

[WORDPRES_PDF]

خلاصه روش‌های آزمون

4.1 مقاومت یا رسانایی یک ماده آزمون یا یک خازن، از طریق اندازه‌گیری جریان یا افت ولتاژ تحت شرایط مشخص تعیین می‌شود. با استفاده از سیستم‌های الکترونی مناسب، مقاومت یا رسانایی سطحی و حجمی را می‌توان به صورت جداگانه اندازه‌گیری کرد. سپس، در صورت مشخص بودن ابعاد مورد نیاز نمونه آزمون و الکتروده، مقاومت ویژه یا رسانایی قابل محاسبه است.

سیستم‌های الکترونی

6.1 الکترودهای مورد استفاده برای مواد عایق باید از ماده‌ای ساخته شده باشند که به راحتی اعمال شود، تماس کامل و نزدیکی با سطح نمونه آزمون ایجاد کند و به دلیل مقاومت الکتروده یا آلودگی نمونه آزمون، خطای قابل توجهی ایجاد نکند (5). ماده الکتروده باید در شرایط آزمون در برابر خوردگی مقاوم باشد. در آزمون نمونه‌های ساخته شده، مانند پوشش‌های عبوری، کابل‌ها و موارد مشابه، الکترودهای مورد استفاده بخشی از نمونه آزمون یا نصب آن هستند. بنابراین، اندازه‌گیری‌های مقاومت عایقی یا رسانایی، اثرات آلاینده مواد الکتروده یا نصب را نیز دربر می‌گیرد و معمولاً با عملکرد نمونه آزمون در شرایط استفاده واقعی مرتبط است.

6.1.1 الکترودهای پایه‌اتصال و پین مخروطی، مطابق شکل 1 و شکل 2، روشی برای اعمال ولتاژ به مواد عایق سخت فراهم می‌کنند تا خواص مقاومتی یا رسانایی آن‌ها ارزیابی شود. این الکترودها تا حدی شرایط واقعی استفاده، مانند پایه‌های اتصال روی پنل‌های ابزار و نوارهای ترمینال، را شبیه‌سازی می‌کنند. در مورد مواد عایق لمینیتی دارای سطوح با رزین زیاد، به دلیل تماس نزدیک‌تر با بدنه ماده عایق، استفاده از پین مخروطی در مقایسه با پایه‌های اتصال ممکن است مقادیر مقاومت عایقی کمی کمتری ایجاد کند. مقادیر مقاومت یا رسانایی به شدت تحت تأثیر تماس منفرد میان هر پین و ماده دی‌الکتریک، زبری سطح پین‌ها و صافی سوراخ موجود در ماده دی‌الکتریک قرار دارند. دستیابی به نتایج تکرارپذیر برای نمونه‌های آزمون مختلف دشوار است.

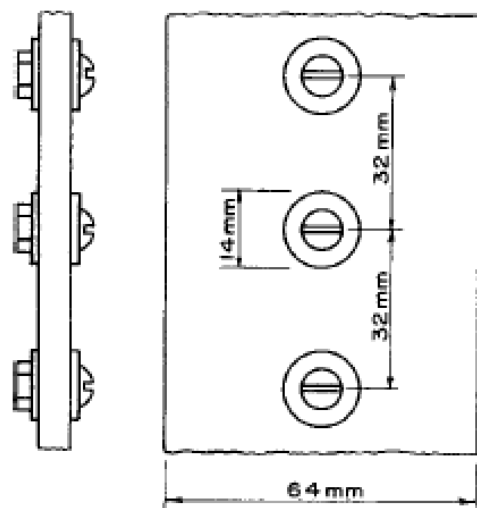
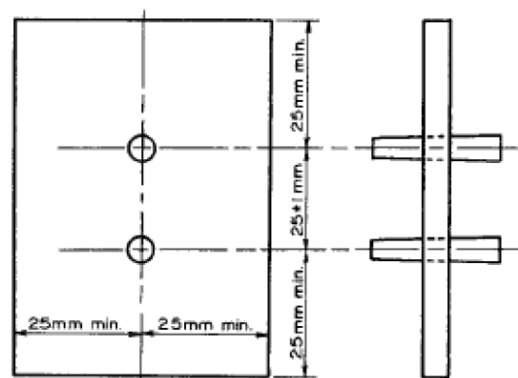
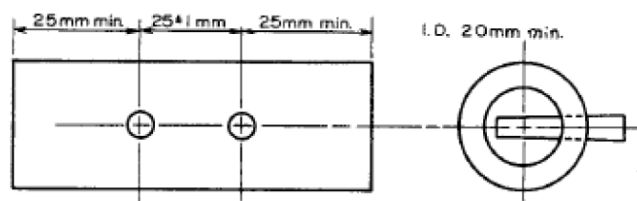


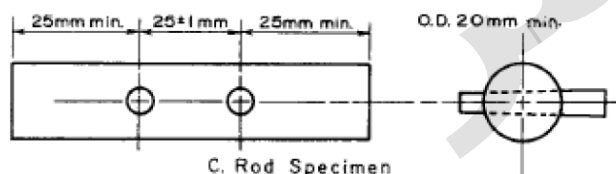
FIG. 1 Binding-Post Electrodes for Flat, Solid Specimens



A. Plate Specimen



B. Tube Specimen



C. Rod Specimen

Use Pratt & Whitney No.3 Taper Pins

FIG. 2 Taper-Pin Electrodes

6.1.2 میله‌های فلزی در آرایش شکل 3، اساساً برای ارزیابی مقاومت عایقی یا رسانایی نوارهای انعطاف‌پذیر و نمونه‌های آزمون جامد نازک طراحی شده‌اند و روشی نسبتاً ساده و مناسب برای کنترل کیفیت الکتریکی فراهم می‌کنند. این آرایش برای به‌دست‌آوردن مقادیر تقریبی مقاومت یا رسانایی سطحی، هنگامی که عرض ماده عایق بسیار بیشتر از ضخامت آن باشد، رضایت‌بخش‌تر است.

