؛

طبقه F: اپوکسی‌رزین، و مواد طبقه B اصلاح یافته و قابل کاربرد در دماهای بالاتر؛

طبقه H: لاستیک سیلیکون دار؛

طبقه C: تفلون و عایق‌های گروه B که آغشته به چسبنده‌های غیر آلی شده باشند.

تجهیزات الکتریکی با طبقه عایقی مخصوص می‌توانند در دمای بالاتری هم کار کنند، اما عمر مفید آنها کاهش می‌یابد. عمر تجهیزات، تابعی از دما و زمان است و در کل عملکرد اجزا، به عمل آنها در سیستم بستگی دارد. رابطه تقریبی برای تخمین عمر عایق‌ها را می‌توان به‌صورت زیر ارائه کرد:

$$L = L_0 \times 2^{-(\theta - \theta_0) / \Delta\theta} \quad (1-1)$$

که در این رابطه:

$L$  = طول عمر عایق در شرایط کارکرد با دمای  $\theta$ ،

$L_0$  = طول عمر نامی عایق در دمای نامی  $\theta_0$  مربوط به کلاس عایقی،

$\Delta\theta$  = پله دمایی است که عمر عایق نصف می‌شود (برای عایق‌های مختلف بین ۶ تا ۸ درجه سانتیگراد است).

## فصل دوم

### عایق‌های گازی

#### ۲-۱- مقدمه

در مبحث عایق‌های فشار قوی، گازها دارای اهمیت بالا و کاربردهای فراوانی در صنعت برق می‌باشند. از جمله این کاربردها می‌توان استفاده از آن‌ها را در کلیدهای فشار قوی نام برد. از مهم‌ترین عایق‌های گازی می‌توان به هوا، ازت ( $N_2$ )، دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ )، هیدروژن ( $H_2$ ) و هگزاfluورسولفور ( $SF_6$ ) نام برد. از گاز دی‌اکسیدکربن برای جلوگیری از اکسیداسیون استفاده می‌شود همچنین هیدروژن دارای گرمای ویژه ۱۵ برابر هوا و گاز  $SF_6$  دارای استقامت عایقی ۲ تا ۳ برابر هواست. گاز  $SF_6$  از لحاظ حرارتی بسیار پایدار و بدون اثر سوء روی فلزات است. از هیدروژن به دلیل خاصیت خوب انتقال گرمایی آن، معمولاً در خنک‌سازی ژنراتورها استفاده می‌کنند.

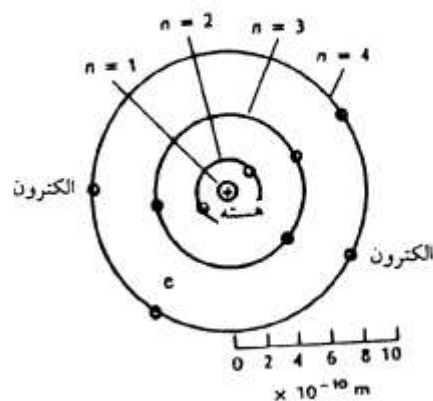
ایجاد جریان الکتریکی در داخل گازها نیاز به وجود ذرات باردار (یعنی الکترون و یون) دارد. تحت تأثیر یک میدان الکتریکی، ذرات باردار در راستای میدان الکتریکی حرکت کرده، یک جریان را به وجود می‌آورند. در صورتی که یک گاز از کلیه عواملی که منجر به ایجاد ذرات باردار در آن می‌شود دور نگاه داشته شود، در آن صورت هیچ‌گونه جریان الکتریکی در آن به وجود نمی‌آید. این موضوع را می‌توان در خلاء مطلق (که یک عایق مطلق است)، مشاهده نمود. البته ایجاد خلاء مطلق امکان‌پذیر نیست؛ به عبارت دیگر، عایق مطلق وجود نخواهد داشت. از طرفی تعداد



ذرات باردار داخل یک گاز در شرایط عادی خیلی کم است؛ بنابراین، گازها، عایق‌های خوبی هستند و جریان‌های الکتریکی در آنها بسیار کم و در حد مطلوبی است.

## ۲-۲- یونیزاسیون در گازها

در مدل اتمی بور، الکترون‌هایی که دور هسته می‌گردند، دارای مدارهای مشخصی هستند که هر مدار بیانگر سطح مشخصی از انرژی است. کم‌ترین انرژی مربوط به نزدیکترین مدار به هسته است و مدارهای با شعاع بزرگ‌تر بیانگر سطوح انرژی بالاتری هستند. هر چه الکترون‌ها روی مدارهای بزرگ‌تر حول هسته در گردش باشند، اتم هم دارای انرژی بیشتری است (شکل ۲-۱ را ببینید).



شکل (۲-۱): ساختمان اتم خنثی (اتم A)

وقتی الکترون‌ها یکی از اشکال پایدار خود را روی یکی از مدارها دارند، اتم در یک وضعیت پایدار قرار دارد. واحد انرژی الکترون‌ها را جهت سادگی الکترون‌ولت انتخاب می‌کنند (یک الکترون‌ولت، بیانگر مقدار کاری است که توسط میدان الکتریکی برای انتقال یک الکترون بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل یک ولت انجام می‌شود). مثلاً وقتی می‌گوییم یک الکترون دارای  $10\text{ eV}$  انرژی است، بدین معناست که این الکترون بین دو نقطه از میدان الکتریکی که دارای اختلاف پتانسیلی برابر با  $10$  ولت‌اند، حرکت کرده است. رابطه بین الکترون‌ولت با دیگر واحدهای سنجش

انرژی را می‌توان از رابطه انرژی الکتریکی بین دو نقطه، و بر اساس معادله زیر توصیف نمود:

$$W_{AB} = q \int_A^B E \cdot ds = q \cdot V_{AB} \quad (1-2)$$

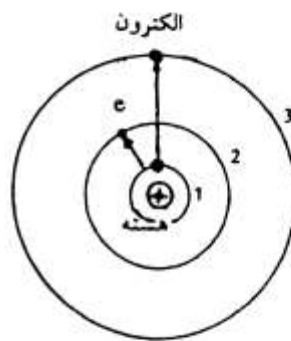
که در این رابطه،  $E$  شدت میدان،  $q$  بار الکترون، و  $V_{AB}$  ولتاژ بین دو نقطه  $A$  و  $B$  است. از آنجا که بار الکترون برابر  $C \times 10^{-19} = 1.6 \times 10^{-19}$  است، بنابراین، داریم:

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \times 1(\text{V}) = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Jule یا (Ws)} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ ergs}$$

معمولاً در عمل، به جای انرژی از پتانسیل الکتریکی  $V$  بر حسب ولت صحبت می‌شود که مقدار عددی آن برابر مقدار انرژی با واحد الکترون-ولت است. با توجه به این که الکترون‌ها در هر مداری دارای انرژی معینی هستند، بنابراین، برای جدا کردن الکترون از اتم باید از خارج به آن انرژی بدهیم. عمل جدا شدن الکترون از اتم یا مولکول را "یونیزاسیون" و انرژی لازم برای انجام آن را "انرژی یونیزاسیون" ( $W_i$ ) می‌گویند. چنان‌که ذکر شد، برای سنجش این انرژی، معمولاً پتانسیل یونیزاسیون  $V_i$  به کار می‌رود که از نظر عددی برابر با همان انرژی یونیزاسیون بر حسب الکترون‌ولت است. قسمتی از اتم را که بعد از یونیزاسیون باقی می‌ماند، یون مثبت می‌گویند که از نظر الکتریکی دارای بار مثبت بوده، مخالف علامت الکترون است. بعد از فرآیند یونیزاسیون، الکترون‌ها و یون‌های مثبت به‌طور مستقل و آزاد حرکت می‌کنند. این ذرات، تحت تأثیر یک میدان خارجی، می‌توانند شتاب بگیرند و انرژی جنبشی کسب نمایند. این نکته نیز می‌تواند جالب باشد که یون‌ها هم انرژی یونیزاسیون و هم انرژی جنبشی را دارا هستند و تنها وقتی انرژی یونیزاسیون آن‌ها آزاد می‌شود که یک الکترون آزاد برای تشکیل یک اتم عادی (خنثی) با هر یک از آن‌ها دوباره ترکیب شود. معمولاً یون و الکترون در سطح الکتروود و یا دیواره ظرف با هم ترکیب می‌شوند و انرژی گرمایی را به محیط منتقل می‌کنند. البته یون‌های منفی که شامل یک الکترون متصل به یک اتم خنثی هستند نیز وجود دارند؛ اما انرژی داخلی کم‌تری نسبت به یون‌های مثبت دارند. احتمال وجود یون‌های منفی در گازهای با درصد اکسیژن بالا، بیشتر خواهد بود.

اگر بخواهیم علاوه بر الکترون اول، الکترون دیگری از مولکول (یا اتم) گاز جدا کنیم، باید انرژی بسیار بیشتری به آن بدهیم. این انرژی را "پتانسیل دوم

یونیزاسیون " آن مولکول (یا اتم) می‌گویند) بنابراین، پتانسیل دوم یونیزاسیون خیلی بیشتر از پتانسیل اول یونیزاسیون است، اگر انرژی اعمال شده کم‌تر از انرژی لازم برای یونیزاسیون باشد، ممکن است که الکترون فقط از مدار اولیه خود به مداری با انرژی بالاتر برود؛ که این فرآیند را تحریک اتم می‌گویند (شکل ۲-۲ را ببینید).



