

II - حفاظت از خطرات جریانهای الکتریکی

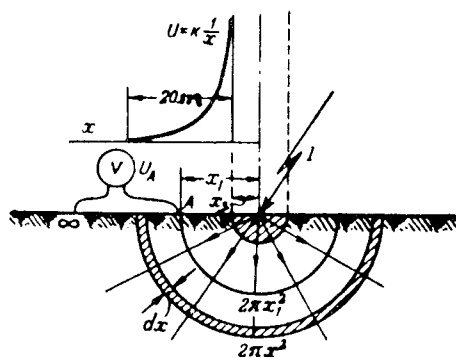
نوشته :

پرویز ذواشتیاق

دانشیار دانشکده فنی

در قسمت اول مقاله‌ای که در شماره (۱۲) نشریه دانشکده فنی منتشر شد شمه‌ای از حفاظت در مقابل برق‌زدگی ذکر گردید، اینک در ادامه مطالب حوادثی که عبور جریان از زمین ممکن است ببارمی‌آورد ذکر میشود :

در صورت خرابی عایق و اتصال سیم برق بزمین وضع عادی شبکه بهم خورده و فشار الکتریکی بین سیمها تغییر می‌نماید و در نتیجه در نقاط مختلف زمین اختلاف پتانسیل بوجود می‌آید. برای سادگی مطالب فرض می‌کنیم از الکتروود نیم‌کره‌ی جریانی در زمین پخش میگردد (ش ۱).



ش ۱

میتوان فرض نمود که خطوط پخش جریان در امتداد اشعه از مرکز نیمکره باشد و تراکم جریان در فاصله‌ای از مرکز نیمکره مساوی خواهد بود با :

$$j = \frac{I_t}{2\pi x^2}$$

طبق قانون اهم داریم :

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho}$$

$$\vec{E} = -\text{grad}\phi = \vec{j}\rho$$

که در آن ρ مقاومت مخصوص زمین است (ρ برحسب Ωcm سنجیده میشود).
افت فشار الکتریکی در لایه‌ای از dx مساوی خواهد بود با :

$$dU = E dx = j \rho dx = \frac{I_t}{2\pi x^2} \rho dx$$

پتانسیل نقطه A یعنی اختلاف سطح بین نقطه A و نقطه بی نهایت دور که پتانسیل آن صفر فرض میشود عبارتست از :

$$(1) \quad \phi_A = V_A = \int_{x_1}^{\infty} dU = \frac{I_t \cdot \rho}{2\pi} \int_{x_1}^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{I_t \cdot \rho}{2\pi x_1}$$

ماکزیمم پتانسیل در روی سطح الکتروود خواهد بود که مقدار آن مساوی است با :

$$(2) \quad U_t = \frac{I_t \cdot \rho}{2\pi x_p}$$

x_p شعاع نیمکره است. اگر رابطه (1) را به (2) تقسیم کنیم خواهیم داشت :

$$\frac{U_A}{U_t} = \frac{x_p}{x_1}$$

یا

$$U_A = U_t \cdot x_p \frac{1}{x_1}$$

و اگر :

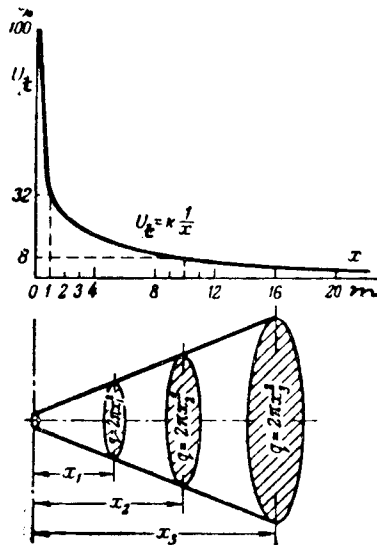
$$U_t x_p = k$$

فرض شود خواهیم داشت :

$$U_A = \frac{k}{x}$$

آزمایش نشان میدهد که منحنی پخش پتانسیل الکتروود نیمکره‌ای نزدیک به هذلولی است اگر الکتروود بشکل میله ، لوله ، صفحه و غیره باشد در صورتیکه نقاط خیلی نزدیک بآنها را منظور داریم منحنی پخش پتانسیل تقریباً همان شکل را خواهد داشت علت آن هدایت خاك است که برای عبور جریان نسبت بفاصله مقطع بتوان دو تغییر میکند (ش 2). بزرگترین مقاومت برای عبور جریان در نزدیکی الکتروود است که در آنجا از مقطع کمی جریان عبور کرده و در این نقاط افت فشار الکتریکی بیشتری وجود دارد. با دور شدن

از الکتروود مقطع خالك ناقل زيادتر گشته و مقاومت آن نسبت به جريان كم ميشود و افت فشار الكتريكي نيز نقصان مي پذيرد. چنانكه در شكل ۲ ديده ميشود ۶۸ درصد كل فشار الكتريكي در فاصله يكه متری بكار



ش ۲

الکتروود ، ۶۸ درصد بين متر دوم و انتهای متر نهم ، ۸ درصد بين متر نهم و متر بيستم ميباشد. ميتوان گفت پتانسيل نقطه‌ای که از محل اتصال برمين در فاصله ۲ متری قرار گرفته تقريباً صفر است.

