

بسمه تعالی



جمهوری اسلامی ایران

وزارت نیرو

امور برق

معاونت تحقیقات و تکنولوژی

دفتر استانداردها

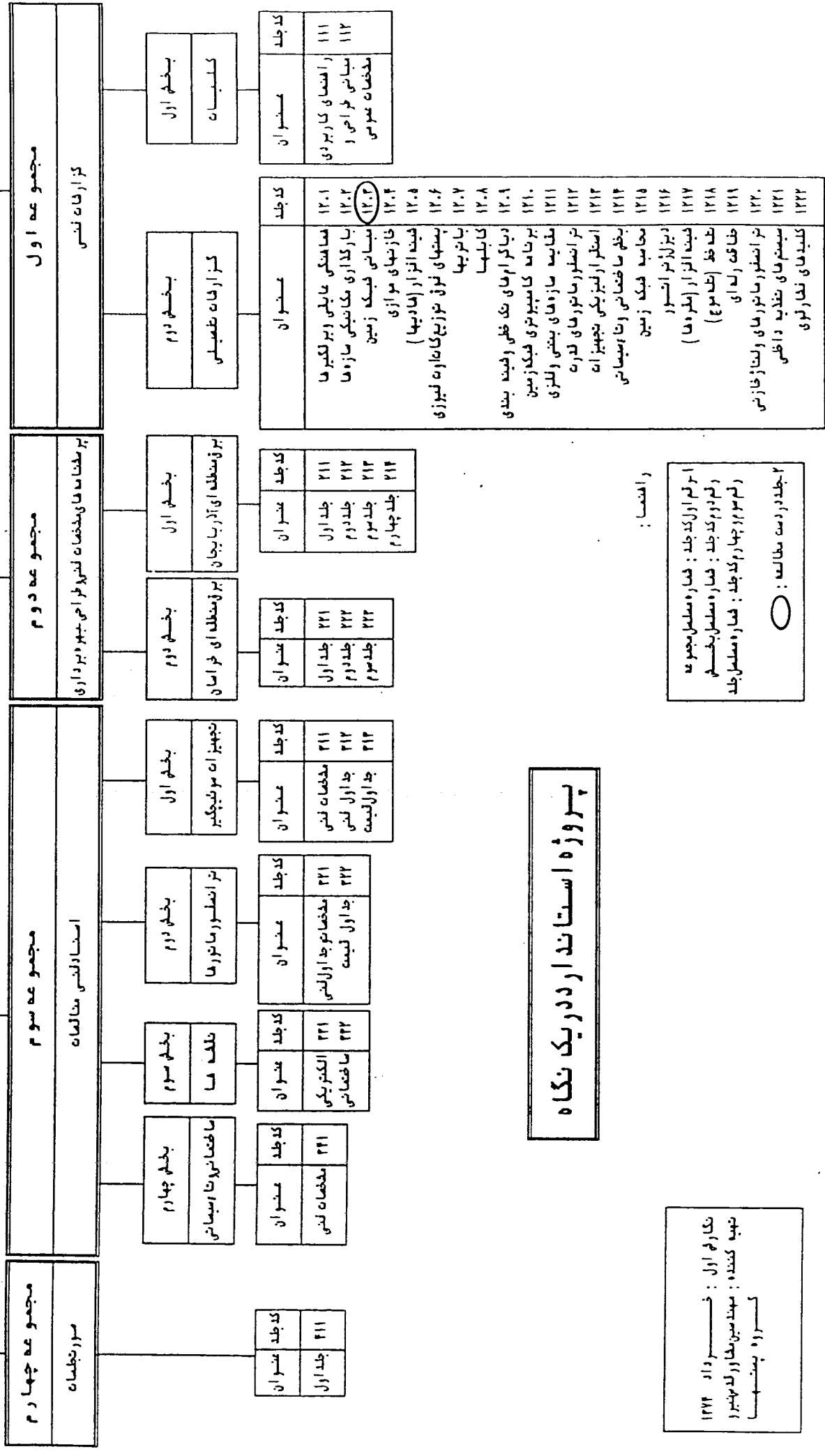
استانداردهای فوق توزیع (۳۳) ۱۳۲/۲۰ کیلوولت معمولی

مجموعه اول : گزارشات فنی
بخش دوم : مجموعه دستورالعملها و جزوات راهنمای تفصیلی
کد جلد ۱۲۰۳ : مبانی شبکه زمین

نگارش اول : خرداد ۱۳۷۴
تهیه کننده : مهندسین مشاور قدس نیرو
گروه پستها



استاندارد اردیستهای فوق توزیع (۳۳) کیلو ولت معمولی
سازمان گز ارهات و اسناد



پروژه استاندارد در یک نگاه

راهنما :

○ جلد در دست مطالعه :
 - رقم اول کد جلد : شمار مسلسل مجموعه
 - رقم دوم کد جلد : شمار مسلسل بخش
 - رقم سوم چهارم کد جلد : شمار مسلسل جلد

تکایم اول : شماره واد ۱۴۴
 تهیه کننده : مهرداد ساروادی
 گروه برنامه ریزی



فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	مبانی شبکه زمین
۲	۱- حدود و مشخصات جریان مجاز قابل انتقال از بدن
۳	۲- مدارهای اتصال کوتاه در لحظه تماس پتانسیل الکتریکی با بدن
۶	۳- تاثیر لایه شن و یا سنگ شکسته روی پارامترهای شبکه زمین
۷	۴- بررسی ولتاژهای مجاز برای ایمنی در پست
۷	۴-۱ ولتاژ گام (STEP VOLTAGE)
۷	۴-۲ ولتاژ تماس (TOUCH VOLTAGE)
۹	۴-۳ ولتاژ شبکه (MESH VOLTAGE)
۹	۴-۴ ولتاژ انتقالی (TRANSFER VOLTAGE)
۱۱	۵- انتخاب هادیهای شبکه زمین و اتصالات آن
۱۲	۵-۱ انتخاب سطح مقطع مناسب
۱۷	۵-۲ انتخاب اتصالات
۱۸	۵-۳ فاکتورهای موثر در حدود اندازه اتصالات
۱۹	۶- ارزیابی مقاومت الکتریکی شبکه زمین

فهرست مطالب (ادامه)

صفحه عنوان

۱۹	۶-۱ مدل تک لایه خاک
۲۱	۶-۲ مدل دو لایه خاک
۲۳	۶-۳ معادله شوآرتز
۲۶	۷- تعیین حداکثر جریان منتقل شده به شبکه زمین
۲۶	۷-۱ روش و تعاریف مربوطه
۲۸	۷-۲ انواع جریان خطای زمین
۲۳	۷-۳ تاثیر مقاومت شبکه زمین ایستگاه
۲۳	۷-۴ تاثیر و مقاومت خطا
۲۳	۷-۵ تاثیر سیمهای هوایی زمین و هادیهای نوترال
۴۰	۷-۶ تاثیر لوله‌ها و یا کابل‌های مدفون در زمین
۴۰	۷-۷ بدترین نوع خطا و محل آن
۴۲	۷-۸ محاسبه تقسیم جریان
۴۴	۷-۹ تاثیر عدم تقارن در جریان خطا
۴۶	۷-۱۰ تاثیر تغییرات احتمالی در آینده

فهرست مطالب (ادامه)

صفحه	عنوان
۴۹	۸- طراحی شبکه زمین
۴۹	۸-۱ حدود مجاز طراحی
۵۰	۸-۲ پارامترهای مهم
۵۲	۸-۳ پارامترهای مورد لزوم طرح شبکه
۵۳	۸-۴ روش طراحی شبکه زمین
۵۵	۸-۵ نحوه محاسبه حداکثر ولتاژهای گام و شبکه
۵۸	۸-۶ تخمین حداقل طول لازم هادی در تشکیل شبکه
۶۰	۸-۷ اصلاح شبکه مقدماتی زمین



مبانی شبکه زمین

این مقاله به منظور ارائه اطلاعات لازم و راهنمایی‌هایی در مورد زمین کردن ایمنی تجهیزات فشار قوی پستها بصورت تئوری، تهیه شده و در آن اساساً به راهها و فرمولهای تجربی که در مجله استاندارد IEEE شماره ۸۰ چاپ سال ۱۹۸۶ آورده شده، اشاره شده است و در بعضی از فصول به موارد گفته شده در سایر استانداردها و مقاله های علمی معتبر نیز ارجاع گردیده است.