شکل (۲-۲): ساختمان اتم تحریک شده ( $A^*$ )

به همین ترتیب، یک یون مثبت را نیز می‌توان تحریک نمود، ولی انرژی لازم برای تحریک آن از انرژی یونیزاسیون اتم خنثی بیشتر است. البته اتم تحریک شده فقط برای مدت زمان کوتاهی می‌تواند در حال تحریک شده باقی بماند و پس از آن دوباره به حالت اصلی خود باز می‌گردد. این کار، توأم با آزاد سازی انرژی به صورت انرژی نورانی است که فرکانس نور تابیده شده  $f$  (چنانچه انرژی اتم در حال تحریک برابر با  $W_1$  و در حالت موقعیت اصلی آن برابر  $W_2$  باشد)، از رابطه (۲-۲) به دست می‌آید.

$$(W_1 - W_2) = h \cdot f \quad (2-2)$$

در این رابطه  $h$  ثابت پلانک و برابر با  $6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}$  می‌باشد. مدت زمانی که یک الکترون روی مدارهای بالاتر می‌ماند، بسیار کوتاه است که این زمان در حدود  $10^{-8}$  تا  $10^{-7}$  ثانیه است. برای بعضی از اتم‌ها این زمان بیشتر و به حدود  $10^{-2}$  ثانیه می‌رسد. به این حالت از اتم، "حالت نیمه پایدار" (زمان ناپایداری بزرگ‌تر) می‌گویند. در جدول (۱-۲) انرژی لازم برای تحریک و یونیزاسیون گازها و بخار فلزات ارائه شده است.

جدول (۱-۲): انرژی لازم برای تحریک و یونیزاسیون گازها و بخار فلزات

گاز یا بخار فلز	پتانسیل اول تسخیر (eV)	پتانسیل اول یونیزاسیون	پتانسیل دوم یونیزاسیون	پتانسیل اول تحریک برای مدار با زمان ناپایداری بزرگ‌تر
H	۱۰/۱۵	۱۳/۵	-	-
H <sub>۲</sub>	۱۰/۸	۱۵/۹	-	-
N	-	۱۴/۵	۲۹/۴	-
N <sub>۲</sub>	۶	۱۵/۸	-	-
O	-	۱۳/۶	۳۴/۸	-
O <sub>۲</sub>	۷/۹	۱۲/۵	-	-
He	۱۹/۸	۲۴/۵	۵۴/۲	۱۹/۷-۲۰/۵۵
Hg	۴/۸۶	۱۰/۴	۱۸/۶	۴/۶۷-۵/۴۳-۷/۶۹
CO <sub>۲</sub>	۱۰/۰	۱۴/۴	-	-
H <sub>۲</sub> O	۷/۶	۱۲/۷	-	-
CS	۱/۳۸	۳/۸۸	۲۳/۴	-

## ۲-۳- ترکیب مجدد

ترکیب مجدد یون مثبت و الکترون آزاد، در اثر برخورد این دو با یکدیگر امکان‌پذیر خواهد بود که در این حالت، دوباره به یک اتم خنثی تبدیل می‌شوند. در اثر این ترکیب مجدد، انرژی به صورت فوتون‌های نورانی آزاد می‌شود که فرکانس آن  $f$  و برابر است با:

$$h \cdot f = W_i + \Delta W_i$$

در این رابطه،  $W_i$  انرژی یونیزاسیون گاز و  $\Delta W_i$  اختلاف انرژی جنبشی قبل و بعد از برخورد است. در گازهای الکترونگاتیو، الکترون آزاد نیز می‌تواند با یک اتم خنثی ترکیب شود و اتم خنثی به علت داشتن یک الکترون اضافی به یک یون منفی (که ذره‌ای باردار است)، تبدیل شود. این خاصیت فقط در تعدادی از گازها مانند اکسیژن، کلر، فلور و SF<sub>6</sub> وجود دارد که به آن‌ها "گازهای الکترونگاتیو" می‌گویند.

## ۲-۴- انواع یونیزاسیون در گازها

یونیزاسیون در گازها نیاز به شرایطی دارد تا بتواند انرژی لازم را برای یونیزه کردن اتم‌ها و مولکول‌های خنثای گاز را ایجاد کند؛ یعنی انرژی که بتواند الکترون را از مدار گردش خود به دور هسته جدا سازد. این انرژی به وسیله عوامل زیر تأمین می‌شود:

- ۱- برخورد ذرات داخل گاز با یکدیگر و انتقال انرژی جنبشی (یونیزاسیون ضربه‌ای)؛
- ۲- تابش نور (یونیزاسیون نوری)؛
- ۳- حرارت دادن به منظور افزایش انرژی جنبشی ذرات (یونیزاسیون حرارتی)؛
- ۴- صدور الکترون از سطح فلز الکتروود احاطه کننده گاز (یونیزاسیون سطحی).

در ادامه به توضیح در مورد هر یک از روش‌های فوق می‌پردازیم.

## ۲-۴-۱- یونیزاسیون ضربه‌ای

اگر ذره دلخواهی (مانند یون، الکترون و یا مولکول خنثی) با جرمی برابر  $m$  و سرعتی معادل  $V$  در مسیر حرکت خود در میدان الکتریکی داخل گاز، به یک اتم خنثی و یا یک مولکول برخورد کند، ممکن است در نتیجه این برخورد، اتم خنثی یا مولکول، یونیزه شود و به یک الکترون و یک یون مثبت تقسیم گردد. شرط لازم برای این عمل آن است که انرژی جنبشی ذره در حال حرکت  $(\frac{1}{2}mV^2)$ ، از انرژی لازم برای یونیزه کردن گاز مربوط به آن بیشتر باشد. یعنی:

$$\frac{1}{2}mV^2 \geq W_i \quad (3-2)$$

قابل ذکر است که در این میدان الکتریکی، اگر الکترون یا یون آزاد در مسیر خود با اتمی برخورد نکند، مرتباً از میدان، انرژی بیشتری گرفته و با سرعت بیشتری حرکت می‌کند. به عنوان مثال، در صورتی که یک الکترون در میدان الکتریکی با شدت  $30000 \text{ V/cm}$ ، فاصله‌ای به طول  $10^{-3} \text{ cm}$  را بدون برخورد با ذره‌ای طی کند، انرژی دریافتی آن برابر  $30 \text{ eV}$  خواهد بود.

برای محاسبه شرط یونیزاسیون ضربه‌ای، نیاز به یک سلسله محاسبات است. اگر یک الکترون با جرم  $m_e$  با سرعت اولیه  $V_{e0}$  به یک اتم خنثی با جرم  $m$  و ساکن برخورد نماید، سرعت آن پس از برخورد  $V_{e1}$  و سرعت اتم خنثی بعد از برخورد  $V_1$

۱۲.

## ۲-۴-۲- یونیزاسیون نوری

عامل مؤثر دیگر برای ایجاد ذرات با بار الکتریکی، یونیزاسیون نوری می‌باشد؛ بدین معنی که یونیزاسیون به وسیله تأثیر نور با طول موج‌های کوتاه انجام می‌گیرد. امواج نورانی با طول موج‌های کوتاه، دارای انرژی زیادی هستند که می‌توانند بر انرژی یونیزاسیون گازها غلبه کنند. برای آنکه تابش نور بر گاز، به یونیزاسیون آن منجر شود، لازم است تا انرژی نورانی (که طبق قانون پلانک برابر فرکانس نور ( $f$ ) ضرب در عدد ثابت پلانک ( $h$ ) می‌باشد)، بزرگ‌تر از انرژی لازم برای یونیزاسیون گاز ( $W_i$ ) باشد. یعنی،

$$h \cdot f \geq W_i$$

اگر طول موج نور را با  $\lambda$  نشان دهیم، با توجه به رابطه  $\lambda = C/f$  خواهیم داشت:

$$\lambda \leq \frac{C \cdot h}{W_i}$$

در این معادله  $C = 3 \times 10^8$  m/sec سرعت نور است. برای مثال، در مورد بخار سزیم که حداقل انرژی یونیزاسیون  $W_i = 3/88$  eV را در بین سایر گازها دارد، حداکثر طول موج نوری که بتواند آن را یونیزه کند عبارت است از:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \times 6/6 \times 10^{-34}}{3/88 \times 1/6 \times 10^{-19}} = 3/189 \times 10^{-7} \text{ m} = 3189 \text{ \AA}$$

چنین طول موجی در محدوده ماوراء بنفش قرار دارد. برای سایر گازها، به دلیل داشتن انرژی یونیزاسیون بیشتر، طول موج مورد نیاز، کم‌تر از مقدار فوق خواهد بود. بنابراین، نورهای مرئی (که طول موج آنها بین ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ انگستروم  $\text{\AA}$  است)، عملاً قادر به یونیزه کردن این گاز و سایر گازها نیستند. منابع معمولی تولید اشعه ماوراء بنفش (لامپ‌های جیوه، کوارتز و غیره) طول موجشان کم‌تر از ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ انگستروم نیست. بنابراین، این منابع تنها قادر به یونیزه کردن گازهایی هستند که انرژی یونیزاسیون آنها از ۶ تا ۸ الکترون‌ولت تجاوز نکند. اما اغلب گازها دارای انرژی یونیزاسیون بیشتری هستند و بنابراین، به وسیله نور ماوراء بنفش قابل یونیزاسیون نمی‌باشند. اما در عمل، بنابر دلایلی که ذکر می‌شود، یونیزاسیون نوری در اغلب گازها انجام‌پذیر است:

## فصل سوم

### عایق‌های مایع

#### ۳-۱- مقدمه

دانش مربوط به تخلیه الکتریکی در عایق‌های مایع نسبت به عایق‌های گازی و حتی عایق‌های جامد پیشرفت خیلی کم‌تری داشته است. در سال‌های اخیر، مایعات را از برخی جنبه‌ها مورد پژوهش قرار داده‌اند، ولی هنوز یک نظریه جامع قابل قبول برای تخلیه الکتریکی مایعات شناخته نشده است. بنابراین، به دلیل این‌که اطلاعات به دست آمده، متنوع و در برخی موارد با هم متناقض هستند، چنین یافته‌هایی نمی‌توانند منجر به دستیابی یک نتیجه‌گیری کلی قابل قبول برای عایق‌های مایع شوند. عایق‌های مایع در کابل‌ها، خازن‌های فشار قوی، ترانسفورماتورها، کلیدهای قدرت و سرکابل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر آن، کار انتقال حرارت را در ترانسفورماتورها و خاموش کردن قوس الکتریکی در کلیدهای قدرت بر عهده دارند. روغن‌های معدنی و یا خام، معمولی‌ترین استفاده را به عنوان عایق مایع دارند. هیدروکربن‌های مصنوعی و هیدروکربن‌های هالوژن‌دار هم می‌توانند در بعضی از دستگاه‌ها به عنوان عایق مورد استفاده قرار گیرند (مانند روغن‌های سیلیکونی، هیدروکربن‌های فلوئور و ...). بعضی از روغن‌های گیاهی<sup>(۱)</sup> و استرها<sup>(۲)</sup> هم در حد

1- Vegetable Oils

2- Esters

## عایق‌ها و فشار قوی

کم‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌های مهم الکتریکی عایق‌های مایع عبارتند از:

الف) هدایت الکتریکی،

ب) قدرت دی الکتریکی (استقامت الکتریکی)،

ج) عدد عایقی.