مقاومت برای عبور جريان در فاصله dx را ميتوان نوشت :

$$dR_o = \rho \frac{dx}{2\pi x^2}$$

مقاومت كل برای عبور جريان از الکتروود نیمکروی عبارت خواهد بود :

$$R_o = \int_{x_3}^{\infty} dR_o = \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi x^3}$$

با در نظر گرفتن رابطه (۲) خواهيم داشت :

$$R_o = \frac{U_t}{I_t}$$

فشار الكتريكي نسبت بزمين :

فشار الكتريكي دستگاههای برقی نسبت بزمين عبارت از فشاری است که بين اين قسمت و زمين وجود دارد (پتانسيل زمين صفر فرض ميشود) اگر باتری‌ای با اختلاف سطح U_{AB} داشته باشيم و آنرا بدو نقطه a و b از زمين وصل کنيم که فاصله اين دو نقطه بيشتري از ϵ متر باشد شدت جريانی که از زمين عبور ميکند I_t فرض شود (ش ۳) در مسير جريان دو نوع مقاومت خواهيم داشت :

R_1 - مقاومت برای عبور جريان در محل ورودی جريان

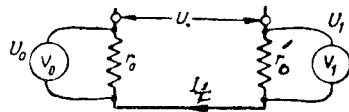
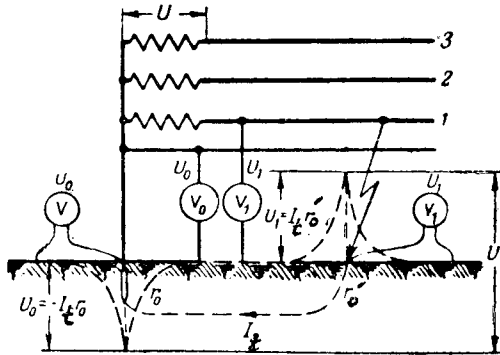
R_2 - مقاومت برای عبور جريان در محل خروجی جريان

مقداری از فشار الكتريكي U_{AC} در مقاومت R_1 و مقدار ديگر آن U_{BC} در R_2 صرف خواهد شد.

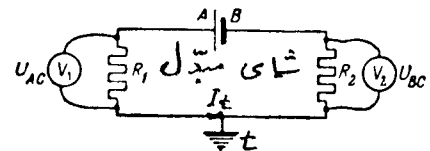
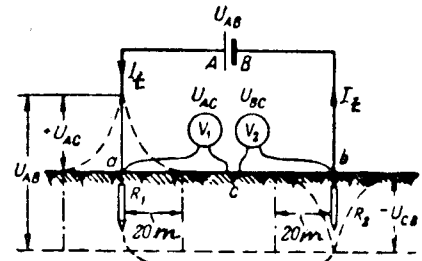
اگر مقاومت سیمهای اتصالی Aa و Bb را منظور نکنیم فشار الکتریکی باتری نسبت بزمین مساوی خواهد بود با :

$$U_A = U_{AC} = I_t R_1$$

$$U_B = U_{BC} = -U_{CB} = -I_t R_2$$



ش ۴



ش ۳

اگر مدار ۳ فاز مطابق (ش ۳) داشته باشیم که یکی از فازهای آن بزمین متصل شود و مقاومت درمحل اتصال r_0 و مقاومت زمین مصنوعی (الکتروود) r_0 باشد میتوان مثل حالت بالا نوشت :

$$U_1 = I_t r_0'$$

$$U_0 = -I_t r_0$$

در صورتیکه از سنجش I_t و U_0 و U_1 را داشته باشیم میتوانیم مقاومتها را حساب کنیم :

$$r_0' = \frac{U_1}{I_t}$$

$$r_0 = \frac{U_0}{I_t}$$

و

فشار الکتریکی تماسی :

در نتیجه تماس به قسمتهای برقی اگر از بدن انسان جریانی عبور نماید در مسیر جریان علاوه بر مقاومت بدن مقاومتهای دیگری بطور متوالی قرار گرفته اند قسمتی از فشار الکتریکی که به بدن شخص اثر میکند فشار الکتریکی تماسی نامیده میشود :

$$U_h = I_h \times R_h$$

I_h - شدت جریان عبوری از بدن انسان

R_h - مقاومت بدن است

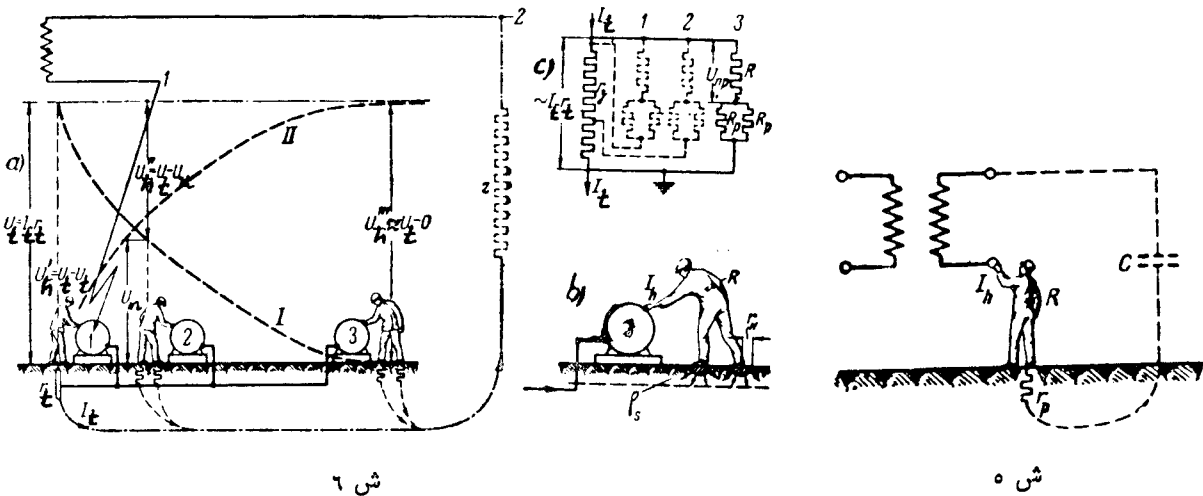
اگر مطابق (ش ۵) شخصی با یکی از سیمهای ترانسفورماتور ۳۰ کیلوولتی تماس پیدا کند بفرض اینکه مقاومت بدن ۱۰۰ اهم و زیر پا را ۱۰۰ اهم فرض کنیم و ظرفیت :

