مقاومت الکترود میله ای به صورت زیر است:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1\right]$$

که در رابطه فوق:

R: مقاومت سیستم احداث شده میله ای (Ω)

L: طول میله (m)

ρ: مقاومت مخصوص خاک (mΩ)

d: قطر میله ارت (m)

اگر تعدادی الکترود میله‌ای در زمین نصب و با هم موازی شوند ، مقاومت مجموع از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود.

حالتی که میله‌ها در یک راستا باشند:

اگر مقاومت هر میله R فرض شود:

اگر فاصله بین دو میله را با s و طول میله‌ها را با L نشان دهیم، ضریب K برای $s \cong 2L$ تقریباً برابر با ۱.۲۵ و برای $s > 4L$ برابر با ۱ است.

$$R_{eq} = \frac{R}{n} \times K$$

در صورت احداث حفره توسط دستگاه های حفاری و اضافه کردن مواد کاهنده مقاومت خاک مانند بنتونیت،مارکونیت، GOM یا LOM یا بتن با داشتن خصوصیات و اطلاعات فنی مواد کاهنده مقاومت می‌توان مقاومت جدید بدست آمده را برای الکترود میله ای از رابطه زیر بدست آورد:

$$R = \frac{1}{2\pi L}\left\{\left[(\rho - \rho c)\ln\left(\frac{8L}{D}\right) - 1\right] + \rho c\left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1\right]\right\}$$

که در رابطه فوق:

R: مقاومت سیستم احداث شده میله ای (Ω)

L: طول میله (m)

ρ: مقاومت مخصوص خاک (mΩ)

ρc: مقاومت مخصوص مواد کاهنده (mΩ)

D: قطر چاه حفر شده (m)

d: قطر میله ارت (m)

مقاومت الکترود صفحه ای به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\rho}{4}\sqrt{\frac{\pi}{2A}}$$

که در رابطه فوق:

R: مقاومت سیستم احداث شده صفحه ای (Ω)

ρ: مقاومت مخصوص خاک $(m\Omega)$

A: مساحت صفحه مورد استفاده (m^2)

موازی کردن الکترود های زمین:طبق روابط موجود در استاندارد BS7430.1998 صفحه 13 در صورت موازی کردن الکترود های زمین ضرایب و روابطی را باید در محاسبات در نظر بگیریم که به صورت زیر است:

$$Rn = R\left[\frac{1+\lambda a}{n}\right]$$

که در رابطه فوق:

Rn: مقاومت معادل کل(Ω)

R: مقاومت تکی هر سیستم احداث شده (Ω)

n: تعداد میله ها یا صفحات مدفون شده در زمین

λ:ضریب تعداد موازی کردن که از روابط زیر بدست می آید:

a: ضریب تعیین شده توسط استاندارد BS که از رابطه زیر بدست می آید:

$$a = \frac{\rho}{2\pi RS}$$

که در رابطه فوق:

ρ: مقاومت مخصوص خاک $(m\Omega)$

R: مقاومت تکی هر سیستم احداث شده (Ω)

S: فاصله میانگین بین دو الکترود مجاور (m)

بدست آوردن λ

جدول چیدمان احداث الکترود های کوبیده شده در زمین به صورت خطی و مربعی

فاکتور λ (چیدمان مربعی)	تعداد الکترود ها در امتداد هر ضلع
2.71	2
4.51	3
5.48	4
6.14	5
6.63	6
7.03	7
7.36	8
7.65	9
7.90	10
8.32	12
8.67	14
8.96	16
9.22	18
9.40	20

فاکتور λ (چیدمان خطی)	تعداد الکترود ها
1	2
1.66	3
2.15	4
2.54	5
2.87	6
3.15	7
3.39	8
3.61	9
3.81	10

اگر چیدمان احداث سیستم زمین به اشکال مختلف (روش میله کوبی) باشد و از مواد کاهنده مقاومت خاک استفاده شده باشد به شکل زیر روابط را محاسبه می کنیم:

$$R = \frac{1}{2\pi L}\left[(\rho c - \rho)\ln\left(1+\frac{\delta}{Z}\right)\right] + \rho\left[\ln\left(\frac{2L}{Z}\right)\right]$$

که در رابطه فوق:

ρ: مقاومت مخصوص خاک (mΩ)