هدایت الکتریکی عایق‌ها از  $10^{-16} \frac{1}{\Omega \cdot \text{cm}}$  تا  $10^{-13} \frac{1}{\Omega \cdot \text{cm}}$  تغییر می‌کند و قدرت عایقی در حدود  $30 \text{ kV/cm}$  تا  $50 \text{ kV/cm}$  و عدد عایقی تقریباً  $2/2$  تا  $5$  است. دیگر ویژگی‌های مهم فیزیکی عبارتند از: چسبندگی و استحکام گرمایی. علاوه بر این خصوصیات، غیر اشتعال بودن و گرمای نهان تبخیر برای افت گرمایی نیز، در نظر گرفته می‌شود.

عایق‌های مایع مانند عایق‌های گازی می‌توانند به راحتی جاری شوند و فضاهای خالی کوچک را به راحتی پر کنند. همچنین در صورت بروز شکست الکتریکی در عایق‌های مایع، مجدداً با کاهش میدان الکتریکی، خاصیت عایقی خود را به دست می‌آورند.

اصولاً تاکنون دو دسته نظریه در مورد تخلیه الکتریکی عایق‌های مایع ارائه شده است. یک دسته نظریه‌هایی است که شکست الکتریکی عایق‌های مایع را بر اساس همان مدل شکست الکتریکی گازها، یعنی یونیزاسیون اتم‌ها بر مبنای برخورد الکترون‌ها به آن‌ها در یک میدان الکتریکی (نظریه شکست الکترونی)، بیان می‌کنند. طبق این نظریه، الکترون از سطح کاتد در اثر اعمال میدان الکتریکی یا در اثر حرارت، آزاد می‌شود. این نوع نحوه شکست، فقط وقتی قابل قبول است که مایع کاملاً خالص باشد؛ ولی عملاً چون عایق‌های مایع دارای مقدار زیادی ناخالصی می‌باشند، از این‌رو، ولتاژ شکست مایعات به دلیل وجود ذرات ناخالصی در آن، خیلی کم‌تر از ولتاژ شکست یک عایق مایع خالص می‌باشد. دسته دوم نظریه‌های تخلیه الکتریکی عایق‌های مایع، شکست الکتریکی مایعات را بر اساس همین ناخالصی‌ها توجیه می‌کنند. این ذرات ناخالص شامل حباب‌های گازی، قطرات مایع دیگر (نظیر قطرات



آب) و ذرات جامد غوطه‌ور در عایق مایع هستند که ولتاژ شکست عایق را پایین می‌آورند. تنها عایق مایعی که به‌طور وسیع مورد مطالعه و استفاده قرار می‌گیرد، روغن‌های عایقی هستند که در صورت خالص بودن کامل، استقامت الکتریکی آنها بیش از  $1\text{ MV/cm}$  خواهد بود. عمده‌ترین خواص الکتریکی که تعیین‌کننده یک مایع به‌عنوان عایق است، عبارتند از: استقامت الکتریکی بالا، ظرفیت الکتریکی بالا، ضریب تلفات عایقی کوچک و مقاومت مخصوص بالا.

روغنی که از تصفیه نفت خام به‌دست می‌آید، مخلوطی از هیدروکربون‌های مختلف است و نفوذپذیری الکتریکی نسبی آنها بین ۲ تا ۲٫۵ است. همچنین مقاومت مخصوص عایق‌های مایع باید بزرگ‌تر از  $10^9 \Omega \cdot \text{m}$  باشد. با این تعریف، آب مقطر هم یک عایق مایع است؛ ولی این مایع را در سیستم‌های فشار قوی نمی‌توان استفاده نمود و در این سیستم‌ها باید از عایق‌های روغن با مقاومت مخصوص بیشتر از  $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$  بهره جست.

### ۳-۲- عایق‌های مایع خالص و تجاری

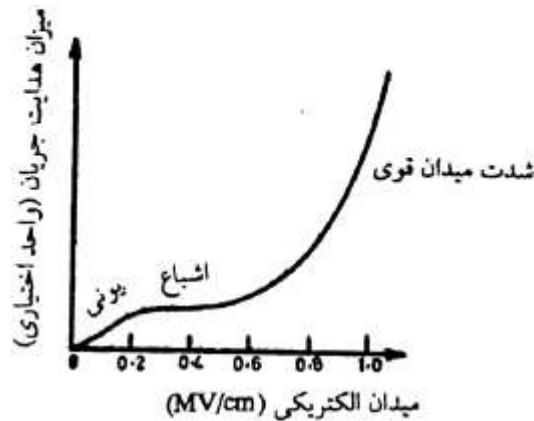
عایق‌های مایع بسته به درجه خلوص آنها، به دو دسته عایق‌های مایع خالص و تجاری تقسیم می‌شوند. روغن‌های خالص دارای درجه خلوص شیمیایی هستند. نسبت ناخالصی آنها کم‌تر از ۱ در  $10^9$  است و دارای ساختمان ساده‌ای می‌باشند. n-هگزان ( $C_6H_{14}$ ) و n-هپتان ( $C_7H_{16}$ ) و هیدروکربن‌های پارافین را می‌توان از این دسته نام برد. بررسی جداگانه عوامل مؤثر بر هدایت و شکست الکتریکی مایعات با استفاده از عایق‌های مایع ساده و خالص آسان‌تر است. از طرف دیگر، عایق‌های مایع تجاری مانند روغن‌ها، از نظر شیمیایی خالص نیستند و از مخلوطی از مولکول‌های ارگانیک پیچیده (که مشخص کردن یا تولید مجدد آنها با آزمایش‌های ساده امکان‌پذیر نیست)، تشکیل می‌شوند. حداکثر ولتاژ شکست چند مایع خالص در جدول (۳-۱) آمده است. عایق مایع الکتریکی به لحاظ داشتن خواص الکتریکی مورد نیاز، از نوع عایق تجاری است و از ترکیب روغن حاصل از نفت با مواد افزودنی مخصوص به‌دست می‌آید.

جدول (۳-۱): ولتاژ شکست چند عایق مایع خالص

نوع مایع	قدرت شکست حداکثر در چند عایق (MV/cm)
هگزان	۱/۱ - ۱/۳
بنزن	۱/۱
روغن ترانسفورماتور	۱/۰
سیلیکون	۱/۰ - ۱/۲
اکسیژن مایع	۲/۴
نیتروژن مایع	۱/۶ - ۱/۹
هیدروژن مایع	۱/۰
هلیوم مایع	۰/۷
آرگون مایع	۱/۱۰ - ۱/۴۲

### ۳-۳- نظریه شکست الکترونی

وقتی الکترونی به درون مایع تزریق می‌شود، از میدان الکتریکی اعمالی انرژی می‌گیرد. در نظریه شکست الکترونی، این‌گونه فرض می‌شود که برخی الکترون‌ها، میزان انرژی دریافتی از میدانشان، بیشتر از انرژی است که در برخورد با مولکول‌ها از دست می‌دهند. اصولاً این نوع مکانیزم شکست برای مایع‌های خالص قابل توجیه است؛ اما برای عایق‌های مایع تجاری، قابل استفاده نیست. مطالعات هدایت در مایعات با درجه خلوص بالا نشان می‌دهد که در میدان‌های ضعیف، هدایت الکتریکی، بیشتر از نوع یونی و به صورت جابه‌جایی ناخالصی‌ها است که با افزایش شدت میدان، به‌طور خطی افزایش می‌یابد. با افزایش میدان، این جریان هدایتی به اشباع می‌رسد. در میدان‌های قوی که به شکست الکتریکی می‌انجامد، میزان هدایت سریع‌تر افزایش می‌یابد که تمایل به ناپایداری دارد. اعتقاد بر این است که این افزایش جریان ناشی از کل انتشار الکترون در کاتد (توسط یک یا هر دو مکانیزم فوق یعنی انتشار حرارتی و انتشار بر اثر شدت میدان قوی) است. شکل (۳-۱) سه مرحله مختلف هدایت عایق‌های مایع را در میدان الکتریکی نشان می‌دهد.



شکل (۱-۳): مراحل مختلف هدایت عایق‌های مایع

در میدان‌های خیلی ضعیف، جریان از جابه‌جایی یون‌ها ایجاد می‌شود. در میدان‌های متوسط، این جریان به اشباع می‌رسد. در میدان‌های قوی، جریان مذکور بر اثر انتشار الکترون‌ها از کاتد و انجام فرآیندی شبیه به یونیزاسیون اولیه و ثانویه تانژند تا اندازه‌ای افزایش می‌یابد تا به شکست عایق بیانجامد. ولتاژ شکست به شدت میدان، فاصله الکترودها، جنس کاتد و درجه حرارت کاتد بستگی دارد. به علاوه لزجی، درجه حرارت، چگالی و ساختار مولکولی عایق مایع هم در ولتاژ شکست آن مؤثر است.