$$C = 0.03 \mu F$$

باشد فشار تماس مساوی خواهد بود با :

$$V_h = I_h R_h = \frac{30000 \times 1000}{\sqrt{(1000 + 100)^2 + \left(\frac{10^6}{2\pi \times 50 \times 0.03}\right)^2}} = 300 \text{ اهم}$$

فشار تماس درحالتیکه در مسیر جریان چندین الکتروود وجود داشته باشد کمی در هم میباشد (ش ۶)



در شکل ۶ بدنه موتورهای الکتریکی ۱ و ۲ و ۳ بزمین مصنوعی با مقاومت \$R_t\$ متصل شده‌اند . اگر در موتور (۱) اتصال بدنه باشد دیگر نسبت بزمین اختلاف سطحی معادل :

$$U_t = I_t R_t$$

پیدا مینماید .

هرگاه شخصی به بدنه یکی از موتورهای سالم دست بزند تحت فشار الکتریکی \$U_t\$ نسبت بزمین قرار میگیرد پاهای شخص که با زمین در تماس میباشند دارای پتانسیل این نقاط از زمین یعنی \$U_n\$ خواهند بود یعنی شخص در تحت فشار الکتریکی (\$U_t - U_n\$) قرار میگیرد . اگر مقاومت عبور جریان از سطح زمین را منظور نکنیم ، این اختلاف سطح در حقیقت همان فشار تماسی خواهد بود یعنی :

$$U_h = U_t - U_n$$

دیده میشود هر قدر از محل اتصالی دورتر شویم فشار تماسی از دیاد پیدا نموده و در فاصله تقریباً ۲ متری نزدیک به \$U_t\$ میگردد (منحنی II از ش ۶) ، دستهای شخصی که با بدنه موتور (۱) تماس پیدا کند تمام پتانسیل \$U_t\$ را گرفته و چون پاها نیز همان پتانسیل را دارند پس فشار تماسی در این محل مساوی صفر خواهد بود یعنی :

$$U_h = U_t - U_t = 0$$

در صورتیکه تماس به بدنه موتور (۳) فشار تماسی زیر را خواهد داشت :

$$U_h = U_t - 0 = U_t$$

در حالت کلی [مثلاً تماس به بدنه موتور (۲)] فشار تماسی مساوی خواهد بود با :

$$U_h = \alpha_1 U_p$$

α_1 - ضریب تماس میباشد که تغییرات منحنی پتانسیل را منظور میکند :

$$0.1 < \alpha_1 < 1$$

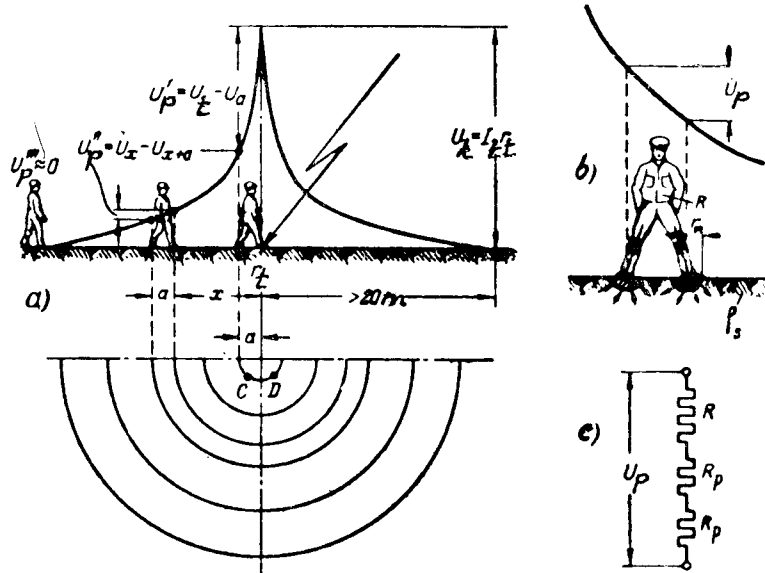
حد مجاز برای فشار تماسی نسبت به شرایط حفاظت فرق میکند در بعضی از مالکک برای محلتهائی

که چندان خطری وجود ندارد ۶۵ ولت برای محلتهای پرخطر ۳۶ ولت و برای محلتهای خیلی پرخطر ۱۲ ولت منظور میکنند.