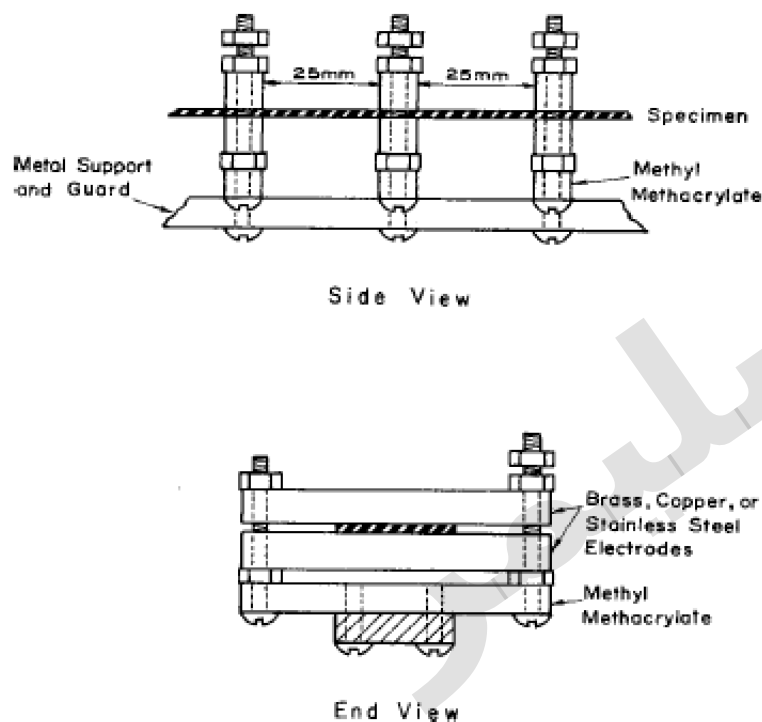


FIG. 3 Strip Electrodes for Tapes and Flat, Solid Specimens

6.1.3 رنگ نقره‌ای، مطابق شکل‌های 4، 5 و 6، به صورت تجاری با رسانایی بالا و در انواع خشک‌شونده در هوا یا پخت‌شونده در دمای پایین عرضه می‌شود. این رنگ‌ها به اندازه کافی متخلخل هستند تا امکان نفوذ رطوبت از میان آن‌ها فراهم شود و نمونه آزمون پس از اعمال الکترودها قابل آماده‌سازی در شرایط محیطی باشد. این ویژگی در بررسی اثرات مقاومت-رطوبت و همچنین تغییرات ناشی از دما بسیار مفید است. با این حال، پیش از استفاده از رنگ رسانا به عنوان ماده الکتروده، باید اطمینان حاصل شود که حلال موجود در رنگ به ماده آسیب نمی‌زند و خواص الکتریکی آن را تغییر نمی‌دهد. لبه‌های نسبتاً صاف الکترودهای گارد را می‌توان با یک قلم‌مو با موهای ظریف ایجاد کرد. برای الکترودهای دایره‌ای، لبه‌های تیزتر را می‌توان با استفاده از پرگار ترسیم و رنگ نقره‌ای ایجاد کرد؛ به این صورت که ابتدا محیط دایره‌های الکتروده ترسیم و سپس نواحی محصور با قلم‌مو پر شوند. می‌توان از نوار باریک پوشاننده استفاده کرد، مشروط بر اینکه چسب حساس به فشار آن، سطح نمونه آزمون را آلوده نکند. در صورت پاشش رنگ الکتروده، استفاده از ماسک‌های گیره‌ای نیز امکان‌پذیر است.

6.1.4 فلز پاششی، مطابق شکل‌های 4، 5 و 6، در صورتی قابل استفاده است که چسبندگی رضایت‌بخشی به نمونه آزمون داشته باشد. الکترودهای پاششی نازک ممکن است مزایایی داشته باشند، زیرا بلافاصله پس از اعمال آماده استفاده هستند. این الکترودها ممکن است به اندازه کافی متخلخل باشند تا امکان آماده‌سازی نمونه آزمون فراهم شود، اما این موضوع باید بررسی و تأیید شود. برای ایجاد فاصله میان الکترودها اندازه‌گیری و الکتروده گارد، باید از نوارهای باریک پوشاننده یا ماسک‌های گیره‌ای استفاده شود. باید از نواری استفاده کرد که مشخص شده باشد سطح فاصله را آلوده نمی‌کند.

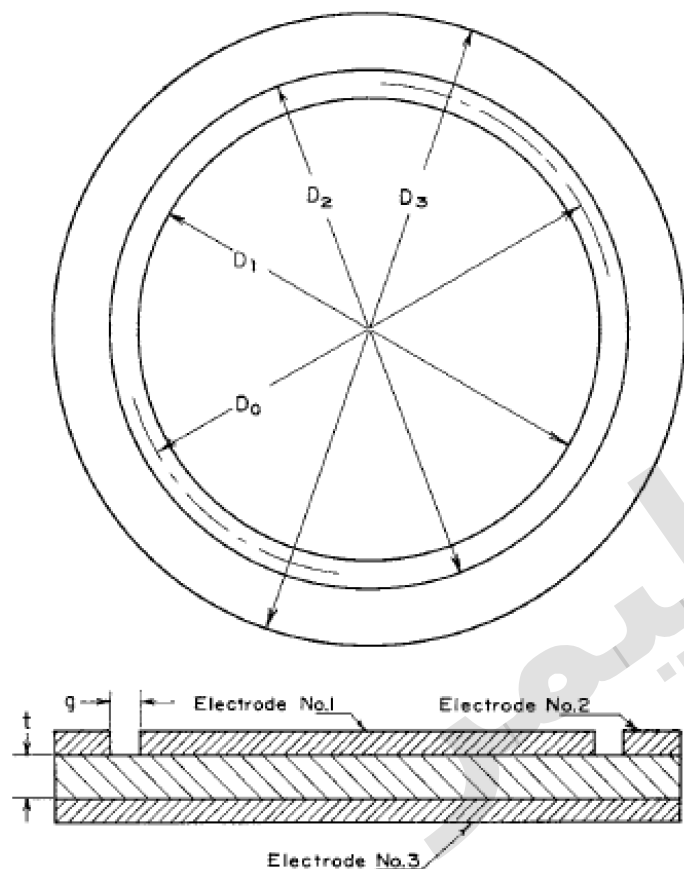


FIG. 4 Flat Specimen for Measuring Volume and Surface Resistances or Conductances

6.1.5 فلز تبخیر شده را می‌توان تحت همان شرایط ذکر شده در 6.1.4 به کار برد.

6.1.6 فویل فلزی، مطابق شکل 4، می‌تواند به عنوان الکترود روی سطوح نمونه آزمون اعمال شود. ضخامت معمول فویل فلزی مورد استفاده در مطالعات مقاومت یا رسانایی دی‌الکتریک‌ها از 6 تا 80 μm متغیر است. فویل سرب یا قلع بیشترین کاربرد را دارد و معمولاً با حداقل مقدار وازلین، گریس سیلیکونی، روغن یا ماده مناسب دیگری به عنوان چسب، به نمونه آزمون متصل می‌شود. این الکترودها باید با فشار صاف‌کننده کافی اعمال شوند تا تمام چین‌خوردگی‌ها از بین برود و چسب اضافی به سمت لبه فویل هدایت شود؛ سپس می‌توان آن را با دستمال تمیزکننده پاک کرد. یک روش بسیار مؤثر، استفاده از غلتک سخت و باریک با عرض 10 تا 15 mm است که روی سطح به سمت بیرون غلتانده می‌شود تا دیگر اثر قابل مشاهده‌ای از غلتک روی فویل باقی نماند. این روش فقط برای نمونه‌های آزمونی با سطوح کاملاً صاف به‌طور رضایت‌بخش قابل استفاده است. با دقت کافی، ضخامت لایه چسب را می‌توان به 2.5 μm کاهش داد. از آنجا که این لایه به‌صورت سری با نمونه آزمون قرار می‌گیرد، همواره باعث می‌شود مقاومت اندازه‌گیری شده بیش از مقدار واقعی باشد. این خطا ممکن است برای نمونه‌های آزمون با مقاومت ویژه کمتر و ضخامت کمتر از 250 μm بیش از حد زیاد شود. همچنین غلتک سخت می‌تواند ذرات تیز را به داخل یا از میان لایه‌های نازک (50 μm) وارد کند. الکترودهای فویلی متخلخل نیستند و پس از اعمال الکترودها اجازه نمی‌دهند نمونه آزمون شرایط محیطی لازم را به دست آورد. چسب ممکن است در دماهای بالا کارایی خود را از دست بدهد و استفاده از صفحات فلزی تخت پشتیبان تحت فشار را ضروری کند. با کمک ابزار برش مناسب می‌توان نواری با عرض صحیح از یکی از الکترودها برید تا یک الکترود اندازه‌گیری و یک الکترود گارد تشکیل شود. چنین نمونه آزمون سه‌ترمیناله‌ای معمولاً به دلیل باقی‌ماندن گریس روی سطح فاصله، برای اندازه‌گیری مقاومت یا رسانایی سطحی قابل استفاده نیست. تمیزکردن کامل سطح فاصله بدون آسیب‌زدن به لبه‌های مجاور الکترود ممکن است بسیار دشوار باشد.