به‌طور کلی در عایق‌های مایع، شکست الکتریکی ناشی از انتشار الکترون توسط کاتد را (خواه بر اثر میدان قوی و یا بر اثر حرارت)، "شکست الکترونی" می‌گویند. شرط لازم برای تشکیل بهمن الکترونی این است که انرژی که یک الکترون در طی میانگین فاصله آزاد به‌دست می‌آورد، با انرژی لازم برای یونیزاسیون مولکول عایق مایع مساوی و یا بزرگ‌تر از آن باشد. یعنی:

$$eE\lambda \geq W \quad (1-3)$$

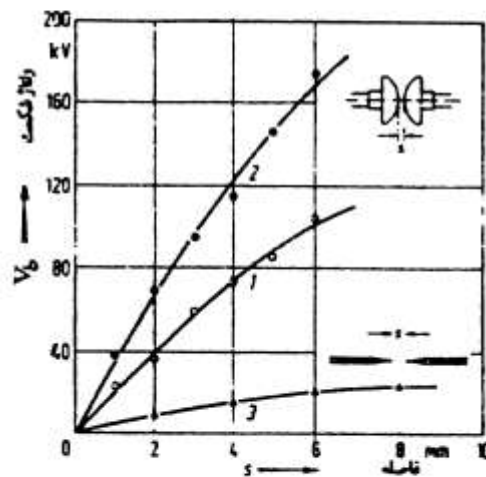
در این رابطه،  $E$  شدت میدان الکتریکی اعمال شده،  $\lambda$  میانگین طول فاصله آزاد،  $e$  بار الکتریکی یک الکترون و  $W$  انرژی لازم برای یونیزه شدن مولکول است.

### ۷-۳- عوامل مؤثر بر ولتاژ شکست عایق مایع

وجود ناخالصی‌ها، منشأ شکست الکتریکی در عایق‌های مایع مورد استفاده در تجهیزات الکتریکی هستند. علاوه بر وجود رطوبت، گازهای حل شده و حل نشده در عایق مایع، و ذرات جامد معلق در آن نیز، باعث کاهش استقامت الکتریکی عایق‌های مایع می‌گردند. عوامل متعددی بر مقدار ولتاژ شکست عایق‌های مایع مؤثرند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(۱) جنس الکترودها: جنس الکترودها و میزان ناهمواری سطح آن‌ها در ولتاژ شکست مؤثرند. جنس الکترودها در انتشار الکترون از سطح کاتد مؤثر است و ناهمواری سطح آن نیز، در زیاد شدن دانسیته جریان در نقاط نوک تیز و ایجاد حباب‌های گازی در اثر بخار شدن مایع اطراف آن مؤثر هستند.

(۲) شکل الکترودها: با ثابت بودن سایر عوامل، ولتاژ شکست عایق مایع به شکل الکترودها بستگی دارد (شکل ۳-۶ را ببینید). مثلاً ولتاژ شکست عایق مایع برای الکترودهای کروی شکل، بیشتر از الکترودهای میله‌ای نوک تیز است. هرچه میدان غیریکنواخت‌تر باشد، ولتاژ شکست عایق مایع کم‌تر می‌شود؛ زیرا اطراف نقاط



شکل (۳-۶): ولتاژ شکست برای الکترودهای مختلف

## عایق‌ها و فشار قوی

میدان قوی، مایع گرم شده و تجزیه گشته و تولید گاز می‌کند.

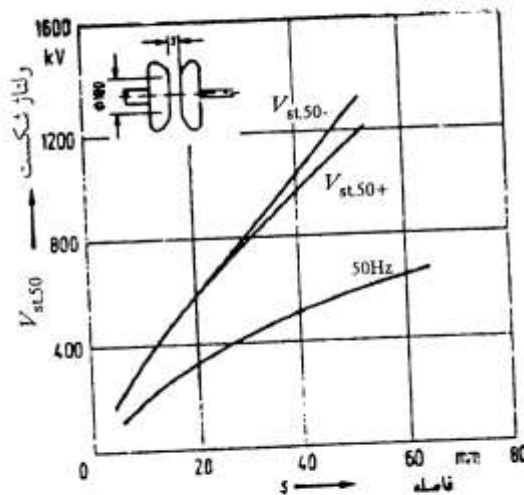
(۳) فاصله بین الکترودها: با زیاد کردن فاصله بین الکترودها ولتاژ شکست به همان نسبت زیادتر نمی‌شود؛ بلکه ولتاژ شکست عایق مایع کم‌تر از مقدار مورد نظر است. این موضوع در رابطه تجربی زیر مشخص می‌شود:

$$V_s = A \cdot d^n \quad (۸-۳)$$

که در این رابطه،  $d$  فاصله الکترودها،  $A$  عدد ثابت و  $n$  عدد ثابت و کوچک‌تر از یک است. پارامترهای  $A$  و  $n$  به شکل الکترودها و جنس آن بستگی دارند.

(۴) شکل ولتاژ اعمالی به عایق: بسته به شکل ولتاژ اعمالی که آیا ولتاژ دائم یا متناوب یا ضربه‌ای باشد، ولتاژ شکست عایق متفاوت است. در شکل (۳-۷)، ولتاژ شکست روغن بین الکترودهای صفحه - صفحه برای ولتاژ متناوب  $50\text{Hz}$  و ولتاژ ضربه مثبت و منفی با شکل موج  $1/2/50$  میکروثانیه نشان داده شده است. در این شکل،  $V_{st.50}$  دامنه ولتاژ شکست با احتمال  $50\%$  می‌باشد.

به طور کلی ولتاژ شکست عایق مایع، به مدت زمان اعمال ولتاژ بستگی دارد. اگر



شکل (۳-۷): ولتاژ شکست با اعمال ولتاژهای مختلف

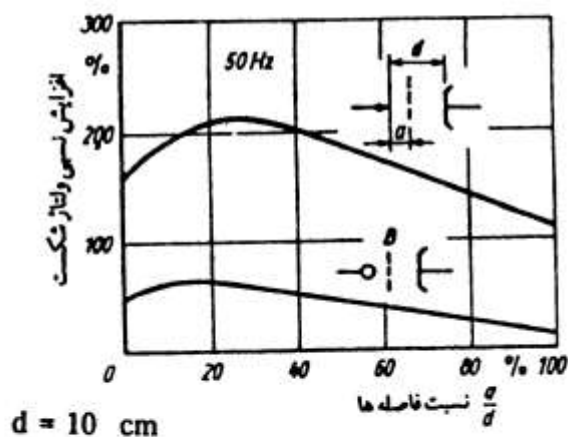
مدت زمان اعمال ولتاژ، کوتاه مدّت باشد، استقامت الکتریکی آن بالاتر خواهد بود. بنابراین، ولتاژ شکست عایق مایع برای ولتاژهای ضربه‌ای، بیشتر از ولتاژهای متناوب با فرکانس صنعتی است. در حالت ولتاژ ضربه‌ای، زمان پیشانی و زمان نیم‌پشت موج در ولتاژ شکست عایق مؤثر است. هر چه زمان نیم‌پشت موج بیشتر باشد، ولتاژ شکست مایع کم‌تر است. در مورد ولتاژهای ضربه‌ای با زمان خیلی کم، فرصتی برای به‌وجود آمدن پلی از ذرات معلق ایجاد نمی‌شود.

(۵) سرعت افزایش ولتاژ: اگر ولتاژ را سریعاً بالا ببریم، در ولتاژ بالاتری، شکست الکتریکی واقع می‌شود؛ ولی اگر افزایش ولتاژ به تدریج، آهسته و با سرعت کم صورت گیرد، شکست عایق مایع در ولتاژ کم‌تری اتفاق می‌افتد. دلیل آن هم فرصت یافتن ذرات الیاف داخل روغن برای ساختن پل بین الکترودها و پلاریزاسیون است.

(۶) درجه حرارت روغن: هر چه درجه حرارت روغن زیادتر شود، رطوبت آن کم‌تر می‌گردد و ولتاژ شکست آن بالاتر می‌رود. با افزایش درجه حرارت، میزان آب قابل حل در روغن بیشتر می‌شود و از این رو، استقامت الکتریکی آن افزایش می‌یابد (این موضوع در شکل ۳-۶ در مقایسه منحنی‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است). البته افزایش بیش از حدّ درجه حرارت، موجب اکسیداسیون روغن و کاهش استقامت الکتریکی آن می‌شود.

(۷) پوشاندن الکترودها در کاغذ: اگر دو الکتروود در بردارنده عایق مایع را در پوشش عایق‌های جامد کاغذی قرار دهیم، پل‌های تشکیل شده از ذرات معلق داخل مایع، به الکترودها نمی‌رسند. از طرفی چون عدد دی الکتریک کاغذ بیشتر است، از شدت میدان الکتریکی اطراف الکترودها کاسته می‌شود. در این حالت، پوشاندن الکترودهایی که در ناحیه شدت میدان قوی‌تر هستند (مانند نوک تیز با شعاع خمش کم‌تر)، با کاغذ از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ این کار باعث بالا رفتن ولتاژ شکست عایق مایع خواهد شد. هر چه ضخامت کاغذ بیشتر باشد، ولتاژ شکست بالاتر می‌رود.

۸) استفاده از ورقه کاغذ نازک بین الکترودها: اگر بین دو الکتروود در بردارنده عایق مایع، ورقه‌های کاغذی قرار دهیم و به این ترتیب فاصله بین دو الکتروود را به چند قسمت کوچک‌تر تقسیم کنیم، استقامت الکتریکی افزایش یافته و ولتاژ شکست افزایش می‌یابد. وجود این ورقه، مانع از تشکیل سریع پل‌های ناشی از ذرات معلق می‌شود. برای افزایش استقامت الکتریکی روغن در ولتاژهای بالا در تجهیزات الکتریکی فشار قوی، معمولاً از چندین ورقه کاغذی بین الکتروودها استفاده می‌شود. این ورقه‌های کاغذ باید روی سطوح هم‌پتانسیل قرار گیرند تا استقامت الکتریکی روغن را خیلی زیاد بالا برند. شکل (۳-۸) نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری درصد افزایش ولتاژ شکست را، در اثر قرار دادن یک ورقه کاغذ در عایق مایع نشان می‌دهد. نتایج این شکل، در حالتی است که عایق مایع، بین دو الکتروود میله‌نوک تیز-صفحه یا دو الکتروود کره-صفحه (در حالتی که ورقه مذکور به فاصله  $a$  از الکتروود میله‌نوک تیز یا الکتروود کره قرار دارد)، قرار گرفته باشد. از این شکل معلوم می‌شود که در یک مقدار معین از نسبت  $\frac{a}{d}$  لایه کاغذ، بیشترین اثر را در افزایش ولتاژ شکست عایق مایع دارد. این حالت وقتی است که صفحه، انطباق نزدیکتری با سطوح هم‌پتانسیل میدان الکتریکی دارد.