هدف اصلی از اتصال زمین کردن تجهیزات، ایجاد ایمنی کافی و تامین حفاظت جانی برای کسانی که با این دستگاهها در تماس خواهند بود و نیز تامین حفاظت کافی برای دستگاههای برقی در برابر زوال و یا خرابی آنها بنا به خصوصیات الکتریکی دستگاهها در محیط کار شبکه می باشد و ازین لحاظ سعی شده است که به موارد زیر توجه شود.

- ۱ - کاهش تاثیر سوء فشار الکتریکی ضربه ای ناشی از تغییرات ولتاژ نازها به عناوین مختلف روی تجهیزات.
 - ۲ - بررسی شرایط ایجاد ایمنی برای افراد در صورت وقوع اتصال کوتاه در محیط و یا در ناحیه مرزهای پستها.
 - ۳ - کنترل تغییرات پتانسیل و در محدوده مناسب قرار دادن گرادیان ولتاژها در نواحی مختلف پست.
- در مقاله فوق در مورد نحوه زمین کردن نقطه نول شبکه ها صحبتی بعمل نمی آید لیکن در مورد نحوه اتصال نقاطی که اصولاً بایستی زمین شوند و در شرایط بروز خطا که باید بطور محکم و اصولی خطا را به زمین انتقال دهند نکاتی ارائه میشود.
- طرح شبکه زمین متشکل از مجموعه هادیهای موازی و افقی و متقاطع بفرم شطرنجی با ضخامت و جنس مناسب هادی بکار رفته با طول اپتیمم و قرار دادن آن در عمق مناسب و بررسی شرایط و خصوصیات این شبکه و اصلاحات لازم روی این مجموعه روشی بوده است که تاکنون بطور معمول مورد استفاده قرار گرفته و برای کنترل گرادیان ولتاژ در نواحی مختلف پستهای فشار قوی بسیار سودمند بوده است. در این زمینه پارامترهای تعیین کننده ای وجود دارد که ذیلاً به اختصار شرح داده خواهند شد.

۱ - حدود و مشخصات جریان مجاز قابل انتقال از بدن

تاثیر جریان الکتریکی عبوری از بدن تابع فرکانس، شدت و دوره زمانی عبور آن می باشد. تجربه نشان داده است که آدمیان در برابر جریان الکتریسیته بین ۵. و ۶. هرتز که فرکانس معمول در صنعت برق است، و حتی با شدت حدود ۱/ آمپر کاملاً ناتوان بوده اند، در حالیکه در برابر همان جریان الکتریسیته با فرکانس بین ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز متوجه خطر عمده ای نشده اند.

جریانهای تا ۹ میلی آمپر در فرکانس ۶۰ - ۵۰ هرتز آسیب جدی در شخص ایجاد نمی کند، ولی چنانچه میزان آن از ۹ تا ۲۵ میلی آمپر افزایش یابد خطراتی مثل از کار افتادن ماهیچه های محل تماس مشهود بوده است. جریانهای بیشتر از ۲۵ میلی آمپر منجر به از کار افتادن تنفس و ایجاد مرگ می گردد. مقادیر فوق بصورت آماری گزارش شده است و در موارد خاصی می تواند صادق نباشد. بعنوان مثال چنانچه پوست دست که از سلولهای شاخی ساخته شده ممکن است آنقدر ضخیم باشند که در مقابل موارد فوق مقاومت بیشتری داشته باشد. نکته قابل ذکر در عبور جریان مجاز از بدن، زمان انتقال جریان می باشد. که این زمان متناسب با شدت جریان انتقالی میباشد. در این مورد میتوان با استناد به فرمول تجربی زیر رابطه بین شدت جریان انتقالی و زمان انتقال آنرا دریافت. این فرمول توسط "DALZIEL" اظهار شده و در مورد ۹۹/۵٪ افراد با وزن حدود ۵۰ کیلوگرم و زمان کمتر از ۳ ثانیه صادق بوده است.

$$(I_B)^2 t_s = 0.0135$$

زمان انتقال جریان از بدن = t_s و شدت جریان انتقالی از بدن = I_B

بعنوان مثال طبق فرمول فوق به ازای زمان ۵/۰ ثانیه شخص می تواند شدت جریان ۱۶۴ میلی آمپر را تحمل کند.

با استخراج شدت جریان، از فرمول بالا حداکثر جریان قابل انتقال از بدن فرد ۵۰ کیلوگرمی را میتوان محاسبه نمود.

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

با توجه باینکه افراد با وزنه‌های مختلف در برابر جریان الکتریسیته از خود مقاومت‌های متفاوتی نشان داده‌اند، در استاندارد IEEE حداکثر جریان مجاز قابل عبور از بدن یک فرد ۷۰ کیلوگرمی (مقدار متوسط وزن افرادی که در ارزیابی مطالعه شده‌اند) اساس محاسبات واقع شده و لذا فرمول بالا بعداً بصورت ذیل اصلاح و تکمیل شده است.

$$(I_B)^2 * t_s = 0.0246 \quad I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

فرمول فوق اساس ارزیابی شبکه زمین و تعیین پارامترهای ثانویه آن بوده است.

۲ - مدارهای اتصال کوتاه در لحظه تماس پتانسیل الکتریکی با بدن باز هم بنا بر گزارشات آماری و اندازه گیری‌هایی که "الزویل" انجام داده است، مقاومتی در حدود ۲۳۰۰ اهم بین دو دست و ۱۱۳۰ اهم بین دست و پا اندازه گیری شده که با توجه به این نکته که مقاومت بدن بین دو پا از مقادیر فوق بیشتر می‌باشد لذا در محاسبات با فرض بسیار ناچیز بودن مقاومت الکتریکی سطح تماس، مقداری در حد یک کیلو اهم بعنوان مقاومت الکتریکی بدن فرض شده و در فرمولها بکار گرفته شده است.

$$R_B = 1000 \Omega$$

با توجه به روابط (۱) و (۲) می‌توان حدود ولتاژی را بعنوان ولتاژ قابل تحمل بدن بین هر دو نقطه تماس تعریف کرد. مقاومت الکتریکی مدار اتصال کوتاه در تماس با بدن شامل ۲ جزء است. یکی مقاومت الکتریکی خود بدن و دیگری مقاومت الکتریکی ناحیه تماس مثلاً زیر پا. طبیعی است در میزان عبور جریان از بدن، مقاومت ناحیه تماس نقش اساسی و عمده‌ای را ایفا می‌کند که بعداً شرح داده خواهد شد. البته بایستی توجه داشت که در ارائه معادلات از مقاومت جزء پوشش یا نظیر کفش و جوراب کاملاً صرف‌نظر می‌شود.

برای تحلیل معادلات مربوط به شبکه زمین، پای انسان مشابه یک دیسک فلزی به شعاع b فرض شده است و لذا طبق تحلیل سوند "SUNDE" که چنانچه دو دیسک مشابه به فاصله

d از هم بر روی یک‌لایه زمین هم‌گون با مقاومت ρ قرار گرفته باشند مقاومت‌های خودی و متقابل آنها نسبت به زمین دوردست مطابق معادلات زیر تعریف می‌شوند.

$$R_{\text{foot}} = \rho/4b \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$R_{\text{mfoot}} = \rho/2\pi d \quad \text{رابطه (۴)}$$

و با فرض اینکه مقدار b به میزان 0.8 متر (۳ اینچ) و فاصله $d = 1\text{m}$ باشد، معادلات بالا بصورت زیر خواهند بود.

$$R_{\text{foot}} = \rho/0.32 = 3.125\rho \quad \text{رابطه (۵)} \quad R_{\text{mfoot}} = \rho/2\pi \quad \text{رابطه (۶)}$$

با توجه به دیگرامهای صفحه بعد، مقاومت زمین بین دو پا بصورت سری R_{2FS} و برای دو پای موازی هم بصورت R_{2FP} تعریف شده است و لذا خواهیم داشت:

$$R_{2FS} = 2(R_{\text{foot}} - R_{\text{mfoot}}) \quad \text{رابطه (۷)} \quad R_{2FP} = 1/2 (R_{\text{foot}} + R_{\text{mfoot}}) \quad \text{رابطه (۸)}$$

و لذا چنانچه ولتاژ U بین دو پا اعمال شود (با توجه به مقاومت نقاط تماس) با عبور جریان I_A از بدن، روابط زیر صادق خواهند بود.