6.1.7 گرافیت کلونیدی، مطابق شکل 4، که در آب یا حامل مناسب دیگری پراکنده شده است، می‌تواند روی مواد عایق ورقه‌ای و غیرمتخلخل اعمال شود تا یک الکترود خشک‌شونده در هوا تشکیل دهد. می‌توان از نوارهای پوشاننده یا ماسک‌های گیره‌ای استفاده کرد (6.1.4). استفاده از این ماده الکترود فقط در صورت برقرار بودن تمام شرایط زیر توصیه می‌شود:

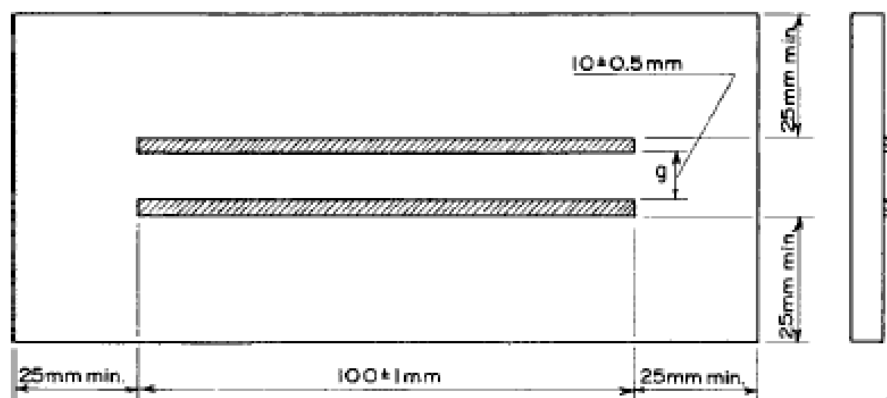
6.1.7.1 ماده مورد آزمون باید پوشش گرافیتی را بپذیرد؛ به‌گونه‌ای که پوشش پیش از آزمون پوسته‌پوسته نشود،

6.1.7.2 ماده مورد آزمون نباید به‌راحتی آب را جذب کند، و

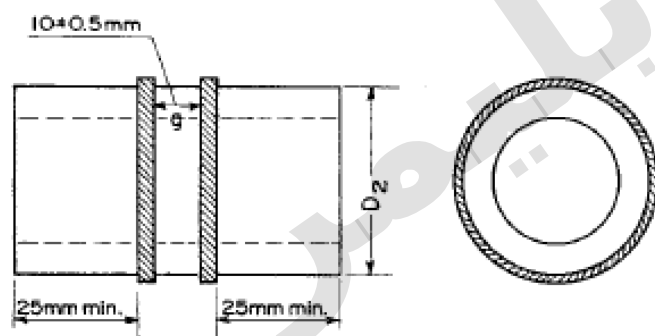
6.1.7.3 آماده‌سازی شرایطی باید در اتمسفر خشک انجام شود (روش اجرا (B, Practice D6054) و اندازه‌گیری‌ها نیز در همین اتمسفر صورت گیرند.

6.1.8 الکترودهای فلز مایع نتایج رضایت‌بخشی ایجاد می‌کنند و ممکن است بهترین روش برای دستیابی به تماس لازم با نمونه آزمون جهت اندازه‌گیری مؤثر مقاومت باشند. فلز مایع تشکیل‌دهنده الکترودهای بالایی باید به‌وسیله حلقه‌های فولاد زنگ‌نزن محدود شود. لبه پایینی هر حلقه باید در سمتی که از فلز مایع دور است، با پخ‌زنی به لبه‌ای تیز تبدیل شود. شکل‌های 7 و 8 دو آرایش احتمالی الکترود را نشان می‌دهند.

6.1.9 صفحات فلزی تخت، مطابق شکل 4، (ترجیحاً از نوع گارددار) را می‌توان برای آزمون مواد انعطاف‌پذیر و تراکم‌پذیر، هم در دمای اتاق و هم در دماهای بالا، به کار برد. این صفحات می‌توانند دایره‌ای یا برای نوارها مستطیلی باشند. برای اطمینان از تماس کامل با نمونه آزمون، معمولاً فشار قابل‌توجهی لازم است.



A - Plate Specimen



B - Tube or Rod Specimen

FIG. 6 Conducting-Paint Electrodes

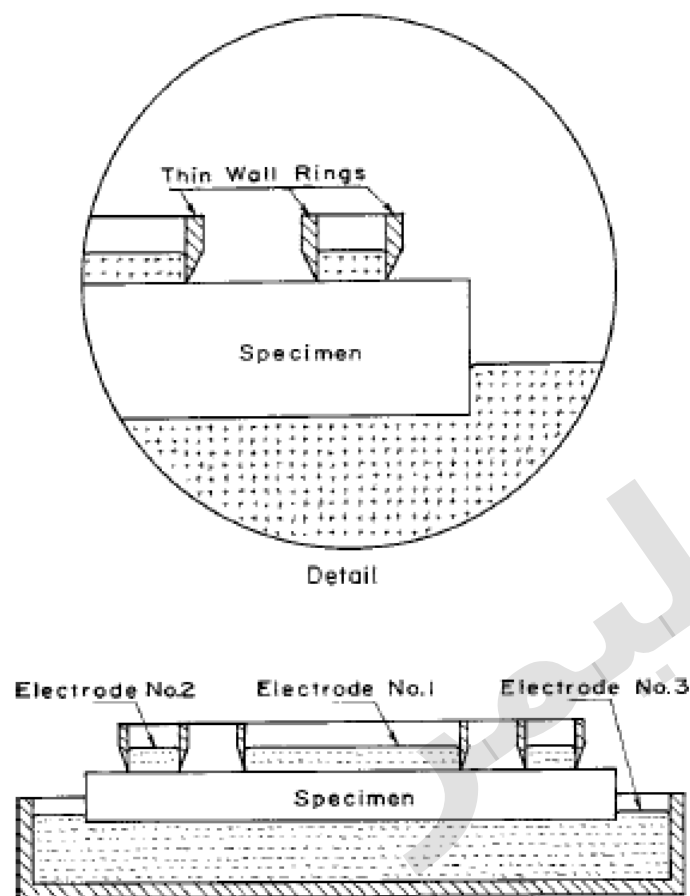


FIG. 7 Liquid Metal Electrodes for Flat, Solid Specimens

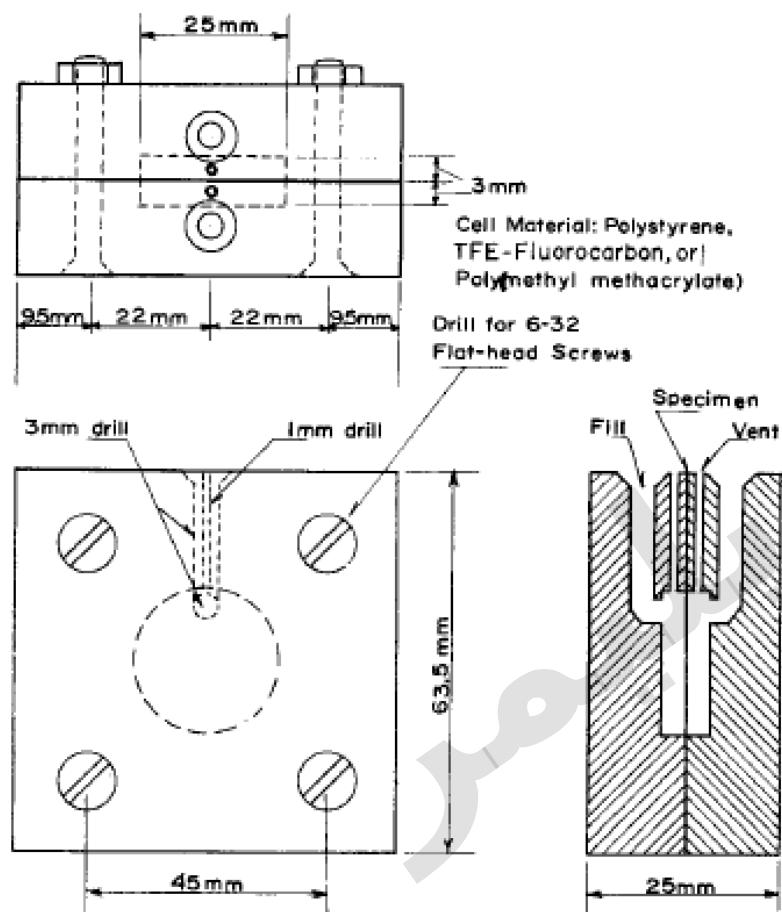


FIG. 8 Liquid Metal Cell for Thin Sheet Material

فشارهای 140 تا 700 kPa رضایت بخش تشخیص داده شده اند (به مشخصات ماده مراجعه کنید).
6.1.9.1 گونه ای از سیستم الکتروود صفحه فلزی تخت در برخی طراحی های سلول مورد استفاده برای اندازه گیری گریس ها یا ترکیبات پرکننده دیده می شود. این سلول ها از پیش مونتاژ شده اند و ماده مورد آزمون یا در فضای میان الکتروودهای ثابت به سلول افزوده می شود یا الکتروودها تا فاصله از پیش تعیین شده درون ماده فرو برده می شوند. از آنجا که در این سلول ها اندازه گیری سطح مؤثر الکتروود و فاصله میان آن ها دشوار است، ثابت هر سلول، K ، (معادل ضریب A/t از جدول 1) را می توان از معادله زیر به دست آورد:

$$K = 3.6 \pi C = 11.3 C \quad (1)$$

where:

K has units of centimetres, and

C has units of picofarads and is the capacitance of the electrode system with air as the dielectric. See Test Methods D150 for methods of measurement for C .