شکل (۳-۸): درصد افزایش ولتاژ شکست، در اثر قرار گرفتن ورقه کاغذی در عایق

به‌طور کلی، ترکیب عایق‌های مایع با لایه‌های کاغذ، موجب افزایش استقامت الکتریکی عایق‌های مایع می‌گردد. از نظر اقتصادی نیز ترکیب عایق‌های مایع با لایه‌های کاغذی مناسب‌تر از استفاده از هر یک از عایق‌های مایع یا کاغذ به‌تنهایی است. گرچه استقامت الکتریکی کاغذ، بیشتر از عایق مایع است، ولی استفاده از آن به‌تنهایی مقرون به صرفه نیست؛ مگر آن‌که فضای عایق‌کاری کم باشد. مهم‌ترین نمونه‌های موارد کاربرد ترکیب عایق مایع روغن، با لایه‌های کاغذ در کابل‌های روغنی، پوشینگ‌ها (مقره‌های عبوری) و حتی در داخل ترانسفورماتورها است.

۹) حجم عایق: آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهند که با افزایش حجم عایق مایع، استقامت الکتریکی کاهش می‌یابد.

### ۳-۸- خواص لازم برای روغن ترانسفورماتورها

بیشترین کاربرد روغن، در ترانسفورماتورهای قدرت است. روغن در این حالت، هم به‌عنوان عایق (همراه با کاغذ) برای ایزولاسیون استفاده می‌شود و هم با حرکت روغن در داخل ترانسفورماتور، عمل انتقال حرارت (ناشی از تلفات مسی و آهنی سیم‌پیچ‌ها و هسته) را به‌عهده دارد. بنابراین، روغن ترانسفورماتور باید:

۱- استقامت الکتریکی بالایی داشته باشد.

۲- ضریب تلفات عایقی آن کم و مقاومت مخصوص آن زیاد باشد.

۳- ویسکوزیته<sup>(۱)</sup> آن کم باشد: برای اینکه روغن بتواند به‌راحتی حرکت کند و در لابلای سیم‌پیچ‌ها و مسیر رادیاتورها به‌گردش درآید و عمل انتقال حرارت را به‌راحتی انجام دهد، لازم است غلظت روغن کم باشد. به‌عبارت دیگر، چسبندگی آن کم باشد.

۴- نقطه اشتعال آن بالا باشد. برای جلوگیری از آتش‌سوزی روغن در درجه حرارت‌های بالا، باید نقطه اشتعال روغن بالا باشد. در این رابطه، نوعی از روغن‌های

1- Viscosity



## عایق‌ها و فشار قوی

نسوز ساخته شده که در آن‌ها ماده کالر وجود دارد و به نام "روغن‌های آسکارل"<sup>(۱)</sup> معروف است. امروزه معلوم شده است که این دسته از روغن‌های مصنوعی، سمی و سرطان‌زا هستند و استفاده از آن‌ها در کلیه تجهیزات ممنوع شده است. به همین علت، امروزه روغنی به نام "میدل"<sup>(۲)</sup> ساخته شده است که کیفیت مطلوبی دارد.

۵- داشتن حالت سیالی در درجه حرارت‌های پایین (نقطه ریزش<sup>(۳)</sup> در دماهای خیلی پایین باشد): روغن باید حالت روانی و سیال خود را در درجه حرارت‌های پایین حفظ کند. یعنی باید نقطه انجماد آن خیلی پایین باشد؛ در غیر این صورت در درجه حرارت‌های پایین دچار ماسیدگی شده و مسیر لوله‌های رادیاتور را می‌بندد و عمل انتقال حرارت با مشکل مواجه می‌شود. این مسئله برای ترانسفورماتورهایی که در مناطق سردسیر قرار دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۶- تولید اسید و لجن آن خیلی کم باشد: عایق روغن در درجه حرارت بالا در یک پروسه شیمیایی (اکسیداسیون روغن)، به تدریج رنگ آن کدر می‌شود و تولید اسید و لجن می‌کند. این لجن‌ها و اسیدهای تولید شده، روی عایق‌های کاغذی قرار گرفته و موجب کاهش قدرت عایقی آن‌ها می‌شود. همچنین لجن‌های نشسته روی هسته ترانسفورماتور و در مسیر رادیاتورها، کار انتقال حرارت را با مشکل مواجه می‌سازد که به تدریج ممکن است موجب پیری زودرس روغن شود. برای روغن‌های تازه، طبق استاندارد، عدد اسیدی نباید بیش از ۳ درصد و رسوبات و لجن‌ها نباید بیش از ۵ درصد باشد. وجود رطوبت نه تنها موجب کاهش استقامت الکتریکی روغن می‌شود، بلکه باعث اکسیداسیون بیشتر روغن و تولید اسید در آن می‌شود. وجود اسیدها باعث کاهش مقاومت الکتریکی روغن و افزایش تلفات دی‌الکتریک آن می‌شود. در ضمن باید اندازه‌گیری درجه اسیدی روغن، بعد از هر چند وقت یک بار انجام شود تا در صورت نیاز، روغن تعویض شود.

شکل ظاهری روغن ترانسفورماتورها باید صاف، شفاف و بدون مواد معلق یا

1- Askarel

2- Middle

3- Pour Point

مواد ته‌نشین شده (رسوب) باشد. وزن مخصوص روغن در درجه حرارت  $20^{\circ}\text{C}$  نباید از  $0.985\text{gr/cm}^3$  بیشتر باشد. همچنین نباید غلظت آن در  $20^{\circ}\text{C}$  برای روغن‌های درجه یک و دو، به ترتیب از ۴۰ و ۲۵ سانتی‌استوک  $\text{cs}^+$  بیشتر باشد. همچنین حداقل نقطه اشتعال روغن‌های درجه یک،  $140^{\circ}\text{C}$  و روغن‌های درجه دو،  $130^{\circ}\text{C}$  است. نقطه انجماد (ریزش) روغن‌های درجه یک،  $3^{\circ}\text{C}$ - و روغن‌های درجه دو،  $45^{\circ}\text{C}$ - است. این روغن‌ها نباید حاوی سولفورهای مخرب باشند. به علاوه در درجه حرارت  $90^{\circ}\text{C}$ ، ضریب تلفات عایقی روغن تصفیه شده خشک تحت شدت میدان  $50.0\text{kV/mm}$  تا  $100.0\text{kV/mm}$ ، نباید از  $0.005$  بیشتر باشد.

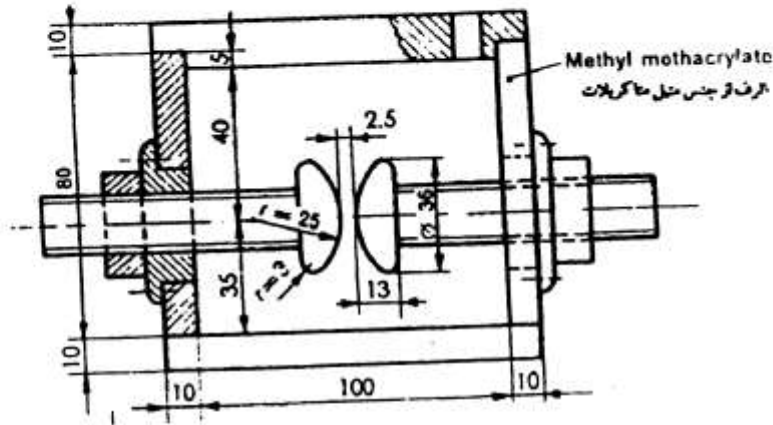
### ۳-۹- آزمایش روغن ترانسفورماتورها

برای جلوگیری به موقع از بروز خطرات و عیب‌های بزرگ در ترانسفورماتورها، باید هر سال از روغن ترانسفورماتورها نمونه‌گیری شود. با اندازه‌گیری بعضی از مشخصات مهم روغن، به وسیله آزمایش‌های استاندارد شده در مورد ادامه کار بیشتر روغن، یا به تعمیر ترانسفورماتور و یا تصفیه روغن تصمیم گرفته می‌شود. مهم‌ترین این آزمایش‌ها عبارتند از:

#### ۱- تعیین ولتاژ شکست روغن

روغن نمونه برداری شده، در ظرف شیشه‌ای دستگاه مخصوص تعیین ولتاژ شکست روغن، ریخته می‌شود. این دستگاه، طبق استاندارد دارای دو الکترود قارچی شکل از جنس مس با شعاع خمش  $25\text{mm}$  است که به فاصله  $2/5\text{mm}$  از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این دو الکترود، به یک منبع ولتاژ متغیر متناوب با فرکانس صنعتی متصل شده‌اند. روغن نمونه باید به اندازه‌ای باشد که حداقل  $10\text{mm}$  از سطح الکترودها، از روغن پر شده باشد. محفظه روغن این دستگاه در شکل (۳-۹) نشان داده شده است.