$$R_A = R_B + 2(R_{\text{foot}} - R_{\text{mfoot}}) \quad \text{رابطه (۹)}$$

و چنانچه همان ولتاژ U بین دست و پا اعمال شود (با توجه به مقاومت نقاط تماس) خواهیم داشت.

$$R_A = R_B + 1/2 (R_{\text{foot}} + R_{\text{mfoot}}) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

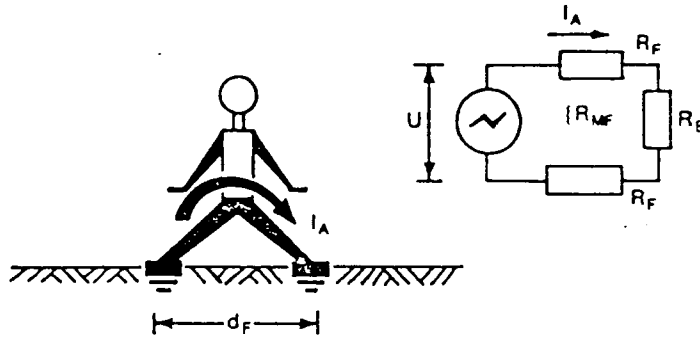
با صرفنظر از مقادیر جزئی و نیز مقاومت متقابل دو پا (R_{mfoot}) خواهیم داشت:

$$R_{2FS} = 2 (3.125\rho - \rho/2\pi) \approx 6\rho \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$R_{2FP} = \frac{1}{2} (3.125\rho + \rho/2\pi) \approx 1.5\rho \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

جهت تعیین صحت فرمولهای بالا و تعیین دقت بکار برده شده در آنها به آزمایشات عملی متوسل شده اند و با انجام آزمایشاتی که ρ در آنها $2000 \Omega.m$ بوده است عملاً مقدار $R_{2FS} = 11863 \Omega$ و $R_{2FP} = 3284 \Omega$ بدست آمده است که به مقادیر 12000 و 3000 اهم متناسباً بسیار نزدیک می‌باشد. روابط بالا، پارامترهای دیگری هستند که در محاسبات شبکه زمین بسیار حائز اهمیت می‌باشند.

Step Voltage Circuit



$$d_F = 1 \text{ m}$$

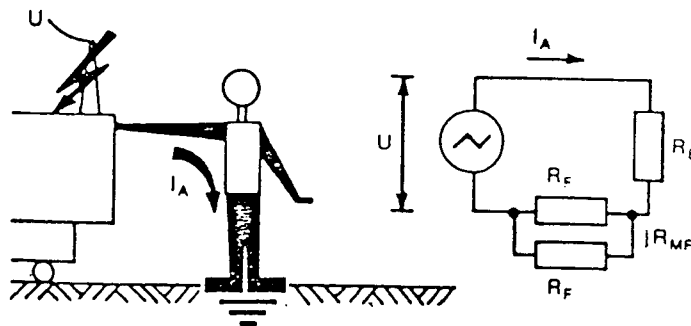
$$R_A = R_B + 2R_F - 2R_{MF}$$

$$I_A = U/R_A$$

$$R_B = 1000 \Omega$$

where

I_A = the current of accidental circuit
 R_A = the total resistance of accidental circuit



$$R_A = R_B + \frac{1}{2}(R_F + R_{MF})$$

Touch Voltage Circuit

۳ - تاثیر لایه شن و یا سنگ شکسته روی پارامترهای شبکه زمین

در معادلات (۳) و (۴) وجود یک لایه همگون خاک، در سطح پست اساس تحویل بوده است. در حالیکه در سطح زمین پستها یک لایه از سنگ شکسته به ضخامت ۰/۱۵ - ۰/۸ متر معمولاً ریخته می شود تا مقاومت الکتریکی بین پای انسان و شبکه زمین زیر پای او را افزایش دهند

حال چنانچه مقاومت زمین لایه خارجی زمین پست از مقاومت الکتریکی سنگ شکسته کمتر باشد، تنها مقدار جزئی از جریان اتصال کوتاه به لایه سنگ شکسته نفوذ خواهد کرد و لذا ولتاژ سطحی بهمان مقدار بدون لایه سنگ شکسته باقی خواهد ماند.

در نتیجه، جریانی که از بدن عبور خواهد کرد، متناسباً کاهش خواهد یافت. با توجه باینکه میزان عبور جریان از بدن به ضخامت این لایه بستگی دارد لذا روابط عنوان شده در روابط (۴) و (۳) را می توان با توجه به تاثیر ضخامت لایه فوق به صورت زیر بسط داد.

$$R_{\text{foot}} = \rho / 4b * F(X_1) \quad \text{رابطه (۱۳)}, \quad R_{m\text{foot}} = \rho / 2\pi d_{\text{foot}} * F(X_2) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$F(X)_{X_1, X_2} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad \text{رابطه (۱۵)}, \quad Q_n = \frac{Kn}{\sqrt{1 + (2nX)^2}} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$K = (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s) \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در معادلات فوق خواهیم داشت:

$$\rho_s = \text{مقاومت الکتریسته سنگ شکسته به اهم متر}$$

$$X = X_1 = hs/b \quad \text{برای } R_{\text{foot}}, \quad X = X_2 = hs/d_{\text{foot}} \quad \text{برای } R_{m\text{foot}}$$

$$hs = \text{ضخامت لایه سنگ شکسته به متر}$$

با توجه باینکه محاسبه $F(X)$ اصولاً مشکل و وقت گیر است و عملاً می بایستی از کامپیوتر استفاده شود ازینرو، مجله IEEE دیاگرامهای صفحه بعد را تهیه کرده که در محاسبات به نسبت قابل قبولی می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در محاسبات عادی شبکه ها با تقریب مناسب می توان از جزء مربوط به مقاومت متقابل دو پا صرفنظر کرده و مقدار b را مساوی ۰/۸ و d را برابر یک فرض کرد.

لذا روابط (۱۱) و (۱۲) بصورت زیر در خواهند آمد.

$$R_{2FS} = 6.0 * C_s (h_s, k) * \rho_s \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$R_{2FP} = 1.5 * C_s (h_s, k) * \rho_s \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$K = \frac{\rho_s - \rho_s}{\rho_s + \rho_s} = K \quad \text{Cs (ضریب کاهش) تابعی است از } h_s \text{ (ضخامت لایه سنگ شکسته) و } K$$

در معادلات فوق C_s تقریباً برابر یک خواهد بود اگر مقاومت الکتریکی لایه خارجی زمین پست برابر با مقاومت الکتریکی قشر سنگ شکسته باشد. در غیر اینصورت معادله زیر قابل دسترسی خواهد بود.

$$C_s = 1/0.96 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2nhs/0.08)^2}} \right] \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

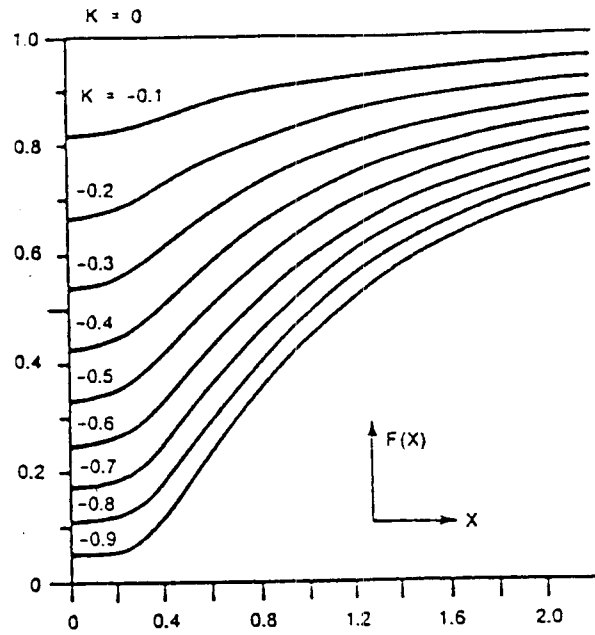
برای $C_s < 1$ می توان به دیاگرامهای صفحه بعد نیز مراجعه کرد.

۴ - بررسیهای ولتاژهای مجاز برای ایمنی در پست .