6.1.10 لاستیک رسانا به عنوان ماده الکتروود، همان گونه که در شکل 4 نشان داده شده است، به کار رفته و این مزیت را دارد که می توان آن را به سرعت و به سادگی روی نمونه آزمون اعمال و از آن جدا کرد. از آنجا که الکتروودها فقط در مدت اندازه گیری اعمال می شوند، در آماده سازی شرایط نمونه آزمون اختلالی ایجاد نمی کنند. ماده لاستیک رسانا باید به وسیله صفحات مناسب پشتیبانی شود و به اندازه کافی نرم باشد تا با اعمال فشار متعارف، تماس مؤثر با نمونه آزمون برقرار شود.

یادداشت 1—شواهد نشان می دهد مقادیر رسانایی به دست آمده با استفاده از الکتروودهای لاستیک رسانا، همواره کمتر از مقادیر حاصل با الکتروودهای فویل قلع (20 تا 70 %) هستند (6). هنگامی که فقط دقت در حد مرتبه بزرگی مورد نیاز است و می توان خطاهای تماس را نادیده گرفت، مجموعه ای از الکتروودهای لاستیک رسانای مناسب می تواند روشی سریع برای تعیین رسانایی و مقاومت ویژه فراهم کند.

6.1.11 آب به طور گسترده به عنوان یکی از الکتروودها در آزمون عایق سیم ها و کابل ها استفاده می شود. هر دو انتهای نمونه آزمون باید خارج از آب قرار داشته باشند و طول آن ها باید به اندازه ای باشد که نشستی در امتداد عایق قابل اغماض باشد. برای اطلاع از ضرورت استفاده از گارد در هر انتهای نمونه آزمون، به روش های آزمون اختصاصی سیم و کابل مراجعه کنید. برای استاندارد سازی، افزودن کلرید سدیم به آب مطلوب است تا غلظت کلرید سدیم به

1.0 تا 1.1 % NaCl برسد و رسانایی کافی تضمین شود. گزارش شده است که اندازه‌گیری‌ها در دماهای تا حدود 100 °C امکان‌پذیر هستند.

انتخاب دستگاه و روش آزمون

7.1 منبع تغذیه—منبعی با ولتاژ مستقیم بسیار پایدار موردنیاز است (X1.7.3 را ببینید). باتری‌ها یا سایر منابع ولتاژ مستقیم پایدار، مناسب بودن خود را برای استفاده در این آزمون ثابت کرده‌اند.

7.2 مدار گارد—چه مقاومت ماده عایق با دو الکتروود (بدون گارد) اندازه‌گیری شود و چه با یک سیستم سه‌ترمیناله (دو الکتروود به علاوه گارد)، باید نحوه ایجاد اتصالات الکتریکی میان دستگاه آزمون و نمونه آزمون در نظر گرفته شود. اگر نمونه آزمون در فاصله‌ای از دستگاه آزمون قرار داشته باشد، یا آزمون نمونه آزمون در شرایط مرطوب انجام شود، یا انتظار رود مقاومت نمونه آزمون نسبتاً زیاد (10^{10} تا 15^{10} ohms) باشد، مسیرهای مقاومتی کاذب می‌توانند به راحتی میان دستگاه آزمون و نمونه آزمون ایجاد شوند. برای به حداقل رساندن تداخل ناشی از این مسیرهای کاذب، وجود مدار گارد ضروری است (همچنین X1.9 را ببینید).

7.2.1 با الکتروود گارد—برای ایجاد اتصالات گاردار مناسب میان تجهیزات آزمون و نمونه آزمون، از کابل کواکسیال استفاده کنید؛ به طوری که سیم هسته به الکتروود اندازه‌گیری و شیلد به الکتروود گارد متصل شود. استفاده از کابل کواکسیال (که در این حالت نیز شیلد آن به گارد متصل است) برای سیم بدون گارد در اینجا (یا در 7.2.2) الزامی نیست، هرچند استفاده از آن مقداری از نویز زمینه را کاهش می‌دهد (همچنین شکل 9 را ببینید).

7.2.2 بدون الکتروود گارد—از کابل کواکسیال استفاده کنید؛ به طوری که سیم هسته به یک الکتروود متصل شود و شیلد در فاصله حدود 1 cm از انتهای سیم هسته پایان یابد (همچنین شکل 10 را ببینید).

7.3 اندازه‌گیری‌های مستقیم—جریان عبوری از یک نمونه آزمون در ولتاژ ثابت، با استفاده از هر دستگاهی که حساسیت و دقت موردنیاز را داشته باشد اندازه‌گیری می‌شود ($\pm 10\%$ معمولاً کافی است). دستگاه‌های موجود برای اندازه‌گیری جریان شامل الکترومترها، تقویت‌کننده‌های d-c مجهز به نشانگر و گالوانومترها هستند. روش‌ها و مدارهای معمول در پیوست X3 ارائه شده‌اند. هنگامی که مقیاس دستگاه اندازه‌گیری مستقیماً بر حسب اهم کالیبره شده باشد، برای اندازه‌گیری مقاومت به محاسبه نیازی نیست.

7.4 روش‌های مقایسه‌ای—می‌توان از مدار پل و تستون برای مقایسه مقاومت نمونه آزمون با یک مقاومت استاندارد استفاده کرد (به پیوست X3 مراجعه کنید).

7.5 ملاحظات دقت و اربیی:

7.5.1 کلیات—به عنوان راهنمای انتخاب دستگاه، ملاحظات مرتبط در جدول 2 خلاصه شده‌اند؛ اما منظور این نیست که مثال‌های ذکر شده تنها گزینه‌های قابل استفاده هستند. این جدول برای نشان دادن حدود حساسیت و خطای ذاتی روش‌های مختلف در نظر گرفته نشده است، بلکه حدودی را نشان می‌دهد که با دستگاه‌های مدرن به طور مشخص امکان دستیابی به آن‌ها وجود دارد. در هر حال، دستیابی به این حدود یا فراتر رفتن از آن‌ها فقط از طریق انتخاب و ترکیب دقیق دستگاه‌های مورد استفاده امکان‌پذیر است. با این حال باید تأکید کرد که خطاهای بررسی شده فقط خطاهای مربوط به تجهیزات اندازه‌گیری هستند. خطاهایی مانند موارد مطرح شده در پیوست X1 موضوعی کاملاً متفاوت‌اند. در همین ارتباط، ستون آخر جدول 2 مقاومتی را فهرست می‌کند که توسط مقاومت عایقی میان الکتروود اندازه‌گیری و سیستم گارد، در روش‌های مختلف شنت می‌شود. به طور کلی، هرچه این مقاومت کمتر باشد، احتمال خطا ناشی از شنت ناخواسته نیز کمتر است.