در این آزمایش، ولتاژ منبع با سرعت  $2\text{kV/sec}$  به وسیله یک موتور به طور یکنواخت افزایش داده می‌شود تا این‌که جرقه، بین دو الکترود زده شود. به محض



شکل (۳-۹): مخزن آزمایش روغن

وقوع جرقه بین دو الکتروود و برقراری جریان، رله اضافه جریان، منبع ولتاژ را سریعاً جدا می‌کند و به وسیله ولت‌متر دستگاه، حداکثر ولتاژی که در آن جرقه زده شده است، اندازه‌گیری می‌شود. قبل از انجام آزمایش، باید روغن به وسیله یک هم‌زن مخلوط شود تا به صورت همگن در آید. این کار به وسیله هم‌زن دستگاه خودکار انجام می‌شود. سپس روغن باید برای مدتی آرام گیرد تا دوباره آزمایش تکرار گردد. این آزمایش، شش بار تکرار می‌شود و مقدار متوسط پنج آزمایش آخر، به عنوان ولتاژ شکست روغن تعیین می‌شود. بین هر دو آزمایش باید مدت زمانی تأخیر داده شود تا آثار جرقه از بین برود. لوله نمونه‌برداری روغن باید کاملاً خشک و عاری از رطوبت باشد. ولتاژ شکست روغن نباید از مقدار حداقل مجاز آن کم‌تر باشد (قبل از تصفیه، حداقل ۳۰kV و بعد از تصفیه، حداقل ۵۰kV). نمونه روغن باید در حد امکان از کف ظرف ترانسفورماتور برداشته شود. در مورد کلیدهای قدرت نیز این آزمایش انجام می‌شود. فاصله الکتروودها از دیواره ظرف، حداقل ۱۵mm و از سطح روغن حداقل ۱۰mm می‌باشد.

## ۲- آنالیز گازهای حل شده در روغن

گازهای حل شده در روغن (از روغن نمونه) به وسیله خلاء جدا سازی شده و با

استفاده از دستگاه مخصوص گاز کروماتوگرافی<sup>(۱۱)</sup> درصد هر یک از اجزای آن تعیین می‌شود. بر حسب درصد گازهای موجود می‌توان به وجود تخلیه الکتریکی جزئی در ترانسفورماتور یا معایب دیگر در آن (که ممکن است در آینده خطر عمده‌ای را به وجود آورند) پی برد. این گازها از قبیل اتان، متان، منواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، استیلن و اتیلن می‌باشد که درصد و ترکیب آن‌ها در روغن، تعیین کننده نوع و محل وقوع خطای جزئی در داخل یک دستگاه است که می‌تواند برای تعمیر محل مورد نظر به ماکمک نماید.

۳- اندازه‌گیری درجه اسیدی روغن با استفاده از معرف‌های شیمیایی

۴- اندازه‌گیری میزان رطوبت روغن

۵- بررسی رنگ ظاهری روغن (از نظر کدر بودن یا شفاف بودن)

۶- اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی  $\tan \delta$  (دستورالعمل IEC 60250)

۷- اندازه‌گیری مقاومت مخصوص

۸- اندازه‌گیری عدد عایقی

۹- اندازه‌گیری نقطه اشتعال (دستورالعمل ASTM D93-66)

۱۰- اندازه‌گیری نقطه انجماد (دستورالعمل ASTM D97-66)

### ۳-۱۰- تصفیه روغن ترانسفورماتور

پس از آن‌که روغن مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، بر حسب نوع روغن و شرایط سرویس، تغییراتی در آن مشاهده می‌شود که موجب تقلیل کیفیت و کاهش عمر مفید آن می‌شود. این تغییرات به سبب ورود ناخالصی‌ها و آلودگی به روغن و یا تغییرات شیمیایی ناشی از اکسیداسیون می‌باشد. در اثر اکسیداسیون روغن، ویسکوزیته آن افزایش یافته، اسیدیته آن بالا رفته، رنگ روغن کدر و تیره می‌شود. اگر نتایج

1- Gas Chromatography

آزمایش‌های روغن که در قسمت قبل اشاره شد، نیاز به تصفیه روغن را اثبات نماید، باید به منظور جداسازی ناخالصی‌ها و احیای خواص اصلی مورد نیاز روغن، در مورد تصفیه آن اقدام نمود.

روش‌های مختلفی برای تصفیه روغن وجود دارد. این روش‌ها به دو دسته عمده تصفیه فیزیکی و تصفیه شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های تصفیه فیزیکی با روش‌های فیزیکی نظیر عبور روغن از صافی‌ها یا گرم کردن روغن و غیره، ناخالصی‌های روغن را از آن جدا می‌کنند. در روش‌های تصفیه شیمیایی با افزودن مواد شیمیایی و ترکیب شیمیایی آن‌ها با روغن، خواص از دست رفته روغن مجدداً احیا می‌شود.

### ۳-۱۰-۱- روش‌های تصفیه فیزیکی

در این قسمت به چهار روش تصفیه فیزیکی روغن اشاره می‌شود:

۱- تصفیه از آب: ساده‌ترین روش جداسازی آب از روغن این است که روغن را در ظرف بزرگی می‌ریزند و در ته ظرف، دریچه‌ای تعبیه می‌کنند. پس از مدتی که روغن در ظرف بماند، چون آب سنگین‌تر از روغن است، در ته ظرف جمع می‌شود و می‌توان با باز کردن دریچه، آب را تخلیه نمود. این روش نیاز به وقت زیادی دارد و دقت آن نیز کم است؛ زیرا اگر دریچه زود بسته شود آب همچنان در روغن باقی خواهد ماند و اگر دریچه کمی دیر بسته شود، مقداری از روغن به هدر می‌رود.

روش دیگر برای این کار، حرارت دادن روغن است؛ زیرا درجه حرارت تبخیر آب پایین‌تر از روغن است و در صورت حرارت دادن روغن، آب به صورت بخار از روغن خارج می‌شود. حرارت دادن معمولاً در یک ظرف بسته و در خلاء انجام می‌گیرد تا سرعت عمل آن بیشتر شود. از پمپ‌های خلاء نیز برای گرفتن رطوبت روغن استفاده می‌شود.

۲- روش گریز از مرکز برای جداسازی ناخالصی‌های جامد: در این روش، روغن را در ظرف دوار بزرگی می‌ریزند و پس از حرارت دادن تا حد دمای ۱۵ الی ۲۵ درجه سانتیگراد، آن را به گردش در می‌آورند. جرم ناخالصی‌های جامد داخل

روغن معمولاً از جرم روغن بیشتر است؛ از این رو، در عمل گردش روغن، ناخالصی‌های جامد در اطراف جداره و خارجی ظرف قرار گرفته و ته‌نشین می‌شوند و روغن خالص در وسط ظرف می‌ماند. این روش از نظر سرعت عمل و نحوه تصفیه مناسب است.

۳- استفاده از فیلترهای کاغذی: با عبور روغن از فیلترهای کاغذی، ذرات جامد غوطه‌ور در روغن نمی‌توانند از این فیلترها عبور کنند. همچنین آب موجود در روغن نیز، مقداری از آن توسط این فیلترها جذب می‌شوند. هر چه منافذ این فیلترها ریزتر باشد، کیفیت تصفیه بهتر است. برای سرعت عمل در این روش، معمولاً روغن را با فشار وارد فیلترها می‌کنند.

#### ۴- گاز زدایی برای جدا کردن گازهای محلول در روغن

با استفاده از تکنیک خلاء، عمل گاززدایی روغن و جدا کردن گازهای حل شده در روغن انجام می‌گیرد. با پودر کردن روغن و پاشیدن آن به داخل محفظه خلاء، علاوه بر گرفتن تمام آب غیر محلول در روغن، مقدار آب محلول در آن نیز به حد ۱۰ppm کاهش می‌یابد. همچنین با این عمل، گازهای حل شده در روغن نیز به ۰/۲۵ درصد حجم، تقلیل می‌یابد.

#### ۳-۱۰-۲- روش‌های تصفیه شیمیایی

زمانی که با افزایش میزان اکسیداسیون در روغن، شرایط تشکیل لجن در آن فراهم می‌گردد، عمل تصفیه فیزیکی به‌تنهایی قادر به جبران و احیای فساد روغن نبوده و از این رو، تصفیه شیمیایی روغن انجام می‌گیرد. در تصفیه شیمیایی، از فیلترهای فعال (اکتیو) استفاده شده و با استفاده از عملیات مختلف، نظیر تصفیه با حلال‌ها و تصفیه با اسید سولفوریک، پالایش انجام می‌گیرد. تصفیه شیمیایی معمولاً با هزینه زیادی انجام می‌شود؛ از این رو، فقط برای مصرف‌کننده‌های بزرگ، کارخانه‌های ترانسفورماتورسازی و مراکز بزرگ تعمیر ترانسفورماتورها مقرون به‌صرفه می‌باشد.

عبور روغن از خاک رنگبر<sup>(۱۱)</sup>، یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها در تصفیه شیمیایی است. در این روش، خاک رنگبر در یک منبع قرار می‌گیرد و روغن گرم توسط پمپ، با فشار زیاد از این خاک عبور داده می‌شود. با انجام این عمل، عدد اسیدی روغن کاهش یافته و به حد مجاز خود می‌رسد. به علاوه دیگر خواص روغن، از قبیل ضریب تلفات عایقی و مقاومت مخصوص آن نیز بهبود می‌یابد. مقدار خاک رنگبر مورد نیاز، به میزان کهنگی روغن بستگی دارد و معمولاً بین یک تا هفت درصد وزن روغن می‌باشد. اضافه کردن مواد ضد اکسیداسیون در هنگام تصفیه فیزیکی در موقع گردش روغن نیز، یکی دیگر از روش‌های تصفیه شیمیایی است.

## فصل چهارم

### عایق‌های جامد

#### ۴-۱- مقدمه

عایق‌های جامد بخش عمده‌ای از عایق‌های تأسیسات و تجهیزات الکتریکی را تشکیل می‌دهند؛ زیرا استقامت مکانیکی آنها معمولاً زیاد است و دارای خاصیت عایقی خوبی نیز هستند. از جمله مهمترین مواد عایق جامد مورد استفاده در صنعت برق را می‌توان به کاغذ، مقوای فشرده، چوب (فیبر)، میکا، شیشه، سرامیک‌ها، لاستیک و پلی‌مرهای مصنوعی از جمله پلی‌اتیلن، پلی‌استر و پلی‌ونیل کلراید (PVC<sup>۱</sup>) اشاره نمود.