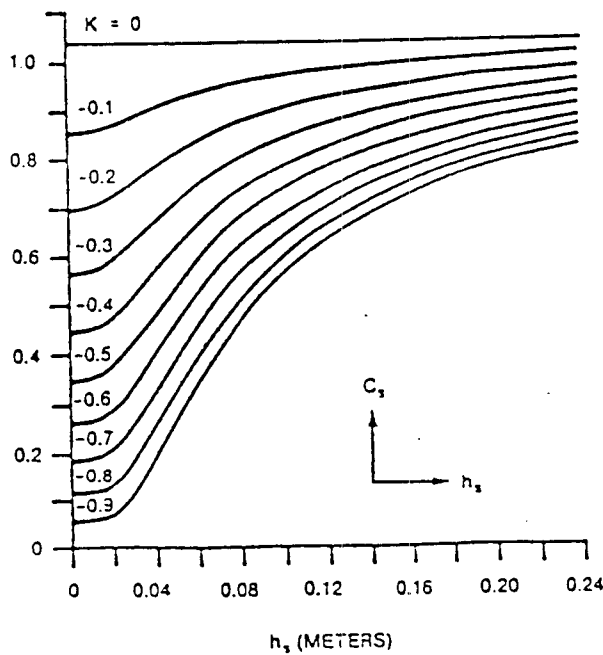
در اثر عبور جریان اتصال کوتاه از هادیهای شبکه زمین گرا دیان پتانسیل در سطح زمین و مناطق مجاور و یا به نحوی مرتبط با آن می تواند باعث ایجاد خطراتی برای افرادی که در تماس نزدیک به آن هستند شود . در اینصورت حداکثر ولتاژی که شبکه زمین در نتیجه عبور جریان اتصال کوتاه نسبت به نقطه زمین دوردست پیدا می کند، بعنوان ولتاژ افزایش یافته زمین شبکه تعریف می شود . شکلهای صفحه بعد چهار حالت مختلف ولتاژهای احتمالا خطرناک برای افراد را بطور شماتیک نمایش این ولتاژها بقرار زیر هستند .

۱ - ۴ ولتاژ گام یا قدم (Step Voltage (Es)). ولتاژی که در اثر عبور جریان در مسیر بسته بین دو پای شخص و زمین ایجاد میشود . (فاصله بین دو پا یک متر تعریف میشود).

۲ - ۴ ولتاژ تماس (Touch Voltage (Et)). اختلاف پتانسیل تعریف شده بین ولتاژ افزایش یافته شبکه زمین (GPR) و ولتاژ سطح شبکه در نقطه ای که شخص ایستاده در حالیکه دست او در تماس با استراکچر زمین شده در نقطه اتعالی قرار دارد تعریف میشود .



Function $F(X)$ Versus X and Reflection Factor K



Reduction Factor C_s As a Function of Reflection Factor K and Crushed Rock Layer Thickness h_s

۳ - ۴ ولتاژ شبکه (Mesh Voltage (Em)). حداکثر ولتاژی که در وسط یک خانه از شبکه زمین پست ایجاد میشود بعنوان ولتاژ خانه تعریف می شود. این ولتاژ بمبارت دیگر ولتاژ ماکزیممی است که در حالت اتصال بین شبکه زمین تا سطح مفروش سنکریزه ای پست در سطح قائم بوجود می آید.

۴ - ۴ ولتاژ انتقالی (Transfer Voltage (Etrrd)) حالت خاصی است از ولتاژ تماس و درحالتی که ولتاژ تماس بد نقطه ای زمین شده در دوردست انتقال یابد تعریف می شود. چه بسا ممکن است شخصی که در دور دست ایستاده به سیم یا لوله و یا بد هر شئی در تماس باشد که به محل پست متصل بوده و در داخل پست تحت شرایط اتصال کوتاه قرار گرفته باشد. در حالت خاصی نیز ممکن است شخصی در محل یک پست. مورد ولتاژ تماسی قرار گرفته و توسط یک هادی بعنوان مثال با پست دیگری که تحت شرایط اتصال کوتاه قرار گرفته است در تماس باشد. لذا در چنین مواردی ولتاژ انتقالی می تواند نزدیک به مجموع ولتاژهای افزایش یافته هر دو پست باشد. با توجه باینکه اصولا طرح شبکه زمین که بتواند جوابگوی حالت فوق یا حتی حالتی که ولتاژ انتقالی در اثر القاء روی مدارات مخابراتی و یاسیمای نول و لوله های آب و غیره ایجاد میگردد غیر عملی خواهد بود. لذا می بایستی از احتمال ایجاد ولتاژهای انتقالی خطرناک روی شبکه های خارجی با ایزوله کردن کامل شبکه ها و یا نام گذاری و جداسازی آنها از همدیگر جلوگیری کرد.

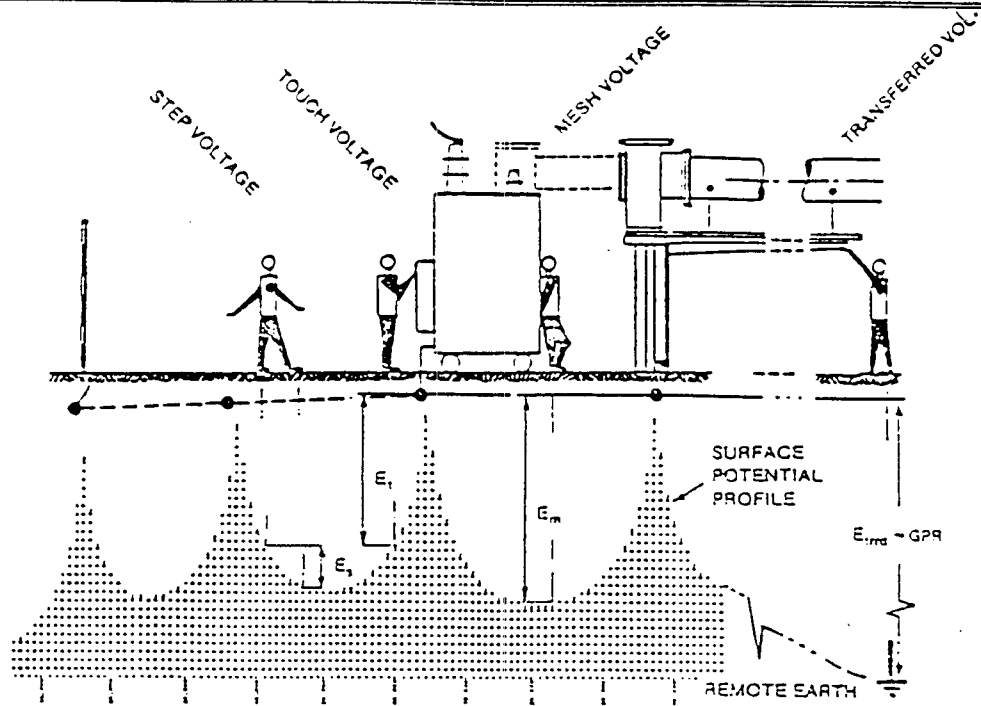
با توجه به موارد فوق و به عنوان جمع بندی می توان با در نظر گرفتن حدود ولتاژ و جریان مجاز ایمنی برای انسان قبل از آنکه خطا کاملا رفع شده باشد، حدود ولتاژ زیر را براساس گفته های قبل تعریف و تعبیت کرد.

$$\text{Estep} = (RB + R2Fs) * IB \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