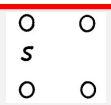
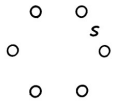
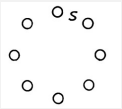
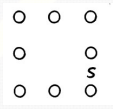
ρc: مقاومت مخصوص مواد کاهنده (mΩ)

R: مقاومت کل سیستم احداث شده (Ω)

L: طول میله (m)

δ: ضخامت(بتن یا بنتونیت یا خاک) بین میله ها درخاک (m)

Z: فاصله هندسی متوسط میله ها (m)

تعداد میله ها	اشکال هندسی میله ها	پارامتر Z
2		$\sqrt[2]{(as)}$
3		$\sqrt[3]{(as^2)}$
4		$\sqrt[4]{(\sqrt{2}as^3)}$
6		$\sqrt[6]{(6as^5)}$
8		$\sqrt[8]{(52as^7)}$
8		$\sqrt[8]{(23as^7)}$

که در جدول فوق:

a: شعاع میله ها (m)

s: فاصله بین میله های مجاور (m)

روابط مربوط به اجرای سیستم ارتینگ افقی

$$R = \frac{\rho}{P\pi L}\left[\ln\left(\frac{2L^2}{wh}\right) + Q\right]$$

که در رابطه فوق:

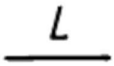
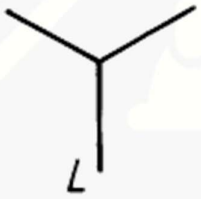
h :عمق دفن الکترود (m)

L: طول تسمه (m)

w : عرض تسمه (m)

ρ : مقاومت ویژه خاک (mΩ)

P&Q : ضرایب مذکور در جدول زیر

نوع شکل الکترود	ضریب		
	P	Q	
		Strip	Round
Single length[a] 	2	− 1	− 1.3
Two lengths at 90°	4	0.5	0.9
Three lengths at 120° 	6	1.8	2.2
Four lengths at 90°	8	3.6	4.1

مقاومت ترکیبی Rn را از رابطه زیر بدست می آوریم:

$$R_n = FR_1$$

که در رابطه فوق:

R_n: برابر است با مقاومت هادی های موازی در n شاخه (Ω)

R_1 : برابراست با مقاومت هر شاخه که به صورت تکی محاسبه می شود(Ω)

F: به صورت زیر محاسبه می شود:

برای دو شاخه: $F = 0.5 + 0.078(\frac{s}{L})^{-0.307}$

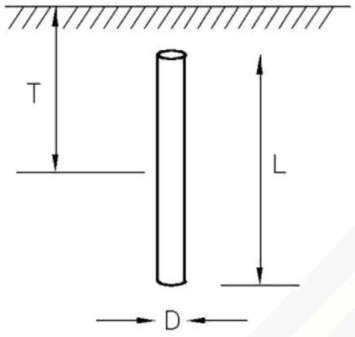
برای سه شاخه: $F = 0.33 + 0.071(\frac{s}{L})^{-0.408}$

برای چهار شاخه: $F = 0.25 + 0.067(\frac{s}{L})^{-0.451}$

مشروط بر اینکه:

$$0.02 \leq \frac{S}{L} \leq 0.3$$

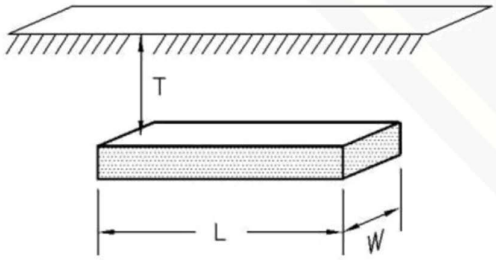
محاسبه مقاومت الکترود تک میله ای که انتهای آن از سطح زمین پایین تر باشد:



$$IF: \quad L \gg \frac{D}{2} \qquad T \ll \frac{L}{4}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{2L}{D}\right) + \frac{1}{2}\, ln\left(\frac{4T+L}{4T-L}\right)\right]$$