فشار الکتریکی گامی :

در (ش ۷) منحنی پخش پتانسیل در نقطه اتصالی یکی از سیمها بزمین داده شده فشار الکتریکی

زمین را در فاصله بیش از ۲ متر تقریباً مساوی صفر فرض میکنیم اگر شخص در نقاطی از منحنی که با هم



ش ۷

اختلاف سطحی دارند قرار بگیرد پاها تحت فشاری قرار میگیرند که آنها فشار گامی نامند (گام را در محاسبات ۸.۰ متر میگیرند).

$$V_p = U_x - U_{x+a} = \frac{I\rho}{2\pi} \int_{x+a}^x \frac{dx}{x^2} = \frac{I \cdot \rho \cdot a}{2\pi x(x+a)}$$

چنانکه دیده میشود هر قدر از محل اتصالی (الکتروود) دورتر برویم فشار گامی کمتر میگردد. فشار گامی بین دو نقطه C و D که هم پتانسیل هستند مساوی صفر خواهد بود.

از مطالبی که قبلاً ذکر شد میتوان چنین نتیجه گرفت که تغییرات فشار گامی و فشار تماسی معکوس هم میباشند. جائیکه یکی صفر میگردد دیگری بحد اعلاى خود میرسد.

برای فشار گامی حد مجازی تعیین نشده است، ولی نباید تصور کرد که این فشار الکتریکی خطرناک نیست. اگر فشار الکتریکی گامی بین ۱۰۰-۲۰ ولت باشد انقباض عضلات پا باعث سقوط شخص بزمین می شود.

در اینموقع علاوه بر اینکه مقدار فشار الکتریکی وارده به بدن شخص بالا میرود جریان نیز از گره اصلی دستها - پاها عبور مینماید. به تجربه دیده شده است که در مدت تأثیر خیلی کوتاه (مثلاً ۲ ثانیه) از فشار گامی شخص بزمین سقوط کرده و دچار برق زدگی شده است.

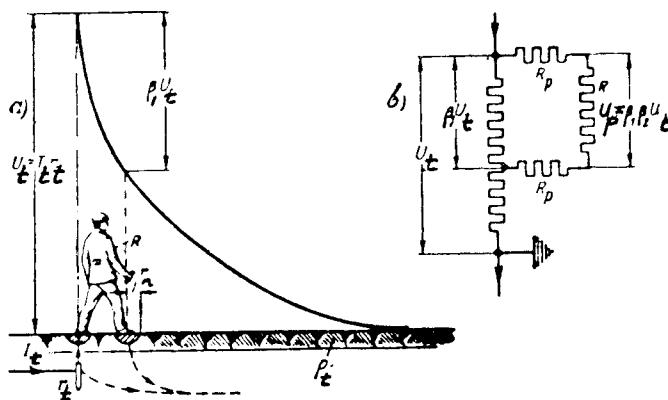
برای جلوگیری از تأثیر فشار گامی، هم پتانسیل نمودن، پوشیدن کفشهای عایق لاستیکی و غیره توصیه میشود.

میتوان حد مجاز فشار گامی را محاسبه نمود جریانی که از گره پائین (پا - پا) عبور میکند مساوی

است با :

$$I = \frac{V_p}{rR_p + R}$$

R - مقاومت بدن و R_p مقاومت زیر پائی انسان است (ش ۷ - b).



ش ۸

$$U_p = I(rR_p + R) \times 1$$

$$R_p = \frac{\rho_s \cdot r_n}{\pi \cdot r_n^2} = \frac{\rho_s}{\pi r_n}$$

ρ_s - مقاومت مخصوص لایه سطحی خاک است.

$$U_p = I \left(\frac{\rho_s}{\pi r_n} + R \right)$$

دیده میشود که فشار گامی بستگی به مقاومت مخصوص لایه سطح خاک ρ_s دارد. اگر:

$$I = 0.05 \text{ A}$$

فرض شود (مقدار حد مجاز جریانی که از گره پا - پا عبور مینماید هنوز تعیین نشده است). اگر:

$$R = 1000 \Omega \text{ و } r_n = 7 \text{ cm}$$

باشد خواهیم داشت:

$$U_p \approx \frac{\rho_s}{2000} + 0.0$$

برای فشار گامی میتوان رابطه‌ای مشابه فشار تماسی نوشت:

$$U_p = \beta_1 \beta_2 U_t = \beta U_t$$

β_1 - ضریب تماس گامی است که بستگی به وضع تغییرات منحنی پخش پتانسیل دارد.

β_2 - ضریب تماس گامی است که بستگی به وضع عبور جریان از خاک زیر پا دارد.