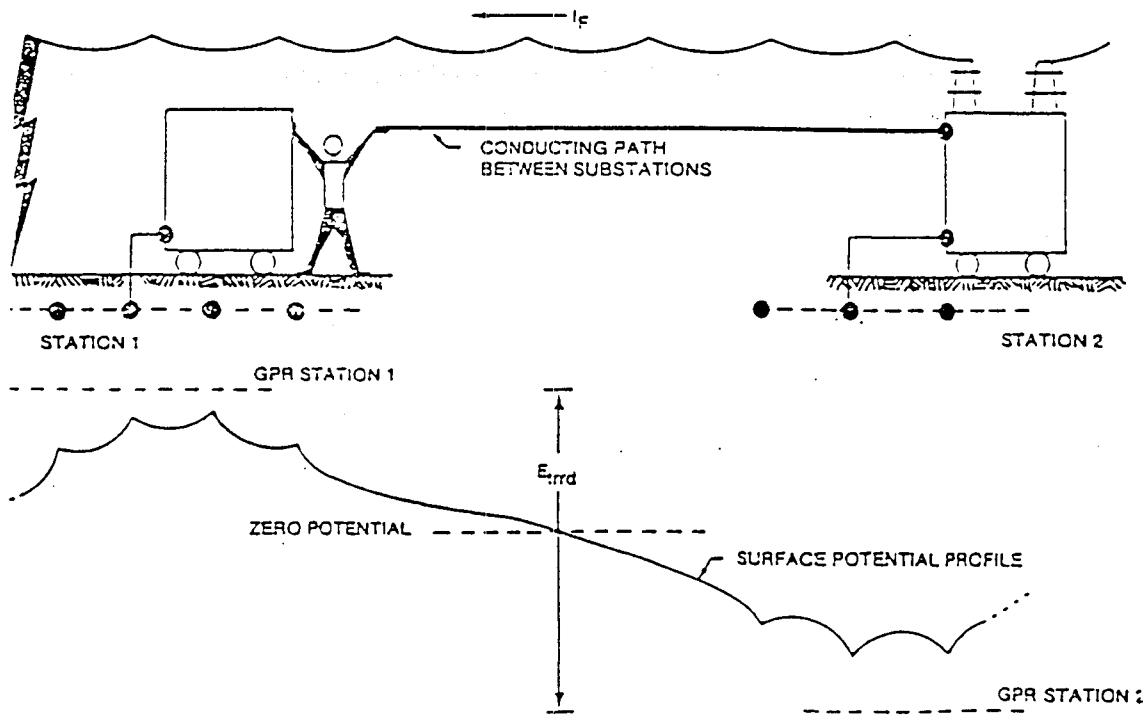
با توجه به روابط (۱) و (۷) و (۱۸) و (۲۱) خواهیم داشت :

$$\text{Estep } 50 = (1000 + 6 CS(hs, k) \beta_s) * 0.116 / \sqrt{ts} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

حداکثر ولتاژ کام مجاز (قابل تحمل) برای یک انسان ۵۰ کیلوگرمی



Basic Shock Situations



Typical Situation of External Transferred Potential

و یا :

$$E_{step 70} = (1000 + 6C_s (h_s, k) * \beta_s) * 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (23) \quad \text{رابطه}$$

حداکثر ولتاژ کام مجاز برای انسان ۷۰ کیلوگرمی

لذا برای حصول ایمنی اشخاص در مقابل ولتاژ کام بایستی ولتاژ واقعی کام از میزان تعریف شده مجاز و یا قابل تحمل فوق کمتر باشد. در مورد ولتاژ تماس نیز بعینده خواهیم داشت :

$$E_{touch} = (R_B + R_{2PP}) \cdot I_B \quad (24) \quad \text{رابطه}$$

با توجه به معادلات (۱) و (۸) و (۱۹) و (۲۴) و ترکیب آنها خواهیم داشت:

$$E(\text{touch}50) = (1000 + 1.5 C_s (h_s, k) * \beta_s) * 0.116 / \sqrt{t_s} \quad (25) \quad \text{رابطه}$$

حداکثر ولتاژ تماس مجاز برای انسان ۵۰ کیلوگرمی

$$E(\text{touch}70) = (1000 + 1.5 C_s (h_s, k) * \beta_s) * 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (26) \quad \text{رابطه}$$

حداکثر ولتاژ تماس مجاز برای انسان ۷۰ کیلوگرمی

بک در معادلات بالا همانطوریکه قبلا نیز گفته شده خواهیم داشت :

مقدار C_s ، چنانچه سطح زمین طبیعی پست از سنگریزه مفروش نشده باشد برابر یک است و چنانچه سنگریزه در سطح آن بکار برده شده باشد مطابق منحنی های صفحه قبل صفحه قبل قابل استخراج خواهد بود.

$\beta_s =$ مقاومت الکتریکی سنگ شکسته ریخته شده در سطح پست

$t_s =$ حداکثر زمان عملی انتقال جریان اتصال کوتاه به شبکه زمین چنانچه

آخرین مرحله حفاظت ها عمل کنند.

جهت حصول ایمنی در سطح پست در مقابل گرادیان ناخواسته پتانسیل، بایستی مقادیر واقعی ولتاژ تماس و ولتاژ خانه و ولتاژ انتقالی در سطح پست از میزان مقادیر تعریف شده در معادلات بالا کمتر باشند.

۵ - انتخاب هادیهای شبکه زمین و اتصالات آن

برای ارزیابی هادیهای شبکه زمین اعم از سطح مقطع، نوع و حدود افزایش درجه حرارت

مجاز هادی در اثر اتصال کوتاه بایستی به موارد زیر توجه شود.

- هادی شبکه بایستی به نحوی انتخاب شود که بتواند هدایت کافی در استقال انرژی حاصل از اتصال کوتاه را به ساده ترین و کوتاه ترین روش به شبکه زمین داشته، از ایجاد کرادیانهای پتانسیل موضعی خطرناک جلوگیری کند.

- هادی شبکه زمین بایستی در مقابل خوردگی و زوال بعلمت وجود املاح در خاک در طول عمر مفید آن، مقاومت کافی داشته باشد و در مقابل تنشهای مکانیکی و الکتریکی ناشی از اتصال کوتاه ایستادگی نماید.

تجربه نشان داده است که هادی مسی از لحاظ هدایت الکتریکی و مقاومت مکانیکی و خوردگی در برابر املاح موجود در خاک نسبت به سایر انواع هادی ها نظیر آلومینیمی و یا هادی فولادی در مجموع بهتر می باشد. گرچه بعلمت پدیده کالوانیک؛ لوله ها و یا قطعات فولادی دچار خوردگی می شود، معذالک با انتخاب مناسب سطح مقطع آن در طول عمر مفید پست مقرون به صرفه می باشد ولی چنانچه در مناطقی بعلمت وجود املاح مخیظف در خاک هادی مسی نیز دچار پدیده کالوانیک سریع شود بهتر است در این مناطق از هادی مسی با روکش قلع استفاده شود و طبیعتا هزینه بیشتری را در بر خواهد داشت. و لذا در این مناطق چون خوردگی روی قطعات فولادی و استراکچرها بعلمت همین خاصیت پبیلی شدن هادیها بیشتر خواهد شد لذا بایستی با روشهایی در امر تسریع این پدیده روی قطعات فلزی دیگر اجتناب ورزید بعنوان مثال میتوان با روکش کردن قطعات فلزی از پلاستیک و یا ترکیبات آسفالت و یا هر دو و نیز عبور دادن هادی مسی با فاصله کافی از قطعات فلزی و بمورت ۹۰ درجه و در ضمن آن استفاده از پوشش مناسب روی قطعات فلزی ازین پدیده تا حدود زیادی جلوگیری کرد. هادی آلومینیمی بعلمت آنکه در خاک بسیار سریعتر دچار خوردگی میشود و در مقابل نیروهای مکانیکی و الکتریکی مقاومت کمتری از خود نشان میدهد در پستهای معمولا روباز مورد استفاده قرار نمیگیرد.

۱ - ۵ انتخاب سطح مقطع مناسب :

امروزه، فرمول تجربی زیر که توسط سوراکی "Sverak" استخراج شده است برای انتخاب

قابلیت حمل جریان الکتریکی مناسب هادی. با توجه به کلیه جوانب آن معمول شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

$$I = A \sqrt{\frac{(TCAP * 10^{-4}) \ln(k_0 + T_m)}{t_c * \alpha_r * \rho_r}} \quad (27) \quad \text{رابطه}$$

که در آن :

I = شدت جریان موثر به کیلوآمپر

A = سطح مقطع هادی به میلی‌متر مربع

T_m = حداکثر درجه حرارت مجاز هادی به درجه سانتیگراد

T_a = حداکثر درجه حرارت طبیعی محیط کار هادی به درجه سانتیگراد

T_r = درجه حرارت مبنا با توجه به خصوصیات هادی به درجه سانتیگراد

α_0 = ضریب حرارتی هادی الکتریکی در صفر درجه سانتیگراد

α_r = ضریب حرارتی هادی الکتریکی در درجه حرارت مبنا

ρ_r = مقاومت الکتریکی هادی زمین در درجه حرارت مبنا بر حسب $\mu A.C_m$

K_0 = ضریب ثابت و برابر با $1/\alpha_0$ یا $1/\alpha_r$

t_c = زمان انتقال جریان از هادی

$TCAP$ = ضریب ظرفیت حرارتی هادی بر حسب $J/Cm^3/C^\circ$

نکته قابل ذکر اینست که ρ_r و α_r هر دو بایستی در درجه حرارت مبنای r تعریف شده باشند. جدول ۱ اطلاعات لازم را در مورد ρ_r و α_r در ۲۰ درجه سانتیگراد در اختیار میگذارد.