TABLE 1 Calculation of Resistivity or Conductivity^A

Type of Electrodes or Specimen	Volume Resistivity, $\Omega\text{-cm}$	Volume Conductivity, S/cm	Effective Area of Measuring Electrode
	$\rho_v = \frac{A}{t} R_v$	$\gamma_v = \frac{t}{A} G_v$	
Circular (Fig. 4)	$\rho_v = \frac{A}{t} R_v$	$\gamma_v = \frac{t}{A} G_v$	$A = \frac{\pi(D_1 + g)^2}{4}$
Rectangular	$\rho_v = \frac{A}{t} R_v$	$\gamma_v = \frac{t}{A} G_v$	$A = (a + g)(b + g)$
Square	$\rho_v = \frac{A}{t} R_v$	$\gamma_v = \frac{t}{A} G_v$	$A = (a + g)^2$
Tubes (Fig. 5)	$\rho_v = \frac{A}{t} R_v$	$\gamma_v = \frac{t}{A} G_v$	$A = \pi D_o(L + g)$
Cables	$\rho_v = \frac{2\pi L R_v}{\ln \frac{D_2}{D_1}}$	$\gamma_v = \frac{\ln \frac{D_2}{D_1}}{2\pi L G_v}$	
	Surface Resistivity, Ω (per square)	Surface Conductivity, S (per square)	Effective Perimeter of Guarded Electrode
	$\rho_s = \frac{P}{g} R_s$	$\gamma_s = \frac{g}{P} G_s$	
Circular (Fig. 4)	$\rho_s = \frac{P}{g} R_s$	$\gamma_s = \frac{g}{P} G_s$	$P = \pi D_o$
Rectangular	$\rho_s = \frac{P}{g} R_s$	$\gamma_s = \frac{g}{P} G_s$	$P = 2(a + b + 2g)$
Square	$\rho_s = \frac{P}{g} R_s$	$\gamma_s = \frac{g}{P} G_s$	$P = 4(a + g)$
Tubes (Figs. 5 and 6)	$\rho_s = \frac{P}{g} R_s$	$\gamma_s = \frac{g}{P} G_s$	$P = 2\pi D_2$

Nomenclature:

A = the effective area of the measuring electrode for the particular arrangement employed,
P = the effective perimeter of the guarded electrode for the particular arrangement employed,
 R_v = measured volume resistance in ohms,
 G_v = measured volume conductance in siemens,
 R_s = measured surface resistance in ohms,
 G_s = measured surface conductance in siemens,
t = average thickness of the specimen,
 D_o , D_1 , D_2 , g, L = dimensions indicated in Fig. 4 and Fig. 6 (see Appendix X2 for correction to g),
a, b = lengths of the sides of rectangular electrodes, and
ln = natural logarithm.

^AAll dimensions are in centimetres.

یادداشت 2—صرف نظر از روش اندازه گیری مورد استفاده، بالاترین دقت فقط با ارزیابی دقیق تمام منابع خطا به دست می آید. می توان هر یک از این روش ها را از قطعات جداگانه مونتاژ کرد یا یک دستگاه کاملاً یکپارچه تهیه نمود. به طور کلی، روش هایی که از گالوانومترهای با حساسیت بالا استفاده می کنند، در مقایسه با روش های مبتنی بر نشانگرها یا ثبت کننده ها به نصب دائمی تری نیاز دارند. روش های دارای دستگاه های نشان دهنده، مانند ولت مترها، گالوانومترها، تقویت کننده های d-c و الکترومترها، به حداقل تنظیم دستی نیاز دارند و خواندن آنها آسان است؛ اما اپراتور باید مقدار را در زمان مشخصی قرائت کند. پل و تستون (شکل X1.4) و روش پتانسیومتر (شکل (b) X1.2) به توجه کامل اپراتور برای حفظ تعادل نیاز دارند، اما امکان می دهند تنظیم انجام شده در زمان مشخص، بعداً با آسودگی قرائت شود.

7.5.2 اندازه گیری های مستقیم:

7.5.2.1 گالوانومتر-ولت متر—حداکثر خطای درصدی اندازه گیری مقاومت با روش گالوانومتر-ولت متر، برابر مجموع خطاهای درصدی نشان دهی گالوانومتر، قابلیت قرائت گالوانومتر و نشان دهی ولت متر است. برای نمونه، گالوانومتری با حساسیت 500 pA/scale division، در صورت اعمال 500 V به مقاومتی برابر با 40 GV (رسانایی 25 pS)، به اندازه 25 تقسیم مقیاس منحرف می شود. اگر انحراف با دقت نزدیک ترین 0.5 تقسیم قابل قرائت باشد و خطای کالیبراسیون (شامل خطای شنت آیرتون) برابر $\pm 2\%$ مقدار مشاهده شده باشد، خطای حاصل از گالوانومتر از $\pm 4\%$ بیشتر نخواهد شد. اگر خطای ولت متر $\pm 2\%$ کل مقیاس باشد، این مقاومت هنگام نمایش تمام مقیاس توسط ولت متر، با حداکثر خطای $\pm 6\%$ و هنگام نمایش یک سوم مقیاس، با حداکثر خطای $\pm 10\%$ اندازه گیری می شود. بنابراین، مطلوب بودن قرائت های نزدیک به تمام مقیاس کاملاً آشکار است.

7.5.2.2 ولت متر-آمپر متر—حداکثر خطای درصدی مقدار محاسبه شده برابر مجموع خطاهای درصدی ولتاژهای V_X و V_S و مقاومت R_S است. خطاهای V_S و R_S عموماً بیشتر به ویژگی های دستگاه مورد استفاده وابسته اند تا روش خاص. مهم ترین عوامل تعیین کننده خطاهای V_S عبارت اند از خطاهای نشانگر، رانش صفر تقویت کننده و پایداری بهره تقویت کننده. در تقویت کننده ها یا الکترومترهای مدرن و با طراحی مناسب، پایداری بهره معمولاً مسئله ساز نیست. با فناوری های موجود، رانش صفر تقویت کننده های ولتاژ مستقیم یا الکترومترها را نمی توان حذف کرد، اما می توان آن را به اندازه ای کند کرد که در این اندازه گیری ها نسبتاً ناچیز باشد. رانش صفر در تقویت کننده های نوع مبدل که با دقت طراحی شده اند، عملاً وجود ندارد. در نتیجه، روش صفر شکل X1.2 (b) از نظر تئوری کمتر از روش های دارای ابزار نشان دهنده در معرض خطا است؛ البته به شرط آنکه ولتاژ پتانسیومتر به طور دقیق معلوم باشد. خطای R_S تا حدی به حساسیت تقویت کننده وابسته است. برای اندازه گیری جریان معین، هر چه حساسیت تقویت کننده بیشتر باشد، احتمال استفاده از مقاومت های استاندارد سیم پیچی با مقدار کمتر و دقت بالاتر افزایش می یابد. چنین تقویت کننده هایی قابل تهیه هستند. مقاومت های استاندارد GV 100 با دقت $\pm 2\%$ موجودند. اگر ورودی 10-mV به تقویت کننده یا الکترومتر، با خطایی حداکثر برابر 2% کل مقیاس، انحراف تمام مقیاس ایجاد کند، در صورت اعمال 500

V، مقاومتی برابر TV 5000 هنگام قرائت تمام مقیاس ولت متر با حداکثر خطای 6 % و هنگام قرائت 1/3 مقیاس با حداکثر خطای 10 % قابل اندازه گیری خواهد بود.

7.5.2.3 گالوانومتر مقایسه‌ای—حداکثر خطای درصدی مقاومت یا رسانایی محاسبه شده از مجموع خطاهای درصدی RS، انحراف‌های گالوانومتر یا قرائت‌های تقویت کننده و فرض مستقل بودن حساسیت‌های جریان از انحراف‌ها به دست می‌آید. این فرض در محدوده مفید یک گالوانومتر خوب و مدرن (بیش از 1/10 انحراف تمام مقیاس) با دقت بسیار بهتر از $\pm 2\%$ صحیح است؛ این مقدار برای تقویت کننده جریان dc احتمالاً 1/3 انحراف مقیاس است. خطای RS به نوع مقاومت مورد استفاده بستگی دارد، اما مقاومت‌های 1 MV با حد خطایی تا 0.1 % در دسترس هستند. با گالوانومتر یا تقویت کننده جریان d-c دارای حساسیت 10 nA برای انحراف تمام مقیاس، اعمال 500 V به مقاومت TV 5 موجب انحرافی برابر 1 % می‌شود. در این ولتاژ، با مقاومت استاندارد ذکر شده و $F_s = 10^5$ ، مقدار ds تقریباً نصف انحراف تمام مقیاس خواهد بود و خطای قابلیت قرائت بیش از $\pm 1\%$ نیست. اگر dx تقریباً برابر 1/4 انحراف تمام مقیاس باشد، خطای قابلیت قرائت از $\pm 4\%$ بیشتر نمی‌شود و مقاومتی در حدود GV 200 با حداکثر خطای 5/12 % قابل اندازه گیری است.