مقدار β_1 را از روی جدول مخصوص:

$$0.1 < \beta_1 < 0.15$$

و مقدار β_2 را با در نظر گرفتن شکل ۸ میتوان پیدا نمود.

$$U_p = \frac{R}{2R_p + R} (\beta_1 U_t) = \beta_2 (\beta_1 U_t)$$

که در آنجا:

$$\beta_2 = \frac{R}{2R_p + R}$$

است. با در نظر گرفتن مقدار R_p خواهیم داشت:

$$\beta_2 = \frac{1}{1 + \frac{\rho_s}{\pi r_n R}}$$

تحلیل شرایط حفاظت در شبکه‌های ساده:

حالت ساده شبکه‌های یک فاز متناوب و جریان دائم میباشد، تماس بدو سیم خیلی بندرت اتفاق

میافتد ممکن است در صورتیکه سیمکشی بدون دستکش لاستیکی تحت فشار الکتریکی مشغول کار باشد و به

یکی از سیمها که در تماس است به سیم دیگر با سر - گوش - آرنج دست دیگر تماس حاصل کند در آن موقع

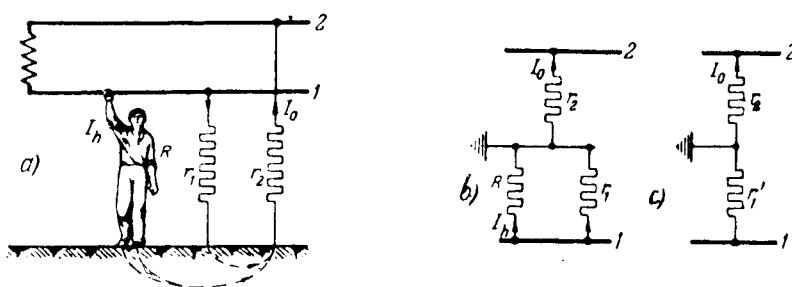
جریانی هم از بدن کارگر عبور مینماید که شدت آن مساویست با:

$$I_h = \frac{V}{R}$$

در این حالت کفشهای لاستیکی و عایق زیرپایی مانع برق زدگی نخواهند بود.

حالتی که معمولاً با تماس به یک سیم ایجاد میشود در زیر شرح داده میشود (ش ۹):

اگر r_1 و r_2 مقاومت عایقهای سیمهای (۱) و (۲) باشند و مقاومت شخصی اینکه به سیم (۱) دست میزند R فرض شود داریم :



ش ۹

$$r' = \frac{Rr_1}{R+r_1}$$

$$I_0 = \frac{U}{r'_1 + r_2}$$

فشاریکه به بدن شخص وارد میشود خواهد بود :

$$U_1 = I_0 r'_1$$

جریانی که از بدن شخص میگذرد خواهد بود :

$$I_h = \frac{U_1}{R} = \frac{U r'_1}{R(r'_1 + r_2)} = \frac{U r_1}{R(r_1 + r_2) + r_1 r_2}$$

اگر :

$$r_1 = r_2 = r$$

فرض شود :

$$I_h = \frac{U}{2R+r}$$

شده و از این رابطه میتوان مقاومت عایق را پیدا نمود بفرض اینکه :

$$I_h = 0.01 \text{ A}$$

باشد :

$$r \geq 100 \text{ V} - 2R$$

برای شبکه ۲۲۰ ولتی در صورتیکه :

$$R = 1000 \Omega$$

باشد مقاومت عایق 20000Ω خواهد بود.

اگر مقاومت کف اتاق را که بطور متوالی با بدن انسان در مسیر جریان قرار میگیرد منظور کنیم

فرمول بالا بشکل زیر خواهد شد :

$$I_h = \frac{Vr_1}{(R+r')(r_1+r_2)+r_1r_2}$$

r' - مقاومت کف اطاق میباشد.

با در نظر گرفتن :

$$r_1 = r_2 = r$$

میتوان نوشت :

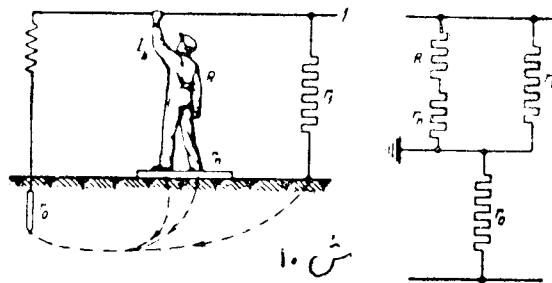
$$I_h = \frac{V}{r(R+r') + r}$$

در شکل ۱۰ تماس به مدار تراموای - قطار برقی و یا دستگاههای جوشکاری نشان داده شده است

r_0 - مقاومت زمین مصنوعی

r_1 - مقاومت عایق سیم (۱)

r_n - مقاومت کف اطاق است.



پس :

$$I_h = \frac{Ur_1}{(R+r_n)(r_1+r_0)+r_1r_0}$$

در غالب موارد مقاومت کف اطاق برای جلوگیری از برق زدگی اهمیت پیدا مینماید بطوریکه اگر

کف چوبی سالم و یا اسفالت بضخامت ۲۰mm داشته باشیم و سطح پاهای شخص را ۳۰×۳۰cm فرض کنیم این مقاومت به ۱MΩ - ۰٫۵ میرسد ولی در کارخانجات و محللهای کار اغلب به تمیزی کف اطاق دقت بعمل نمی آید و خرده های فلزی - مواد اسیدی و غیره این مقاومت را پائین می آورد . همچنین برای محدود نمودن شدت جریان - مقاومت کفش کارگر مؤثر است اگر کفش دارای تخت و پاشنه چرمی بدون میخ باشد نسبت به تر و خشک بودن چرم این مقاومت بین ۱۰۰ تا ۸۰۰۰۰ اهم فرق میکند .