از نظر شکست عایقی، عایق‌های جامد با عایق‌های مایع و گاز خیلی متفاوت می‌باشند؛ زیرا عایق‌های جامد پس از وقوع تخلیه الکتریکی در آنها (بر خلاف گازها و مایعات) دیگر قابل استفاده به‌عنوان عایق نخواهند بود. البته 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 جرقه در آنها سوراخ شده و یک کانال کربنیزه شده (هادی) در آنها به‌وجود می‌آید و خاصیت عایقی خود را از دست می‌دهند.

در شرایط معمولی، جریان الکتریکی در عایق‌های جامد به‌علت آن‌که الکترون‌های آزاد بسیار کمی (کم‌تر از گازها و مایعات) در آنها وجود دارد، بسیار

1- Poly Vinyl Chloride



## عایق‌ها و فشار قوی

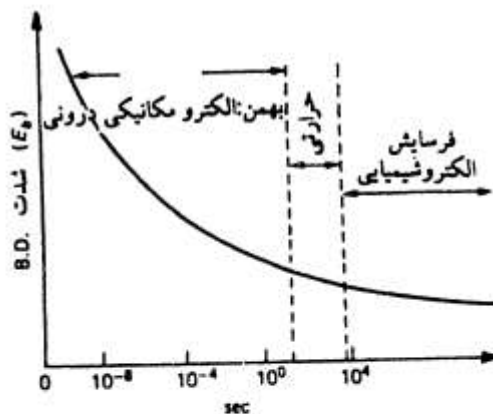
اندک است. معمولاً مقاومت اهمی عایق‌های جامد به قدری زیاد است که در هنگام اعمال ولتاژ به آن، جریان رسانایی عایق جامد در اثر الکترون‌های آزاد ناچیز است. به علاوه، پلاریزاسیون در عایق‌های جامد نیز، می‌تواند باعث ایجاد جریان شود (قطب‌بندی بارهای الکتریکی مثبت و منفی هر اتم تحت تأثیر میدان الکتریکی). همچنین حضور ناخالصی‌ها در عایق‌های جامد، الکترون‌های آزاد آن را افزایش داده و باعث افزایش جریان رسانایی عایق‌های جامد می‌شود.

تاکنون مکانیزم‌های مختلفی برای شکست الکتریکی عایق‌های جامد ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

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

در صورتی که ولتاژ لازم برای هر یک از این مکانیزم‌های شکست را بر حسب زمان رسم کنیم، شکل (۱-۴) به دست می‌آید.

در طراحی عایق‌ها باید به تمام عواملی که منجر به یکی از این شکست‌ها می‌شوند توجه شود، تا هیچ یک از آن‌ها به وجود نیاید. به عبارت دیگر، ولتاژ اعمالی



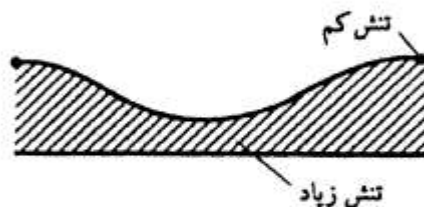
شکل (۱-۴): تغییرات استقامت الکتریکی بر اثر زمان اعمال ولتاژ

به عایق‌های جامد را باید تا حد امکان پایین‌تر از ولتاژهای شکست نگه داشت. در بخش‌های بعدی به بیان هر یک از این نظریه‌های شکست خواهیم پرداخت.

#### ۲-۴- 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 تخلیه الکتریکی خارجی وجود نداشته باشد، در آن صورت، شکست الکتریکی در شدت میدان‌های بالا و در حدود ۱ تا ۱۵ MV/cm رخ می‌دهد. چنین شکست الکتریکی را که تنها به ترکیب شیمیایی و خواص عایقی یک ماده بستگی دارد "شکست ذاتی" می‌گویند. ولتاژ شکست ذاتی، حداکثر ولتاژی است که ممکن است یک عایق تحمل کند. در عایق‌های معمولی، شکست الکتریکی در شدت میدان‌های بسیار پایین‌تر رخ می‌دهد. با این وجود، تلاش‌های زیادی برای اندازه‌گیری شدت میدان شکست ذاتی صورت گرفته است. برای این کار نمونه‌ای مطابق شکل (۲-۴)، به گونه‌ای طراحی می‌شود که شدت میدان در مرکز عایق جامد مورد آزمایش، زیاد و در لبه‌ها بسیار کم باشد تا تخلیه در وسط ماده صورت گیرد.

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 کلی شکست ذاتی در صورتی اتفاق می‌افتد که الکترون‌های عایق از میدان اعمال شده، انرژی کافی برای عبور از باند ظرفیت را به باند هدایت به دست آورند. با وجود این‌که مکانیزم‌های مختلفی برای یافتن میدان بحرانی شکست ذاتی ارائه شده است، اما هنوز هیچ کدام از آنها نتیجه کاملاً رضایت‌بخشی ارائه نمی‌دهند. مدل‌های ارائه شده در مکانیزم



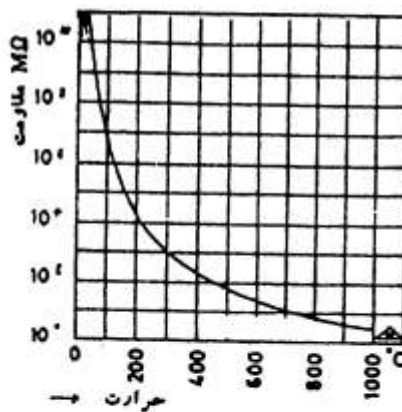
شکل (۲-۴): نمونه عایق جامد برای مطالعه شکست ذاتی

## ۴-۴- مکانیزم شکست حرارتی

به‌طور 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 نیمه هادی‌ها بر خلاف هادی‌ها، با افزایش درجه حرارت عایق یا نیمه هادی، 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 به خاطر 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



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

بولتزمن است. دمای عایق جامد در اثر عبور جریان رسانایی  $I$  از آن (به سبب تلفات حرارتی  $RI^2$ ) زیاد می‌شود. افزایش دما باعث افزایش قابلیت هدایتی عایق و در نتیجه افزایش  $I$  خواهد شد که افزایش  $I$ ، خودش تلفات حرارتی  $RI^2$  را زیاد می‌کند و باعث بالاتر رفتن دمای عایق می‌شود. البته همزمان با افزایش دمای داخل عایق، حرارت ایجاد شده به محیط اطراف منتقل می‌شود. در این حالت، هر چه دمای محیط کم‌تر باشد انتقال حرارت بیشتر صورت می‌گیرد. دمای عایق، زمانی به حالت تعادل و پایدار می‌رسد که مجموع حرارت‌های انتقال یافته به محیط خارج، برابر مجموع حرارت‌های تولید شده در داخل عایق جامد باشد. اما اگر درجه حرارت محیط در حدّ درجه حرارت داخل عایق شود، دیگر هیچ‌گونه انتقال حرارتی صورت نگرفته و ناپایداری حرارتی به وجود می‌آید. 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 می‌شود و در نهایت، عایق دچار شکست الکتریکی می‌شود.

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. برای محاسبه شدت میدان بحرانی شکست حرارتی، چگونگی دفع حرارت از عایق را بررسی می‌کنیم. حرارت تولید شده در عایق یا توسط آن جذب می‌شود و درجه حرارت آن را بالا می‌برد و یا به طریق هدایت و تشعشع از آن خارج می‌شود. بخشی

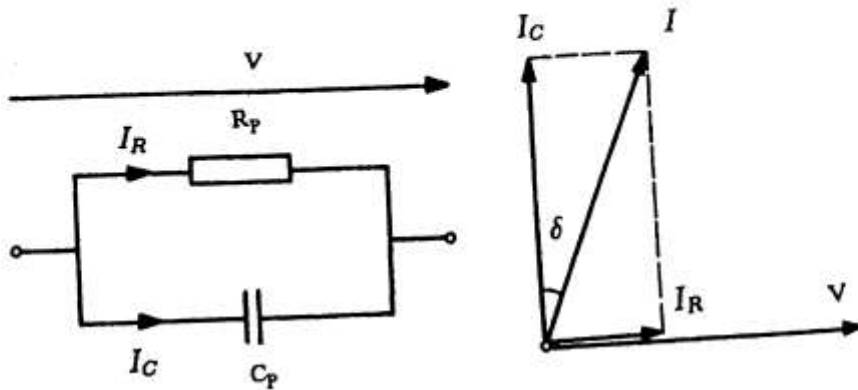
جدول (۴-۱): حداکثر ولتاژ شکست حرارتی بعضی از عایق‌های جامد

حداکثر ولتاژ حرارتی بر حسب MV/cm		ماده عایقی
AC	DC	
۷-۱۸	۲۴	کریستال: میکا
۱/۴	۳۸	نمک سنگی
--	۱۲۰۰۰	کوارتز: عمود بر محور
--	۶۶	موازی با محور
۲/۲	--	ناخالص
۹/۸	--	سرامیک: استیتیت H.V.
۱/۵	--	استیتیت L.F.
۲/۸	--	چینی مرغوب
		مواد آلی: کاغذ خازن
۱/۴۵ - ۲/۷۵	--	اُبنیت
۳/۵	--	پلی‌تن
۵	--	پلی‌استیرن
۰/۰۵	--	پلی‌استیرن در ۱MC/c
۰/۳ - ۱/۰	--	رزین‌های اکریلیک

## ۴-۴-۱- نقش پارامتر ضریب تلفات عایقی در مکانیزم شکست حرارتی

هر عایق جامد بین دو الکتروود فلزی، یک خازن به وجود می‌آورد. اگر خازن کاملاً ایده‌آل باشد، تلفات انرژی حرارتی ندارد. در ولتاژ متناوب AC، جریان خازن ایده‌آل  $90^\circ$  جلوتر از ولتاژ آن است. با توجه به این‌که خازن‌ها (عایق‌ها) ایده‌آل نیستند، در نتیجه یک مقاومت اهمی  $R$  نیز همواره وجود دارد؛ بنابراین، جریان و ولتاژ آن دارای اختلاف فاز کم‌تر از  $90^\circ$  خواهد بود و زاویه بین آن‌ها به مقدار  $\theta$  از  $90^\circ$  کم‌تر است. مدار معادل یک خازن واقعی با تلفات را می‌توان به صورت شکل (۴-۸)، از ترکیب موازی یک مقاومت اهمی  $R_p$  و یک خازن ایده‌آل  $C_p$  شبیه‌سازی

## عایق‌ها و فشارقوی



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

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

$$I_C = j C_p \omega V$$

(۴-۲۰) مؤلفه خازنی

$$I_R = \frac{V}{R_p}$$

(۴-۲۱) مؤلفه اهمی

در نتیجه، جریان کل خازن برابر است با،

$$I = I_R + I_C = \frac{V}{R_p} + j C_p \omega V = \left( \frac{1}{R_p} + j C_p \omega \right) V \quad (۴-۲۲)$$

جریان  $I_R$  با ولتاژ  $V$  هم جهت است، ولی جریان  $I_C$  عمود بر  $V$  می‌باشد. از این رو، ضریب تلفات عایقی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{V/R_p}{\omega C_p V} = \frac{1}{R_p C_p \omega} \quad (۴-۲۳)$$

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

فقط برای ولتاژهای جریان متناوب به کار می‌رود.