7.5.2.4 نرخ تغییر ولتاژ—دقت اندازه گیری مستقیماً با دقت اندازه گیری ولتاژ اعمال شده و نرخ تغییر زمانی قرائت الکترومتر متناسب است. مدت زمانی که کلید الکترومتر باز است و مقیاس مورد استفاده باید به گونه‌ای انتخاب شوند که زمان با دقت اندازه گیری شود و قرائت تمام مقیاس به دست آید. تحت این شرایط، دقت با دقت سایر روش‌های اندازه گیری جریان قابل مقایسه خواهد بود.

7.5.2.5 پل مقایسه‌ای—هنگامی که آشکارساز حساسیت کافی داشته باشد، حداکثر خطای درصدی مقاومت محاسبه شده برابر مجموع خطاهای درصدی بازوهای A، B و N است. با حساسیت آشکارساز برابر 1 mV/scale division، اعمال 500 V به پل و $R_N = 1\text{ GV}$ ، مقاومتی برابر TV 1000 انحرافی معادل یک تقسیم مقیاس در آشکارساز ایجاد می‌کند. با فرض ناچیز بودن خطاهای RA و RB، در صورتی که $R_N = 1\text{ GV}$ با دقت $\pm 2\%$ معلوم باشد و پل تا یک تقسیم مقیاس آشکارساز متعادل شده باشد، مقاومت TV 100 با حداکثر خطای $\pm 6\%$ قابل اندازه گیری است.

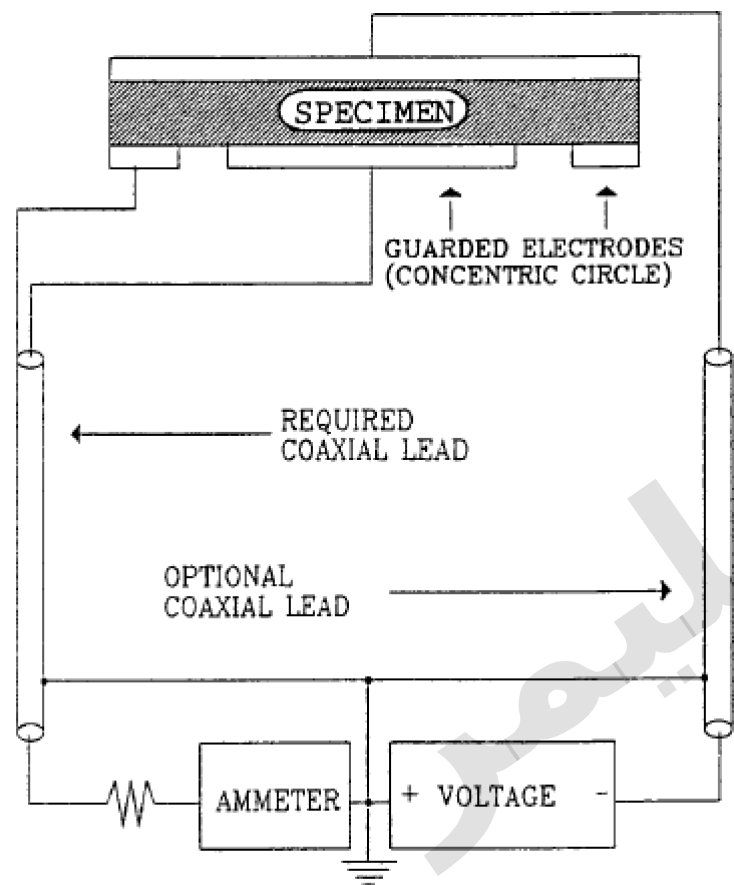


FIG. 9 Connections to Guarded Electrode for Volume and Surface Resistivity Measurements (Volume Resistance hook-up shown)

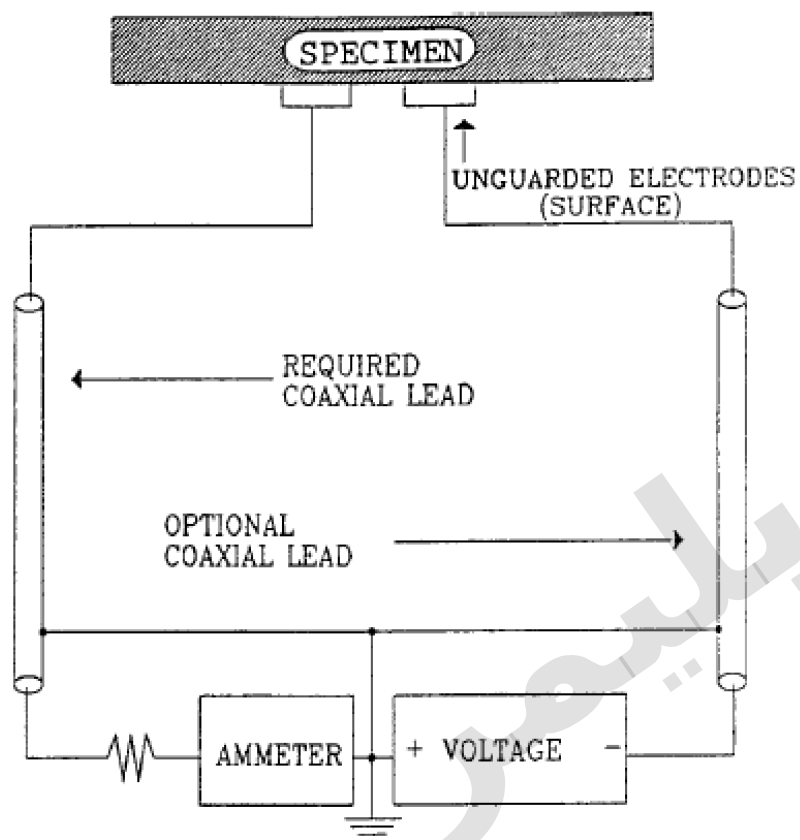


FIG. 10 Connections to Unguarded Electrodes for Volume and Surface Resistivity Measurements (Surface Resistance Hook-Up Shown)

TABLE 2 Apparatus and Conditions for Use

Method	Reference		Maximum Ohms Detectable at 500 V	Maximum Ohms Measurable to $\pm 6\%$ at 500 V	Type of Measurement	Ohms Shunted by Insulation Resistance from Guard to Guarded Electrode
	Section	Figure				
Voltmeter-ammeter (galvanometer)	X3.1	Fig. X1.1	10^{12}	10^{11}	deflection	10^2 to 10^6
Comparison (galvanometer)	X3.4	Fig. X1.3	10^{12}	10^{11}	deflection	10^2 to 10^6
Voltmeter-ammeter (dc amplification, electrometer)	X3.2	Fig. X1.2(a) (Position 1)	10^{15}	10^{13}	deflection	10^2 to 10^9
		Fig. X1.2(a) (Position 2)	10^{15}	10^{13}	deflection	10^2 to 10^9
		Fig. X1.2(b)	10^{17}	10^{15}	null	10^3 to 10^{11}
		Fig. X1.2(b)	10^{17}	10^{15}	null	0 (effective)
Comparison (Wheatstone bridge)	X3.5	Fig. X1.4	10^{15}	10^{14}	null	10^5 to 10^6
Voltage rate-of-change	X3.3	Fig. X3.1	$\sim 100 \text{ M}\Omega\cdot\text{F}$		deflection	unguarded
Megohmmeter (typical)	commercial instruments		10^{15}	10^{14}	direct-reading	10^4 to 10^{10}

7.6 چندین تولیدکننده می‌توانند قطعات موردنیاز یا سیستم‌های اختصاصی لازم برای برآورده کردن الزامات این روش را تأمین کنند. برای مشاهده فهرست شرکت‌هایی که اطلاعات مربوط به محصولات دستگاه‌های خود ارائه کرده‌اند، به پایگاه داده تجهیزات مراجعه کنید.