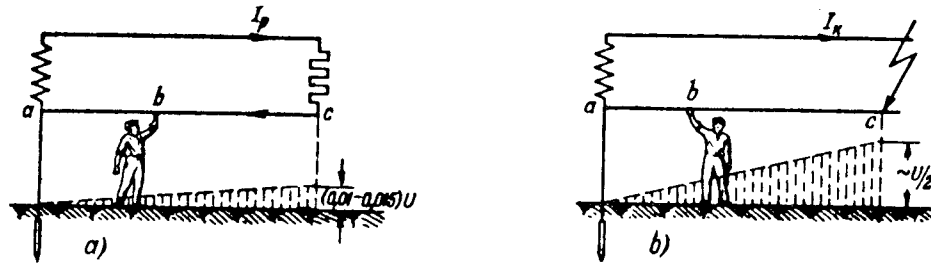
در (ش ۱۱) مدار یکنواز دو سیمه نشان داده شده و فشار تماس شخصی نسبت بمحلی که نزدیک

بمنبع و یا دورتر از آن باشد از رابطه زیر محاسبه میشود :

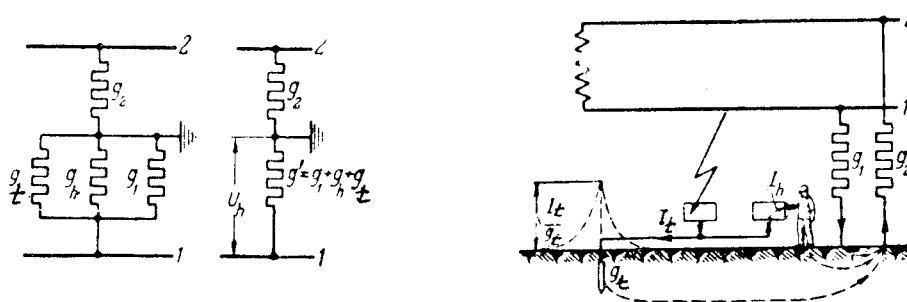
$$V_h = V_{ab} = I_p r_{ab}$$

I_p - شدت جریان مدار و r_{ab} مقاومت سیم در قسمت ab است .

در حالت عادی اگر نقطه b دورتر از منبع باشد (ش ۱۱ - a) فشار الکتریکی از o درصد فشار کل بالا نمی‌رود و خطر برق‌زدگی وجود ندارد ولی در صورت اتصال کوتاه (ش ۱۱ - b) این خطر بوجود می‌آید.



ش ۱۱



ش ۱۲

زمین کردن :

بدنه فلزی ماشینهای الکتریکی - ترانسفورماتورها و سایر دستگاههای برقی بدون برق هستند در صورت خرابی عایق فشار الکتریکی به بدنه متصل شده و اگر شخص تماس به بدنه داشته باشد دچار برق‌زدگی میشود. جهت حفاظت بدنه دستگاههای برقی را زمین میکنند. چنانکه از (ش ۱۲) دیده میشود شخص با هدایت g_h با بدنه دستگاه برقی تماس پیدا مینماید. اگر هدایت عایقهای سیمهای (۱) و (۲) بترتیب g_1 و g_2 و زمین مصنوعی g_t فرض شود خواهیم داشت :

$$g' = g_1 + g_h + g_t$$

$$g = \frac{g_1 g_2}{g' + g_2} = \frac{(g_1 + g_h + g_t) g_2}{g_1 + g_2 + g_h + g_t}$$

اگر فشار الکتریکی که به بدن شخص اثر میکند U_h باشد خواهیم داشت :

$$\frac{U_h}{U} = \frac{g}{g'} = \frac{(g_1 + g_h + g_t) g_2}{(g_1 + g_2 + g_h + g_t)(g_1 + g_h + g_t)}$$

$$U_h = \frac{U g_2}{g_1 + g_2 + g_h + g_t}$$

$$I_h = U_h g_h = \frac{U g_2 g_h}{g_1 + g_2 + g_h + g_t}$$

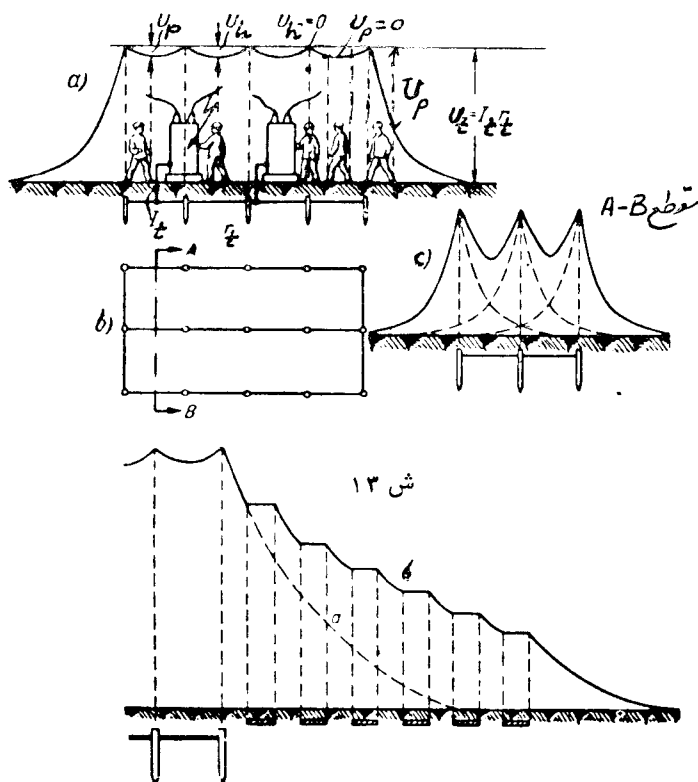
اگر درمخرج کسر g_t و g_h و g_t را که نسبت به g_t مقادیر زیادی دارند منظور نکنیم خواهیم داشت:

$$I_h = \frac{U_{g_t} g_h}{g_t}$$

از این رابطه میتوان گفت که برای تقلیل شدت جریان از بدن انسان یا بایستی g_h و g_t را کم کرد و یا g_t را بیشتر نمود. ازدیاد g_t ساده تر است بدین طریق بین زمین و بدنه دستگاههای برقی هدایت الکتریکی را بیشتر نموده و مخاطره برق زدگی را از بین میبرند.