## ۴-۵- مکانیزم شکست فرسودگی

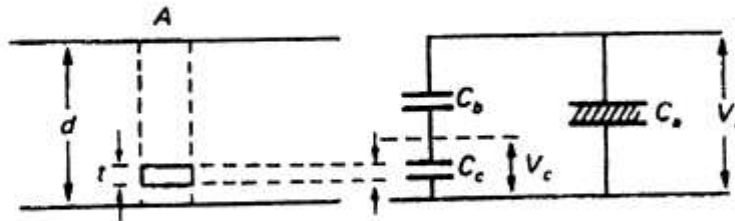
غالباً در عایق‌های جامد بر اثر گذشت زمان و به سبب وجود حفره‌های حاوی گاز، شکست الکتریکی اتفاق می‌افتد. هر چند که فناوری ساخت عایق‌های جامد روز به روز پیشرفت می‌کند، ولی باز هم نمی‌تواند خالی از حفره‌های کوچک باشد. سطح الکترودها و عایق‌های جامد نیز، کاملاً صیقلی نیستند. بنابراین، معمولاً حفره‌های گازی 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 حفره‌گازی، شکست الکتریکی اتفاق بیفتد، لایه‌های کربن روی سطح عایق در محل حفره‌ها می‌نشینند و باعث رسانایی و افت مقاومت عایقی می‌شود. در نتیجه، به تدریج این حفره‌های درونی بزرگتر شده و به یکدیگر رسوخ کرده و یک کانال را به وجود می‌آورد تا در نهایت، منجر به تخلیه الکتریکی عایق جامد می‌شوند. برای محاسبه ولتاژ شکست در اثر تخلیه موضعی در عایق‌های جامد، فرض می‌شود 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 قسمت‌های بالا و پایین حفره، و  $C_a$  ظرفیت بقیه قسمت‌های عایق جامد است. با توجه به این که  $t \ll d$  و با فرض این که داخل حفره هوا باشد یا یکنواختی میدان و مساوی بودن چگالی شار الکتریکی می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_c E_c = \varepsilon_r \varepsilon_b E_b$$

$$E_c = \varepsilon_r E_b \quad (۴-۳۰)$$

که  $E_c$  و  $E_b$ ، به ترتیب، شدت میدان الکتریکی در داخل حفره و قسمت‌های بالا و



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

پایین حفره است. همچنین  $\epsilon_r$  عددی الکتریک نسبی عایق جامد است. ظرفیت خازنی  $C_b$  و  $C_c$  را به صورت زیر خواهیم داشت:

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

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

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:

$$V_c = \frac{C_b}{C_c + C_b} V = \frac{\frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d-t}}{\frac{\epsilon_0 A}{t} + \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d-t}} V = \frac{V}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left( \frac{d}{t} - 1 \right)} \quad (۳۳-۴)$$

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:

$$E_s = \frac{V_c}{t} \quad (۳۴-۴)$$

$$V_s = E_s \cdot t$$

با جایگزینی رابطه (۳۴-۴) در رابطه (۳۳-۴) داریم:

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

$$V_{cb} = E_s \cdot t \left[ 1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left( \frac{d}{t} - 1 \right) \right] \quad (۳۵-۴)$$



## ۴-۸- ردگذاری<sup>(۱)</sup> در سطح عایق‌های جامد

این پدیده نشان دهنده به وجود آمدن یک مسیر هدایت به صورت لایه کربنی و دائمی روی سطح عایق جامد است که در نتیجه، پایین آمدن استقامت الکتریکی عایق‌های جامد را به همراه خواهد داشت. این پدیده معمولاً در عایق‌های جامدی که از مواد آلی ساخته شده‌اند، به وجود می‌آید. برای عایق‌هایی که در فضای آزاد قرار می‌گیرند، به مرور زمان، آلودگی‌های صنعتی یا املاح روی آن‌ها را می‌پوشاند. لایه

### 1- Tracking

آلودگی به همراه رطوبت، جریان نشتی سطح عایق را افزایش می‌دهد که باعث گرم شدن سطح عایق و در نتیجه خشک شدن لایه 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 رد 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، به ساختمان پلیمری عایق بستگی دارد. همچنین میزان گرد و غبار و ذرات فلزی روی عایق، تأثیر بسیار مهمی روی این موضوع دارد.

### پیوست:

به طور کلی در سیستم‌های الکتریکی، مواد مختلف را می‌توان به دو دسته مجزا تقسیم کرد: مواد رسانا یا هادی و مواد عایق. مواد رسانا موادی هستند که قابلیت هدایت الکتریکی خوبی دارند و جریان برق را به طرفی که می‌خواهیم هدایت می‌کنند. مواد عایق قابلیت هدایت الکتریکی آن‌ها ضعیف است و با استفاده از آن‌ها جریان را از طرفی که نمی‌خواهیم هدایت شود، باز می‌داریم.

در حالت ایده‌آل، ماده عایق ماده‌ای است که اجازه عبور هیچ‌گونه جریانی را از خود نمی‌دهد. اما در عمل هیچ عایقی ایده‌آل نیست و از این رو همواره مقداری جریان از عایق عبور می‌کند هرچند میزان این جریان بسیار اندک است. جریان عبوری از عایق را می‌توان به مؤلفه‌های مختلف تقسیم کرد که عبارتند از: جریان شارژ خازنی، جریان پلاریزاسیون یا جذبی، جریان نشتی سطحی، جریان نشتی داخلی یا عمقی.

مواد عایق را از لحاظ شکل ظاهری می‌توان به سه دسته عایق‌های جامد، مایع و گاز تقسیم کرد. اکثر مواد عایقی که در سیستم‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از نوع عایق‌های جامد هستند و روغن در ترانس و کلیدهای فشار قوی نمونه‌ای از عایق مایع است آن‌چه که در عایق‌های مایع باعث هدایت اندک جریان الکتریسیته می‌شود وجود یون‌های مثبت و منفی در داخل عایق است

- \*\*انواع جامدات: (۱) فلزی (۲) یونی (۳) کووالانسی (۴) مولکولی
- جامدات فلزی و یونی عایق خوبی به حساب نمی آیند چون سرشار از یون هستند.
- \*\*پدیده یونیزاسیون(تولید یون): تبدیل یک ذره ی خنثی ( اتم و مولکول) به یک ذره ی باردار (یون) است. به عبارت دیگر جدا شدن الکترون از اتم یعنی خارج شدن از جاذبه ی الکترواستاتیکی هسته ی اتم را یونیزاسیون گویند.
- \*\*هدایت الکتریکی در عایق‌ها توسط یون انجام می گیرد.
- \*\*بعضی از جامدات و مایعات می توانند عایق خوبی باشند چون احتمال تولید یون در آنها بسیار ضعیف است. مانند عایق کاغذی در ترانسفورماتورها و موتورها و ... و روغن در ترانسفورماتورها و ..
- \*\*عامل وقوع یونیزاسیون: اعمال انرژی به ذره ی خنثی
- عوامل موثر بر یونیزاسیون: (۱) اختلاف پتانسیل یا ولتاژ (۲) فشار محیط (۳) دما و رطوبت (۴) میزان و نوع آلودگی (۵) شکل الکترودهای تحت ولتاژ
- \*\* هرچه فشار محیط بیشتر باشد، یونیزاسیون کمتری صورت میگیرد( ارتفاع بیشتر یعنی فشار کمتر و یونیزاسیون بیشتر) و هر چه الکتروود نوک تیز تر باشد در نتیجه میدان شدیدتر و و یونیزاسیون بیشتر است.
- \*\*عایق‌ها در جریان متناوب به دلیل همگن نبودن ساختمان عایق مقاومت الکتریکی کمتری از خود نشان میدهند.
- \*\* وقتی دو یون یا بار الکتریکی  $q^+$  و  $q^-$  در فاصله ی  $r$  از یکدیگر واقع باشند، هریک از آنها در میدان ذره ی دیگر واقع شده است و شدت میدان هریک و نیروی پدید آمده بین آنها مطابق روابط زیر است. و تحت تاثیر نیروی  $F$  دو یون با سرعت معینی به سمت یکدیگر حرکت می کنند که سرعت حرکت نسبی بین آنها به وسیله ی شدت میدان و مجموع تحریک دو یون تعیین می شود.
- $$v = E(k^+ + k^-) = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}(k^+ + k^-) \quad \text{و} \quad F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon r} \quad \text{و} \quad E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}$$
- \*\*اتصال کوتاه در عایق‌ها : بی ارزش شدن آنها از نظر عایقی و بزرگ شدن تلفات در داخل عایق‌ها یعنی از دست رفتن خاصیت عایقی و تبدیل شدن به هادی به صورت ناگهانی.
- \*\*برخی از خصوصیات گاز  $SF_6$  : (۱) هدایت الکتریکی بسیار کم (۲) استقامت الکتریکی و عایقی حدود ۲ تا ۳ برابر هوا
- (۳) حل نشدن در آب (۴) نمیسوزد