نمونه‌برداری

8.1 برای دستورالعمل‌های نمونه‌برداری به مشخصات مواد قابل‌اعمال مراجعه کنید.

نمونه‌های آزمون

9.1 تعیین مقاومت عایقی یا رسانایی:

9.1.1 اندازه‌گیری زمانی بیشترین ارزش را دارد که نمونه آزمون دارای شکل، الکترودها و روش نصب موردنیاز در کاربرد واقعی باشد. پوشش‌نگ‌ها، کابل‌ها و خازن‌ها نمونه‌های معمولی هستند که در آن‌ها الکترودهای آزمون بخشی از نمونه آزمون و روش نصب عادی آن محسوب می‌شوند.

9.1.2 برای مواد جامد، نمونه آزمون می‌تواند هر شکل عملی داشته باشد. رایج‌ترین شکل‌های نمونه آزمون عبارت‌اند از صفحات تخت، نوارها، میله‌ها و لوله‌ها. آرایش الکترودی شکل 2 را می‌توان برای صفحات تخت، میله‌ها یا لوله‌های سختی که قطر داخلی آن‌ها حدود 20 mm یا بیشتر است به کار برد. آرایش الکترودی شکل 3 برای نوارهای ماده ورقه‌ای یا نوار انعطاف‌پذیر قابل استفاده است. برای نمونه‌های آزمون نواری سخت، ممکن است به تکیه‌گاه

فلزی نیاز نباشد. آرایش‌های الکترونی شکل 6 را می‌توان برای صفحات تخت، میله‌ها یا لوله‌ها به کار برد. مقایسه مواد هنگام استفاده از آرایش‌های الکترونی متفاوت، اغلب نتیجه قطعی ندارد و باید از آن اجتناب شود.

9.2 تعیین مقاومت یا رسانایی حجمی:

9.2.1 نمونه آزمون می‌تواند هر شکل عملی داشته باشد که در صورت نیاز امکان استفاده از الکترو سوسم را برای جلوگیری از خطای ناشی از اثرات سطحی فراهم کند. نمونه‌های آزمون می‌توانند به شکل صفحات تخت، نوارها یا لوله‌ها باشند. شکل‌های 4، 7 و 8 نحوه کاربرد و آرایش الکترونها را برای نمونه‌های آزمون صفحه‌ای یا ورقه‌ای نشان می‌دهند. شکل 5 مقطع diametral سه الکترو اعمال‌شده روی یک نمونه آزمون لوله‌ای را نشان می‌دهد که در آن الکترو شماره 1 الکترو اندازه‌گیری، الکترو شماره 2 الکترو گارد متشکل از یک حلقه در هر انتهای الکترو شماره 1 و دارای اتصال الکتریکی مشترک، و الکترو شماره 3 الکترو بدون گارد است (7، 8). برای موادی که نشی سطحی ناچیزی دارند و فقط برای مقاومت حجمی بررسی می‌شوند، استفاده از حلقه‌های گارد را حذف کنید. ابعاد مناسب و عمومی برای شکل 4، در مورد نمونه‌های آزمون با ضخامت 3 mm، به شرح زیر است: $D3 = 100\text{ mm}$ ، $D2 = 88\text{ mm}$ و $D1 = 76\text{ mm}$ ؛ یا به صورت جایگزین، $D2 = 38\text{ mm}$ ، $D3 = 50\text{ mm}$ و $D1 = 25\text{ mm}$. برای حساسیت معین، نمونه آزمون بزرگ‌تر امکان اندازه‌گیری دقیق‌تر مواد دارای مقاومت ویژه بالاتر را فراهم می‌کند.

9.2.2 ضخامت متوسط نمونه‌های آزمون را مطابق یکی از روش‌های موجود در روش‌های آزمون D374 مرتبط با ماده مورد آزمون اندازه‌گیری کنید. نقاط واقعی اندازه‌گیری باید به طور یکنواخت در سراسر ناحیه‌ای که قرار است توسط الکتروهای اندازه‌گیری پوشانده شود، توزیع شده باشند.

9.2.3 لازم نیست الکترونها دارای تقارن دایره‌ای نشان‌داده‌شده در شکل 4 باشند، هرچند این شکل معمولاً مناسب است. الکترو اندازه‌گیری (شماره 1) می‌تواند دایره‌ای، مربعی یا مستطیلی باشد؛ به گونه‌ای که در صورت نیاز، محاسبه مساحت مؤثر الکترو اندازه‌گیری برای تعیین مقاومت ویژه یا رسانایی حجمی به سادگی انجام شود. قطر الکترو دایره‌ای، ضلع الکترو مربعی یا کوتاه‌ترین ضلع الکترو مستطیلی باید حداقل چهار برابر ضخامت نمونه آزمون باشد. عرض فاصله باید به اندازه‌ای باشد که نشی سطحی میان الکتروهای شماره 1 و 2 موجب خطا در اندازه‌گیری نشود؛ این موضوع به ویژه برای دستگاه‌های دارای امپدانس ورودی بالا، مانند الکترومترها، اهمیت دارد. اگر فاصله برابر دو برابر ضخامت نمونه آزمون در نظر گرفته شود، همان گونه که در 9.3.3 پیشنهاد شده است، تا بتوان از نمونه آزمون برای تعیین مقاومت یا رسانایی سطحی نیز استفاده کرد، معمولاً می‌توان با دقت کافی فرض کرد که مساحت مؤثر الکترو شماره 1 تا مرکز فاصله امتداد دارد. اگر تحت شرایط خاص، تعیین مقدار دقیق‌تری برای مساحت مؤثر الکترو شماره 1 مطلوب باشد، تصحیح مربوط به عرض فاصله را می‌توان از پیوست X2 به دست آورد. الکترو شماره 3 می‌تواند هر شکلی داشته باشد، مشروط بر اینکه در تمام نقاط، از لبه داخلی الکترو شماره 2 حداقل به اندازه دو برابر ضخامت نمونه آزمون فراتر رود.

9.2.4 برای نمونه‌های آزمون لوله‌ای، الکتروود شماره 1 باید بخش خارجی نمونه آزمون را احاطه کند و طول محوری آن حداقل چهار برابر ضخامت دیواره نمونه آزمون باشد. ملاحظات مربوط به عرض فاصله همان موارد ذکر شده در 9.2.3 هستند. الکتروود شماره 2 از یک الکتروود حلقوی در هر انتهای لوله تشکیل می‌شود که دو بخش آن از طریق خارجی به یکدیگر متصل شده‌اند. طول محوری هر یک از این بخش‌ها باید حداقل دو برابر ضخامت دیواره نمونه آزمون باشد. الکتروود شماره 3 باید سطح داخلی نمونه آزمون را در طول محوری‌ای بپوشاند که از لبه‌های خارجی فاصله، حداقل به اندازه دو برابر ضخامت دیواره، فراتر رود. نمونه آزمون لوله‌ای (شکل 5) می‌تواند به شکل سیم یا کابل عایق‌دار باشد. اگر طول الکتروود بیش از 100 برابر ضخامت عایق باشد، اثر انتهای الکتروود اندازه‌گیری ناچیز می‌شود و رعایت فاصله‌گذاری دقیق الکتروودهای گارد ضروری نیست. بنابراین، فاصله میان الکتروودهای شماره 1 و 2 می‌تواند چند سانتی‌متر باشد تا هنگام استفاده از آب به عنوان الکتروود شماره 1، مقاومت سطحی کافی میان این الکتروودها ایجاد شود. در این حالت، برای عرض فاصله هیچ تصحیحی انجام نمی‌شود.