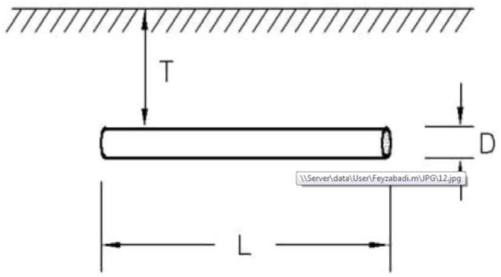
الکترود تسمه ای نصب شده در زیر خاک:



$$IF: \quad L \gg W \qquad T \gg \frac{L}{4}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{2L^2}{WT}\right)\right]$$

الکترود سیمی با مقطع گرد مدفون در زیر خاک فرمول ساده بدون بکفیل:



$$IF: \quad T \gg D \qquad T \ll \frac{L}{4}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{L^2}{DT}\right)\right]$$

الکترود سیمی با مقطع گرد مدفون در زیر خاک با ترانشه و بکفیل«فرمول دقیق منطبق بر IEEE142»

$$R = \frac{\rho_s}{2\pi L}\left[ln\left(\frac{4L}{d}\right)\right] + \frac{\rho}{2\pi L}\left[ln\left(\frac{4L}{D}\right) + ln\left(\frac{4L}{h}\right) - 2 + \frac{h}{2L} - \frac{h^2}{16L^2}\right]$$

که در رابطه فوق:

L: طول هادی

h: عمق ترانشه

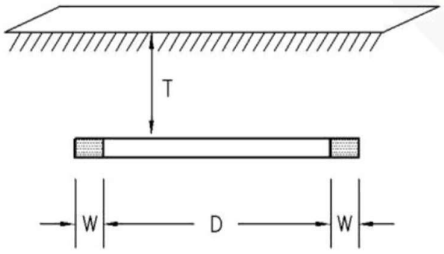
D: عرض ترانشه

d: قطر هادی

Ps: مقاومت مخصوص مواد کاهنده

P: مقاومت مخصوص خاک

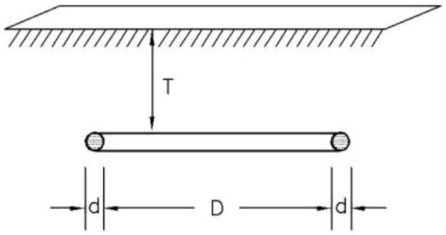
الکترود تسمه ای به شکل حلقه در زیر خاک:



$$IF: \quad D \gg W \qquad T \ll \frac{D}{2}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D}\left[\ln\left(\frac{8\pi D^2}{WT}\right)\right]$$

الکترود سیم مسی به شکل حلقه نصب شده در زیر خاک



$$IF: \qquad D \gg d \qquad T \gg \frac{D}{2}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D}\left[\ln\left(\frac{4\pi D^2}{dT}\right)\right]$$

محاسبه مقاومت الکترود مدفون در بتن(یوفر)

$$R = \frac{0.2\rho}{\sqrt[3]{v}}$$

معادله سِوراک

$$R_g = \rho\left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A'}}\left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A'}}\right)\right]$$

ρ_{av} = میانگین مقاومت مخصوص خاک

L_t = طول هادی الکترود زمین

A' = مساحت پوشش هادی الکترود زمین

h = عمق دفن هادی

که در آن:

R_g: مقاومت زمین پست بر حسب اهم

ρ: مقاومت خاک بر حسب اهم- متر

A': مساحت ناحیه اشغال شده توسط سیستم زمین بر حسب مترمربع

L_T: طول کل هادیهای دفن شده بر حسب متر و

h: عمق شبکه زمین بر حسب متر می‌باشد.

برای شبکه‌های بدون میله‌های زمین پاسخ معادله سوراک با معادله شوارتز که به صورت رابطه (۲-۲۱) بیان می‌شود یکسان است.

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

که در آن:

R_1 مقاومت کل هادی‌های شبکه زمین بر حسب اهم

R_2 مقاومت کل میله‌های شبکه زمین بر حسب اهم

R_m مقاومت متقابل بین R_1 و R_2 بر حسب اهم می‌باشد.