حال چنانچه سطح مقطع هادی به CM (Circular Mils) داده شده باشد معادله بالا به صورت زیر در خواهد آمد.

$$I = 5.0671 * 10^{-6} * A * \sqrt{\frac{TCAP * \ln(K_0 + T_m)}{t_c * \alpha_r * \rho_r}} \quad (28) \quad \text{رابطه}$$

در معادله بالا با این فرض که حرارت ایجاد شده در هادی باقی خواهد ماند و پراکنده نخواهد شد و نیز با فرض ثابت بودن مجموع گرمای ویژه و وزن مخصوص و ضریب ظرفیت حرارتی هادی، استخراج شده است. (با افزایش گرمای ویژه و وزن مخصوص کاهش می‌یابد و بالعکس)

Table 1
Material Constants

Description	Material Conductivity (%)	α Factor @ 20C°	K (1/0) @ 0 C°	Fusing Temperature (C°)	ρ @ 20 F $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	TCAP Factor Effective Value (J/cm ³ °C)
Standard Annealed Soft Copper Wire	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Commercial Hard Drawn Copper Wire	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Copper-Clad Steel Core Wire	40.0	0.00378	245	1084/ 1300	4.397	3.846
Copper-Clad Steel Core Wire	30.0	0.00378	245	1300/	5.862	3.846
Commercial EC Aluminum Wire	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminum Alloy Wire 5005	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aluminum Alloy Wire 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Aluminum Alloy Steel Core Wire	20.3	0.00360	258	660/ 1300	8.4805	2.670
Zinc-Coated Steel Core Wire	8.5	0.00320	293	419/ 1300	20.1	3.931
Stainless Steel No 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

بنابراین تجربه برای اکثر فلزات و هادی‌ها معادلات بالا در حدود وسیعی از تغییرات درجه حرارت و در محدوده چند ثانیه از شدت جریان اتصال کوتاه معبر و قابل استفاده است و لذا خطای آن در حدود قابل قبول می‌باشد.

چنانچه خصوصیات مربوط به ماده هادی بخصوصی در جدول بالا وجود نداشته باشد بایستی با استفاده از کتب مرجع اطلاعات کافی را در مورد گرمای ویژه و وزن مخصوص هادی برای تعیین عدد مربوط به ضریب ظرفیت حرارتی هادی پیدا کرد. گرمای ویژه (S.H) با واحد $(\text{Cal}/\text{gram}/\text{C}^\circ)$ و وزن مخصوص (S.W) با واحد $(\text{gram}/\text{Cm}^3)$ و ظرفیت حرارتی در واحد حجم هادی با واحد $(\text{W.S}/\text{Cm}^3)$ خواهند بود و رابطه بین آنها بقرار زیر است.

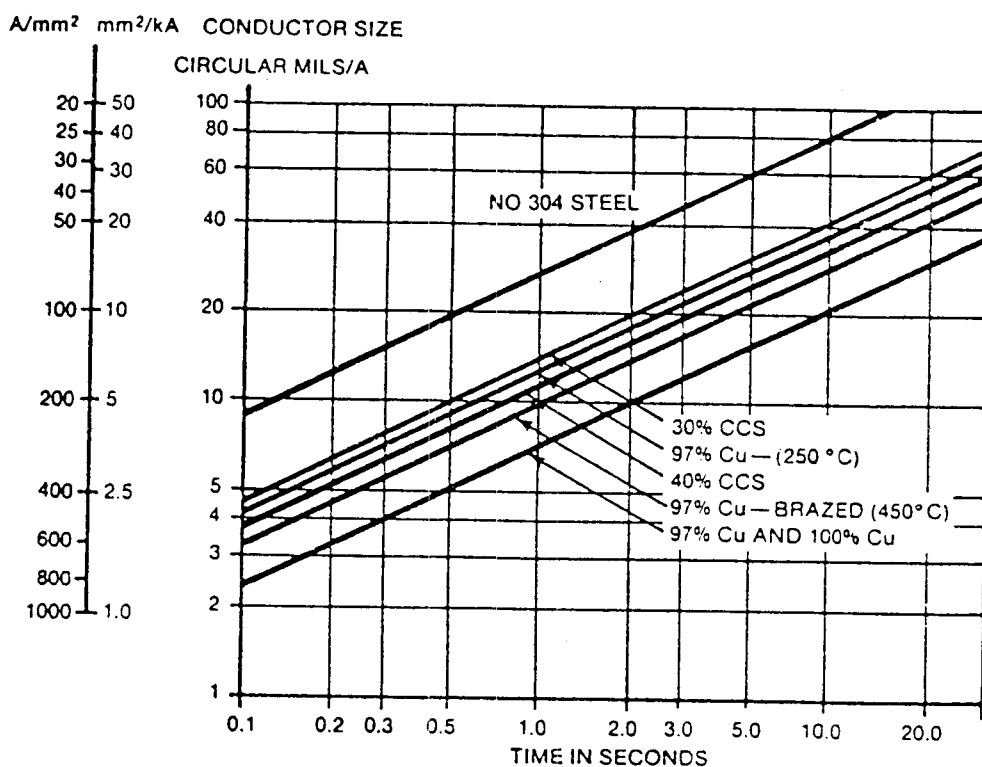
$$(\text{Cal}/\text{gram}/\text{C}^\circ) * (\text{gram}/\text{Cm}^3) = 4.184(\text{WS}/\text{Cm}^3/\text{C}^\circ)$$

$$1 \text{ WS} = 1 \text{ joule}$$

لذا رابطه بین ضریب ظرفیت حرارتی هادی و گرمای ویژه و وزن مخصوص بقرار زیر است.

$$\text{TCAP} = 4.184 * (\text{S.H}) * (\text{S.W})$$

Nomogram for Conductor Sizing



Minimum per Unit Conductor Sizes (cmils/A)

Fault Time (s)	Minimum per Unit Conductor Sizes (cmils/A)					97% Cu. Temperature Limits	
	100% Cu Only	97% Cu Only	40% CCS Only	30% CCS Only	97% Cu Only	(450 °C)	(250 °C)
30.0	38.4	38.7	57.0	65.8	51.1	64.5	
4.0	14.0	14.2	20.8	24.0	18.7	23.5	
1.0	7.0	7.1	10.4	12.0	9.3	11.8	
0.5	4.9	5.0	7.4	8.5	6.6	8.3	

وزن مخصوص با واحد $S.W = \text{gram/cm}^3$ گرمای ویژه با واحد $SH = \text{Cal/gram/C}^\circ$
با استفاده از دو فرمول بالا می توان سطح مقطع هادی را به صورت زیر تعریف یا استخراج کرد.

$$A_{mm^2} = I(KA) \sqrt{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln [1 + \frac{(T_m - T_a)}{K_0 + T_a}]}} \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

یا :

$$A_{cmils} = 1973.52 * I \sqrt{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln [1 + \frac{(T_m - T_a)}{k_0 + T_a}]}} \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

در طرح بسیاری از شبکه ها معمولا از هادیهای عنوان شده در جدول و منحنی صفحه بعد استفاده می شود و لذا می توان تحت شرایط کار عادی با توجه به زمان وقوع خطا مقدار حداقل سطح مقطع را با در دست داشتن شدت جریان اتصال کوتاه از جدول مربوطه استخراج نمود. (جدول در صفحه قبل)

شرایطی که جدول شماره ۲ بر مبنای آن تهیه شده است بقرار زیر میباشد .