قبلا ذکر شد که فشارهای تماسی و گامی خطر برق زدگی را دارند و مقادیر آنها نباید از حدی تجاوز نماید بعلاوه این دور فشار طوری هستند که در نزدیکی الکتروود (زمین مصنوعی) فشار تماسی U_h کم شده و فشار گامی U_p زیادتر میباشد در صورتیکه هر قدر از الکتروود دورتر شویم عکس مسئله پیش میآید.

اگر بخواهیم مقدار هردو فشار را پائین بیاوریم بایستی مدار بسته ای از چند الکتروود داشته باشیم (ش ۱۳ - b و c) چنانکه در (ش ۱۳) دیده میشود در خارج از مدار فشار گامی زیادتر و برای اینکه منحنی



ش ۱۴

بخش پتانسیل مسطح شود در زیر زمین شمش هائی از فولاد قرار میدهند که با مدار اصلی (زمین مصنوعی) رابطه مستقیمی ندارد و بخش پتانسیل از وضع a به وضع b در (ش ۱۴) درمیآید که بدون مخاطره میباشد.

ایجاد زمین مصنوعی :

معمولا از لوله های فولادی آبرسانی ، قسمتهای فلزی ساختمان که تماس خوبی با زمین دارند و یا بدنه فلزی برای زمین کردن دستگاههای برقی استفاده میکنند این نوع الکترودها را الکترودهای طبیعی مینامند البته بایستی دقت نمود که از بدنه لوله هائی که دارای گازهای محترقه و یا مایعات داغ هستند بهیچوجه بعنوان الکتروده استفاده نشود .

زمین مصنوعی که با قرار دادن لوله - تسمه - صفحه فلزی در زیر خاک مرطوب ایجاد میشود شرائطی بشرح زیر دارد :

لوله های فولادی که بطول ۲ تا ۳ متر میباشدند قطر آنها بین ۵-۳۰ میلیمتر خواهد بود وضخامت دیوار لوله نباید کمتر از ۰۳ میلیمتر باشد . مقطع تسمه فولادی نباید کمتر از ۸ میلیمتر مربع وضخامت آن کمتر از ۴ میلیمتر باشد . تمامی الکترودها با تسمه هائی که بهم متصل میکنند بایستی جوشکاری شده باشد . مقاومت الکترودهای مختلف از فرمولهای زیر محاسبه میشود :

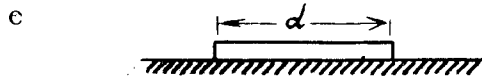
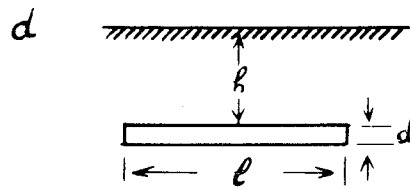
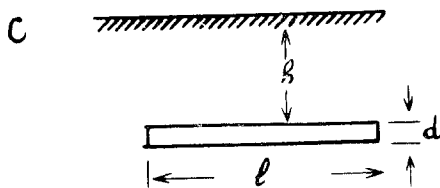
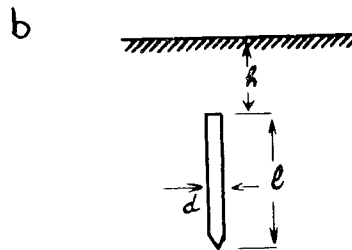
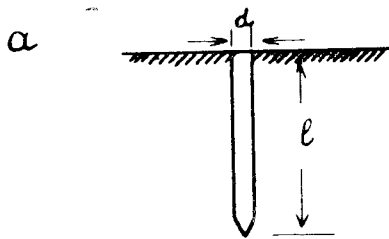
۱- اگر میله و لوله بشکل (ش ۱۰ a) در زمین بطور قائم قرار بگیرند :

در صورتیکه $l \geq d$ باشد :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

۲- اگر میله و یا لوله در عمق h از سطح زمین بطور قائم قرار بگیرند (شکل ۱۰ b) (بطول l و

ب قطر d) :



در صورتیکه $l \geq d$ و $\frac{h}{l} > 2$ باشد :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{h+1}{h-1} \right)$$

۳- اگر لوله و یا تسمه در عمق h از سطح زمین بطور افقی قرار بگیرند (شکل ۱۰ c). (b) عرض l طول و d قطر میباشد) :

بشرطیکه : $l \geq \frac{b}{2}$ و $\frac{1}{2} \geq \frac{l}{rh}$ باشد :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bh}$$

۴- اگر الکتروود حلقوی (تسمه - لوله) در عمق h از سطح زمین بطور افقی باشد (ش ۱۰ d) :

بشرطیکه : $\frac{1}{\pi} \geq \frac{l}{\pi}$ و $h \leq \frac{1}{2\pi}$ باشد :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2r^2 l^2}{bh}$$

۵- اگر الکتروود صفحه‌ای (دائره‌ای) در سطح زمین قرار بگیرد (قطر d) (ش ۱۰ e) :

$$R = \frac{\rho}{2\pi d}$$

ρ - مقاومت مخصوص خاک با ΩCm و ابعاد الکتروود نیز با Cm میباشد، اگر لوله‌ای بطول ۳ متر بقطر ۰-۲۰ میلی‌متر باشد مقاومت آن در زمین با خاک رس برطوبت کم 30Ω ، در زمین شن مرطوب 100Ω و در شن خشک 300Ω میشود .