مقاومت هادیهای شبکه زمین را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c}\left[\ln\left(\frac{2L_c}{a'}\right) + \frac{k_1 . L_c}{\sqrt{A'}} - k_2\right]$$

a' در رابطه فوق بدین صورت تعریف می گردد:

$$a' = \sqrt{2ah}$$

که در آن‌ها :

ρ مقاومت ویژه خاک $(\Omega.m)$

L_e طول کل هادی‌های متصل به شبکه زمین (m)

$2a$ قطر هادی (m)

A' سطح اشغال شبکه زمین (m^2)

k_1, k_2 ضرائب ثابت که از دو شکل (۲-۳) و (۲-۴) بدست می آیند

h عمق دفن شبکه زمین (m)

مقاومت میله‌های شبکه زمین را نیز می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r}[\ln(\frac{8L_r}{b}) - 1 + \frac{2k_1.L_r}{\sqrt{A}}(\sqrt{n_R} - 1)^2]$$

در رابطه فوق :

L_r طول هر میله بر حسب متر (m)

$2b$ قطر میله زمین (m)

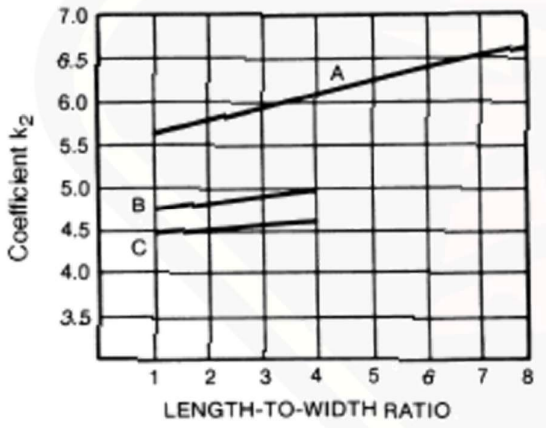
n_R تعداد میله‌های زمین

و نهایتاً مقاومت متقابل هادی‌ها و میله‌های شبکه برابر خواهد بود با :

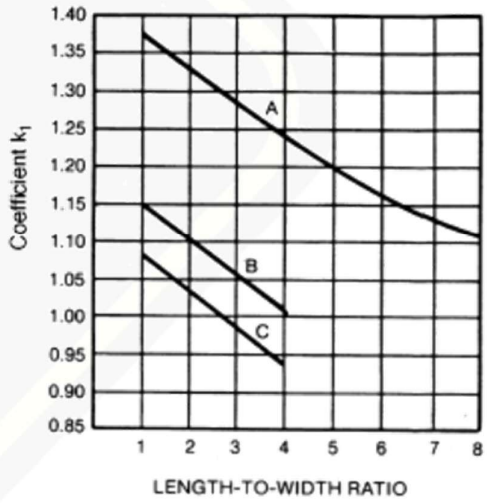
$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c}[\ln(\frac{2L_c}{L_r}) + \frac{k_1.L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1]$$

خاکهای غیر یکنواخت

از آنجائیکه ولتاژهای گام و تماس محاسبه شده بر اساس این گزارش بر مبنای مدل خاک یکنواخت است لذا تقریب مدلهای



CURVE A — FOR DEPTH h = 0
γ_A = 0.15x + 5.50
CURVE B — FOR DEPTH h = 1/10 √AREA
γ_B = 0.10x + 4.68
CURVE C — FOR DEPTH h = 1/6 √AREA
γ_C = -0.05x + 4.40



CURVE A — FOR DEPTH h = 0
γ_A = -0.04x + 1.41
CURVE B — FOR DEPTH h = 1/10 √AREA
γ_B = -0.05x + 1.20
CURVE C — FOR DEPTH h = 1/6 √AREA

در دو منحنی فوق محور افقی نسبت طول به عرض زمین پست را نمایش می‌دهد. در زیر هر کدام از منحنی‌ها رابطه آن منحنی نیز ذکر شده است. به عنوان مثال اگر هادی‌های سیستم زمین در عمق نیم‌متری سطح زمین دفن شده باشد باید از رابطه و منحنی‌های اول استفاده نمود، زیرا که h عددی بسیار کوچک است.

روابط سر انگشتی

نوع الکترود	فرمول سرانگشتی
میله و لوله	$R=\frac{\rho}{L}$
تسمه و سیم	$R=\frac{2\rho}{L}$
حلقه	$R=\frac{2\rho}{3D}$
شبکه	$R=\frac{\rho}{D}$
صفحه	$R=\frac{0.4\rho}{L}$
کانتریویز	$R=\frac{3\rho}{L}$

SEROIRAN