- ۱ - درجه حرارت محیط برابر با ۴۰ درجه سانتیگراد .
- ۲ - حداکثر مجاز درجه حرارت برای اتصالات برنج ۴۵ درجه سانتیگراد .
- ۳ - حداکثر مجاز درجه حرارت برای کابل‌های حساس و اتصالات پیچ و مهره ای ۲۵ درجه سانتیگراد .
- ۴ - درجه حرارت ذوب مطابق ارقام داده شده در جدول شماره ۱ .
- ۵ - انتخاب اتصالات

تمام اتصالاتی که قسمتهای مختلف را به هادیها و الکترودهای شبکه زمین که بطور الکتریکی یکپارچه شده اند متصل می نماید می بایستی از حیث هدایت لکتریکی، ظرفیت انتقال حرارتی، استقامت مکانیکی و قابلیت اطمینان مورد ارزیابی و تحلیل قرار

گیرند. مطمئناً ضروری است که اطمینان کافی از بابت تحمل نیروهای مکانیکی در قبال اعمال جریان اتصال کوتاه با توجه به خوردگی و زوال هادی در خاک در طول عمر مفید کار آن بایستی حاصل شده باشد و طبیعی است که نیروهای الکترو مکانیکی حاصل از جریان اتصال کوتاه می‌تواند شدید باشد. در مورد هادی زمین خطوط انتقال نیرو (SHIELD WIRE) نیز بایستی به انبساط طول آن بعد از عبور جریان اتصال کوتاه و آهسته سرد شدن هادی، توجه کافی مبذول شود.

استفاده از اتصالات جوشی و یا برنج‌پوشی نوع فشاری در انجام اتصالات زمین بسیار معمول و متداول می‌باشند مشروط بر آنکه انتخاب و نحوه استفاده آنها بطور مناسب انجام شده باشند. نکات مهم در انتخاب اتصالات بشرح زیر هستند.

۱ - چنانچه بعلل مکانیکی آبدیدن هادی مسئله مهمی تلقی شود بدون توجه به نوع اتصالات حداکثر مجاز افزایش درجه حرارت آنرا بایستی ۲۵۰ درجه سانتیگراد گرفت.
۲ - برای اتصالات برنج‌پوشی حداکثر افزایش درجه حرارت برابر با ۴۵۰ درجه سانتیگراد منطقی و محتمل بنظر می‌آید. گرچه بعضی از اتصالات از این نوع ممکن است در درجه حرارت کمتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد شروع به ذوب شدن نمایند.

۳ - اتصالات جوشی چون بطور یکپارچه با هادی درگیر و ترکیب میشوند دارای همان درجه حرارت نقطه ذوب می‌باشند، از اینرو می‌توانند بعنوان یک جزء کامل و لاینفک شبکه زمین تلقی شوند.

۴ - اتصالات پرسی به انواع گوناگون ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرند. بطور کلی اتصالات پرسی در درجه حرارت کار کمتری نسبت به هادی اصلی کاربرد دارند. و بنا بر خاصیت قابلیت پراکنندگی حرارت روی اتصالات نسبتاً بزرگ هادی می‌تواند قبل از ذوب شدن اتصالات مربوطه به حالت ذوب در آید. در حال حاضر راهنمای IEEE جداول و اطلاعات فنی مناسبی را در نحوه کاربرد این نوع اتصالات ارائه می‌نماید. و حدود درجه حرارت کار این نوع اتصالات را بین ۳۵۰ - ۲۵۰ درجه سانتیگراد پیشنهاد می‌نماید.

۳ - ۵ فاکتورهای موثر در حدود اندازه اتصالات

کلا طراح شبکه زمین بایستی اقدامات احتیاطی در جهت حصول اطمینان از قابلیت هدایت

کافی ضعیفترین اجزاء شبکه زمین را در نظر داشته باشد. ضمناً بذل توجه به موارد زیر مفید خواهد بود.

- توجه کردن به حدود درجه حرارت کمتر در کاربرد هادیهای که در شرایط خاصی هستند مثلاً هادیهای که در نزدیک مواد اشتعال زا قرار دارند از حساسیت بیشتری برخوردار خواهند بود.

- با توجه به شرایط محیطی و خصوصیات شیمیایی خاک مسئله خوردگی و آسیب پذیری هادی و طول عمر مفید کار آن در نظر گرفته شود و در ضمن با توجه باینکه جریان اتصال کوتاه در شبکه داخل زمین با مسیرهای مختلف توزیع میگردد و جزئی از جریان اتصال کوتاه از هادی بخصوصی عبور خواهد کرد. لذا بهتر است هادیهای که از پای تجهیزات به شبکه متصل میگردد قویتر و مناسبتر انتخاب گردد.

۶- ارزیابی مقاومت الکتریکی شبکه زمین

۶-۱ مدل تک لایه خاک

شبکه زمین ایده آل شبکه ایست که نسبت به نقطه دوردست از لحاظ الکتریکی مقاومتی نزدیک صفر داشته باشد. در حالیکه در عمل متناسب با شدت جریان اتصال کوتاه، اختلاف پتانسیل شبکه نسبت به همان نقطه زمین الکتریکی دوردست، افزایش پیدا می کند. و در واقع با افزایش شدت جریان اتصال کوتاه این اختلاف پتانسیل بیشتر شده و بالعکس کاهش می یابد. برای بسیاری از شبکه‌های زمین در خطوط انتقال نیرو و پستهای فشار قوی بزرگ مقاومت الکتریکی شبکه زمین می بایستی کمتر و یا در حد یک اهم ارزیابی شود و برای پستهای فشار قوی کوچک مقدار آن می تواند بین ۱ تا ۵ اهم متناسب با شرایط خاص مکانی محاسبه شود.

برای طراحی شبکه زمین اولین کار ارزیابی مقاومت الکتریکی شبکه زمین نسبت به نقطه دوردست است. و میزان این مقاومت متناسب با سطح پوشش شبکه زمین و در عمل میتوان شبکه را معادل با دیسکی دایره ای شکل به شعاع r تصور نمود. لذا مقاومت آنرا می توان بصورت زیر بیان کرد.

$$R_g = \rho / 4 \times \sqrt{\pi / A} \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

که در آن R_g مقاومت الکتریکی شبکه زمین و ρ میزان مقاومت الکتریکی خاک پست. A سطح مورد پوشش شبکه زمین است که $\sqrt{\pi/A}$ شعاع دیسک فرضی فوق‌الذکر خواهد حال می‌توان با توجه به طول کلی هادی مدفون در شبکه زمین، رابطه فوق را به مقدار واقعی نزدیکتر ساخت.

$$R_g = \rho/4 \sqrt{\pi/A} + \rho/L \quad (۳۲)$$

که در این رابطه L برابر با طول کلی هادی مدفون در شبکه زمین است. در واقع شبکه مشکل از تعدادی هادی به صورتی که در فوق بدان اشاره شد، مسلماً نمی‌تواند همان مقاومتی که یک دیسک فلزی دایره‌ای شکل از خود نشان می‌دهد را داشته باشد. لیکن در صورتیکه طول کلی هادیها در آن شبکه بسیار زیاد باشد به نحوی که جزء ρ/L به سمت صفر میل کند بنابراین آموخته‌های تجربی همان خصوصیات الکتریکی را با تقریب نسبتاً خوبی از خود نشان خواهد داد. و لذا روابط فوق عملاً صادق هستند. در صورتیکه شبکه زمین فوق‌الذکر در عمق کمتر از ۲۵ سانتی‌متر در خاک همگون قرار داشته باشد روابط بالا صادق خواهد داشت ولی در صورتیکه عمق دفن شبکه از ۲۵ سانتی‌متر تا ۲/۵ متر افزایش پیدا کند رابطه فوق به صورت رابطه تجربی زیر تغییر پیدا خواهد کرد.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20}A} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (۳۳)$$

که در آن h عمق متوسط دفن هادی‌های شبکه زمین می‌باشد.

در مورد فرمولهای قبلی ذکر نکات زیر ضروریست.

۱ - رابطه (۳۱) تنها در صورتیکه بخواهیم حداکثر شدت جریان اتصال کوتاه پستی را ارزیابی کنیم، و به دانستن حدود مقاومت شبکه زمین احصیاج داشته باشیم قابل استفاده خواهد بود.

۲ - روابط (۳۲) و (۳۳) برای ارزیابی مقدماتی شبکه زمین و تعیین طول تقریبی هادیهای زمین برای کنترل ولتاژهای کام و تماس قابل استفاده است.

۳ - برای ارزیابی دقیقتر - شبکه زمین که در آنها میله‌های زمین نیز بکار برده شده باشد می‌بایستی از معادلات "شواریتر" که در شکل ۲-۱ توضیح داده خواهد شد استفاده شود.