9.3 تعیین مقاومت یا رسانایی سطحی:

9.3.1 نمونه آزمون می‌تواند هر شکل عملی متناسب با هدف خاص آزمون، مانند صفحه تخت، نوار یا لوله، داشته باشد.

9.3.2 آرایش‌های شکل 2 و شکل 3 برای مواردی طراحی شده‌اند که مقاومت حجمی نسبت به مقاومت سطحی زیاد باشد (2). با این حال، ترکیب سطوح قالب‌گیری شده و ماشین‌کاری شده باعث می‌شود نتیجه به دست آمده برای نمونه‌های آزمون نواری سخت، معمولاً قطعی نباشد. آرایش شکل 3 هنگامی رضایت‌بخش‌تر است که برای نمونه‌های آزمونی به کار رود که عرض آن‌ها بسیار بیشتر از ضخامتشان است؛ زیرا در این حالت اثر لبه برش نسبتاً کوچک می‌شود. از این رو، این آرایش برای آزمون نمونه‌های آزمون نازک، مانند نوار، مناسب‌تر از آزمون نمونه‌های آزمون نسبتاً ضخیم است. آرایش‌های شکل 2 و شکل 3 را هرگز نباید بدون توجه کافی به محدودیت‌های ذکر شده قبلی، برای تعیین مقاومت یا رسانایی سطحی به کار برد.

9.3.3 سه آرایش الکتروودی شکل‌های 4، 6 و 7 را می‌توان برای مقایسه مواد به کار برد. مقاومت یا رسانایی فاصله سطحی میان الکتروودهای شماره 1 و 2 مستقیماً با استفاده از الکتروود شماره 1 به عنوان الکتروود اندازه‌گیری، الکتروود شماره 3 به عنوان الکتروود گارد و الکتروود شماره 2 به عنوان الکتروود بدون گارد تعیین می‌شود (7، 8). مقاومت یا رسانایی تعیین شده در واقع حاصل موازی مقاومت یا رسانایی سطحی میان الکتروودهای شماره 1 و 2 با بخشی از مقاومت یا رسانایی حجمی میان همان دو الکتروود است. در این آرایش، عرض فاصله سطحی، g ، باید تقریباً دو برابر ضخامت نمونه آزمون، t ، باشد؛ به جز برای نمونه‌های آزمون نازک که در آن‌ها g می‌تواند بسیار بیشتر از دو برابر ضخامت ماده باشد.

9.3.4 برای نمونه‌های آزمون بسیار نازکی که مقاومت ویژه حجمی آن‌ها آن قدر کم است که مقاومت حاصل کم میان الکتروود اندازه‌گیری و سیستم گارد موجب خطای بیش از حد می‌شود، ممکن است به تکنیک‌های ویژه و ابعاد خاص الکتروود نیاز باشد.

9.4 مقاومت عایقی مایعات—نمونه‌برداری از مواد عایق مایع، سلول‌های آزمون مورد استفاده و روش‌های تمیزکردن سلول‌ها باید مطابق روش آزمون D1169 انجام شود.

نصب نمونه آزمون

10.1 هنگام نصب نمونه‌های آزمون برای اندازه‌گیری، مهم است که هیچ مسیر رسانایی میان الکترودها یا میان الکترودهای اندازه‌گیری و زمین وجود نداشته باشد؛ زیرا چنین مسیرهایی می‌توانند بر قرائت دستگاه اندازه‌گیری اثر قابل‌توجه بگذارند (9). با پوشیدن دستکش‌های استات‌ریون از لمس سطوح عایق با انگشتان بدون پوشش خودداری کنید. برای آزمون‌های داوری مقاومت یا رسانایی حجمی، پیش از آماده‌سازی شرایط، سطوح را با حلال مناسب تمیز کنید. هنگام اندازه‌گیری مقاومت سطحی، درباره تمیزکردن یا تمیز نکردن سطوح توافق متقابل داشته باشید. در صورت نیاز به تمیزکاری، جزئیات هرگونه تمیزکردن سطح را ثبت کنید.

آماده‌سازی شرایط

11.1 نمونه‌های آزمون را مطابق Practice D6054 تحت شرایط محیطی مناسب قرار دهید.

11.2 محفظه‌های محیطی با هوای در حال گردش یا روش‌های شرح‌داده‌شده در Practices E104 یا D5032 برای کنترل رطوبت نسبی مفید هستند.

روش اجرا

12.1 مقاومت عایقی یا رسانایی—نمونه آزمون را به‌درستی در محفظه آزمون نصب کنید. اگر محفظه آزمون و محفظه آماده‌سازی شرایط یکسان هستند (روش پیشنهادی)، نمونه‌های آزمون باید پیش از آغاز آماده‌سازی شرایط نصب شوند. اندازه‌گیری را با دستگاه مناسبی که حساسیت و دقت موردنیاز را داشته باشد انجام دهید (به پیوست X3 مراجعه کنید). مگر آنکه خلاف آن مشخص شده باشد، زمان برق‌دارشدن را 60 s و ولتاژ اعمالی را 500 ± 5 V در نظر بگیرید.

12.2 مقاومت ویژه یا رسانایی حجمی—ابعاد الکترودها و عرض فاصله گارد، g، را اندازه‌گیری و ثبت کنید. مساحت مؤثر الکترودها را محاسبه کنید. اندازه‌گیری مقاومت را با دستگاه مناسبی که حساسیت و دقت موردنیاز را داشته باشد انجام دهید. مگر آنکه خلاف آن مشخص شده باشد، زمان برق‌دارشدن را 60 s و ولتاژ مستقیم اعمالی را 500 ± 5 V در نظر بگیرید.

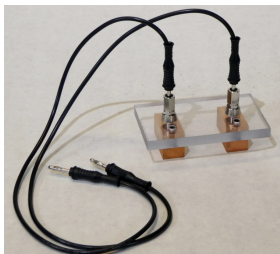
12.3 مقاومت یا رسانایی سطحی:

- 12.3.1 ابعاد الکترودها و فاصله میان آنها، g ، را اندازه‌گیری کنید. مقاومت یا رسانایی سطحی میان الکترودهای شماره 1 و 2 را با دستگاه مناسبی که حساسیت و دقت موردنیاز را داشته باشد اندازه‌گیری کنید. مگر آنکه خلاف آن مشخص شده باشد، زمان برق‌دارشدن را 60 s در نظر بگیرید و ولتاژ مستقیم $500 \pm 5 \text{ V}$ اعمال کنید.
- 12.3.2 هنگام استفاده از آرایش الکترودی شکل 3، P به عنوان محیط مقطع نمونه آزمون در نظر گرفته می‌شود. برای نمونه‌های آزمون نازک، مانند نوارها، این محیط عملاً به دو برابر عرض نمونه آزمون کاهش می‌یابد.
- 12.3.3 هنگام استفاده از آرایش‌های الکترودی شکل 6، اگر مشخص باشد که مقاومت حجمی در مقایسه با مقاومت سطحی بسیار زیاد است (مانند رطوبت آلوده‌کننده سطح یک ماده عایق خوب)، P برابر دو برابر طول الکتروود یا دو برابر محیط استوانه در نظر گرفته می‌شود.

محاسبه

- 13.1 مقاومت ویژه حجمی، $[\rho] \text{V}$ ، و رسانایی حجمی، $[\gamma] \text{V}$ ، را با استفاده از معادلات جدول 1 محاسبه کنید.
- 13.2 مقاومت ویژه سطحی، $[\rho] \text{S}$ ، و رسانایی سطحی، $[\gamma] \text{S}$ ، را با استفاده از معادلات جدول 1 محاسبه کنید.





دستگاه آزمون مقاومت ویژه حجمی و سطحی برای نمونه‌های تخت

- ولتاژ تا 500V یا 1000 V بنا بر درخواست مشتری
- الکتروود نمونه برای نمونه‌های تخت مطابق ASTM D257
- سایر سیستم‌های الکتروودی بنا بر درخواست مشتری قیمت‌گذاری خواهند شد
- تصویر فقط برای ارجاع است؛ دستگاه مناسب بر اساس معیارهای آزمون انتخاب خواهد شد
- ویدئوی آموزشی included