همچنین صفحه‌ای با ابعاد $1 \text{m} \times 1 \text{m}$ در زمین خاک رس برطوبت کم 20Ω و در زمین شن مرطوب 120Ω و در شن خشک 200Ω است .

تسمه‌ای که در عمق ۰٫۵ متر از سطح خاک قرار بگیرد و طول آن ۲۰ متر باشد در زمین خاک رس برطوبت کم 8Ω و در شن مرطوب 40Ω و در شن خشک 80Ω مقاومت خواهد داشت .

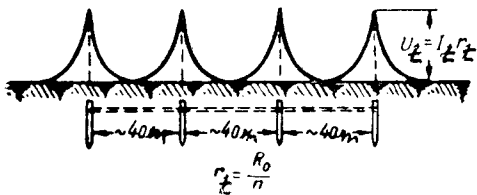
مقاومت الکتروودهای لوله‌ای و میله‌ای با ازدیاد طول آنها کمتر میشود ولی ازدیاد طول بیش از ۲-۳ متر چندان تغییری در مقاومت ایجاد نمیکند (ش ۱۶) و بهمین علت لوله‌هایی که طولشان بیش از ۳ متر باشد درجائی بکار میروند که احتیاج به تماس خوب با طبقات تحت‌الارضی باشد .

اگر تعداد الکتروودهای اولیه n باشد که در فاصله بیش از ۰٫۵ متر از هم در زمین قرار بگیرند و بهمین اتصال داشته باشند (ش ۱۷) مقاومت کل زمین مصنوعی :

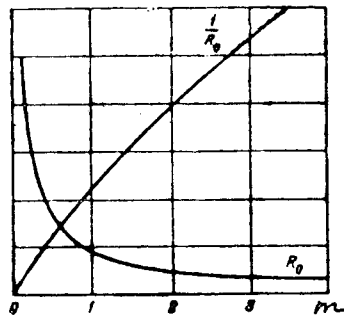
$$r_t = \frac{R_o}{n}$$

خواهد بود ولی عملاً بایستی طوری الکتروودها را قرار داد که منحنی پخش پتانسیل مسطح شود و بهمین

علت الکترودها را در فاصله‌ای تقریباً مساوی و یا بیشتر از طولشان از هم قرار میدهند در اینحالت وضعی پیش



ش ۱۷



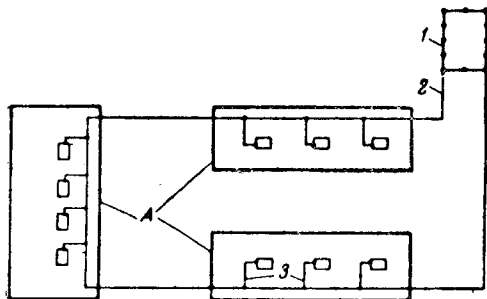
ش ۱۶

میآید که الکترودها مانع عبور جریان نسبت بهم میگردند (ش ۱۸) یعنی در واقع همدیگر را گویا با پرده‌ای میپوشانند پس برای پیدا کردن مقاومت کل این نوع الکترودها از فرمول:

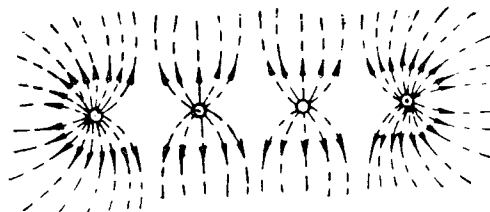
$$r_1 = \frac{R_0}{n\eta}$$

استفاده خواهیم کرد.

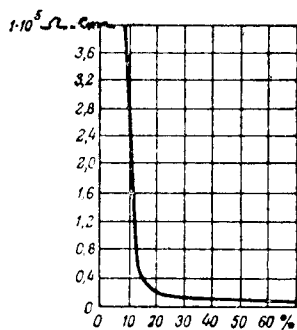
۱ - ضریب استفاده الکترودها است.



ش ۱۹



ش ۱۸



ش ۲۰

ممکن است محل زمین مصنوعی از لحاظ مقاومت مخصوص خاک و رطوبت آن طوری باشد که در خارج از محیط مراکز برقی واقع شود (ش ۱۹). بهرحال بایستی دقت نمود که الکترودها را در جایی قرار داد که مقاومت مخصوص خاک کمتر باشد. مقاومت مخصوص خاک نسبت بموادى که دارد خیلی متفاوت است در (ش ۲) تغییرات مقاومت مخصوص خاک رس نسبت به درصد رطوبتی که دارد نشان داده شده است.

دنباله دارد