۲-۶- مدل دو لایه خاک

با وجودیکه بهترین حالت برای معرفی سیستم زمین تعیین دقیق مقاومت الکتریکی با توجه به تغییرات آن در سطح پست میباشد با این حال حداکثر حالات، اندازه گیری دقیق تغییرات آن، هم از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر نیست و هم از لحاظ فنی منطقی بنظر نمیرسد. با این وجود در بیشتر موارد، معرفی سیستم زمین با مدل دو لایه برای طراحی شبکه زمین با توجه به موارد ایمنی آن کافی خواهد بود.

در مدل دو لایه، وضعیت خاک پست با تعیین ارتفاع لایه بالایی "H" و مقاومت الکتریکی آن با "P_۱" و همچنین مقاومت الکتریکی لایه زیرین "P_۲" معرفی میشود و تغییرات مقاومت الکتریکی خاک در سطح تماس دو لایه با ضریب انعکاس K و با تعریف زیر بیان میگردد.

$$K = \frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1}$$

با توجه به رابطه بالا مقدار K بین اعداد +۱ و -۱ در تغییر خواهد بود. در جاهایی که تفاوت مقاومت خاک دو لایه بسیار زیاد است ضریب فوق به عدد واحد مثبت یا منفی بسیار نزدیک خواهد شد. ضریب انعکاس فوق در حالتی که خاک تقریباً بصورت یکنواخت توزیع شده باشد نزدیک صفر خواهد بود.

در صورتیکه با افزایش عمق خاک مقاومت آن نیز افزایش یابد K مثبت و در غیر اینصورت K منفی خواهد بود. برای مدل کردن یک زمین با دو لایه از جنس خاک با مقاومتهای الکتریکی متفاوت روشهای متعددی وجود دارد و در صورت استفاده از روشهای ساده وقت انجام کار کمتر خواهد بود و در صورت استفاده از محاسبات پیچیده تر و کامپیوتر دقت کار بیشتر خواهد شد. برای مقادیر مثبت K یعنی $P_2 < P_1$ مقاومت معادل پست و گرا دیان ولتاژهای سطحی شبکه در حالتی که خاک با مقاومت P_2 منفی K یعنی $P_2 > P_1$ مقاومت معادل پست و گرا دیان ولتاژهای سطحی شبکه از حالتی که خاک با مقاومت P_2 و یکنواخت فرض شود بیشتر خواهد بود. باین خاطر که جریان در سطح شبکه تمایل به دسترسی به لایه پائین تر با مقاومت کمتر دارد. ذکر این نکته ضروریست که میلههای زمین بعلمت نفوذ به لایه پائین تاثیر قابل ملاحظه ای در کنترل پارامترهای شبکه دارند. مثلاً چنانچه K منفی باشد مقاومت معادل پست و ولتاژهای گام و تماس به نحو قابل ملاحظه ای با افزایش تعداد میلههای زمین کاهش می یابند و چنانچه ارتفاع لایه بالایی در حد متوسط و یا کم باشد مقدار زیادی از جریان اتصال کوتاه به لایه پائین نفوذ میکند و باعث کاهش ولتاژهای تماس و گام میشود.

با افزایش H وضعیت خاک پست به حالت همگن با مقاومت ρ_1 نزدیک میشود. چنانچه K مثبت باشد در این صورت قسمت اعظم جریان در قسمت لایه بالایی گردش میکند و لذا دانسته جریان در هادیهای پیرامونی شبکه بعلاوه تمایل دسترسی جریان به مقاومت پائین تر بیشتر میشود. در این صورت تاثیر میله‌های زمین بستگی زیادی به ارتفاع لایه بالایی خواهد داشت و حتی با توجه به مقادیر K و H ممکن است طول میله‌های زمین تاثیر خیلی زیادی در کنترل مقادیر مربوط به مقاومت معادل پست و گرادیان ولتاژهای سطحی شبکه نداشته باشد. ولی بهر حال وجود میله‌های زمین در مقایسه با حالتی که از میله زمین استفاده نشده باشد موثرتر خواهد بود.

دو مدل دو لایه‌ای خاک مقدار مقاومت معادل ایستگاه با توجه به مقادیر ρ_1 و H و ρ_2 و طول میله‌های زمین و سایر پارامترهای شبکه از فرمول شوارتز که در بخش ۲-۶ بطور کامل عنوان خواهد شد به عینه استفاده میگردد. و همچنین برای تعیین مقادیر مربوط به ولتاژهای گام و تماس با توجه باینکه بخش اعظم شبکه در لایه بالایی مدفون است از همان روابطی که در بخشهای ۴ و ۸ مربوط به خاک همگن عنوان گردیده است استفاده میشود.

۳ - ۶ معادله شوآرتز "

مقاومت کلی یک شبکه شامل هادیهای موازی افقی و یا حتی عمودی (میله های زمین) از مقاومت الکتریکی هر کدام به تنهایی کمتر است ولی از حالت ترکیب موازی آنها هنوز بیشتر است.

مقاومت کلی شبکه که بطور تجربی بدست آمده و توسط شوآرتز بیان شده مطابق زیر خواهد بود.

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

که در آن:

R_1 = مقاومت هادیهای افقی شبکه

R_2 = مقاومت میله های عمودی مدفون در شبکه

R_{12} = مقاومت متقابل بین هادیهای افقی و میله های عمودی زمین

شوآرتز با فرض همگون بودن خاک پست و رابطی را بر اساس پارامترهای شبکه برای مقادیر R_1 و R_2 و R_{12} تعریف کرده است که بقرار زیر می باشد.

$$R_1 = (\beta_1 / \pi l_1) * (\ln(2l_1/h') + K_1 (l_1/\sqrt{A}) - k_2) \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

$$R_2 = (\beta_a / 2\pi l_2) [\ln(8l_2/d_2) - 1 + 2K_1 (l_2/\sqrt{A}) (\sqrt{n} - 1)^2] \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

$$R_{12} = (\beta_a / \pi l_1) [\ln(2l_1/l_2) + K_1 (l_1/\sqrt{A}) - K_2 + 1] \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

که در آنها:

β_1 = مقاومت الکتریکی خاک در عمق h به $(\Omega \cdot m)$ که توسط هادیهای شبکه رویت میشود

β_a = مقاومت الکتریکی ظاهری خاک که توسط میله های زمین رویت می شود به $(\Omega \cdot m)$

H = ضخامت لایه شن یا سنگ شکسته پخش شده روی شبکه به (m)

β_2 = مقاومت الکتریکی خاک در عمق H به $(\Omega \cdot m)$

l_1 = طول کل هادیهای شبکه زمین به متر

l_2 = طول میله های زمین به متر

h = عمق دفن هادیهای شبکه زمین به متر

$$h' = \sqrt{d_1 h}$$

رابطه فوق برای هادیهای مدفون در عمق h صادق است و یا برابر است

با $0.5d_1$ برای هادیهای واقع در روی زمین.

A = سطح مورد پوشش شبکه زمین به مترمربع

n = تعداد میله های زمین مدفون در سطح کل شبکه به مساحت $A = a*b$

$K_1, K_2 =$ ضرایب ثابت مربوط به هندسه شبکه زمین (شکلهای ضمیمه ب)

$d_1 =$ قطر هادی شبکه زمین به متر

$d_2 =$ قطر میله های زمین به متر

a = ضلع کوچکتر شبکه زمین به متر

b = ضلع بزرگتر شبکه زمین به متر

روابط (۳۵) و (۳۶) و (۳۷) برای محیط های دو لایه صادق هستند که لایه بالایی ضخامت

H را دارد و قسمت اعظم میله های زمین در لایه پایینی قرار گرفته است. در چینی

حالتی باید ρ_1 که مقاومت الکتریکی لایه بالایی است از ρ_2 که مقاومت الکتریکی

لایه پایین است بیشتر باشد و نیز شبکه زمین مدفون در لایه بالایی با مقاومت الکتریکی

ρ_1 باشد. در چنین حالتی R_2 و R_{12} را می توان با استفاده از رابطه زیر راحتتر

محاسبه کرد.

$$\rho_a = l_2 (\rho_1 \rho_2) / (\rho_2 \cdot H + \rho_1 (l_2 - H)) \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

که در آن ρ_a برابر است با مقاومت الکتریکی ظاهری خاک که توسط میله های زمین

رویت می شود.

معادله فوق زمانی صادق خواهد بود که قسمت فوقانی میله های زمین در سطح زمین طبیعی

پست قرار داشته باشد. ولی چنانچه قسمت فوقانی میله های زمین در عمق هادیهای شبکه

زمین واقع شوند رابطه بالا بصورت زیر در خواهد آمد.

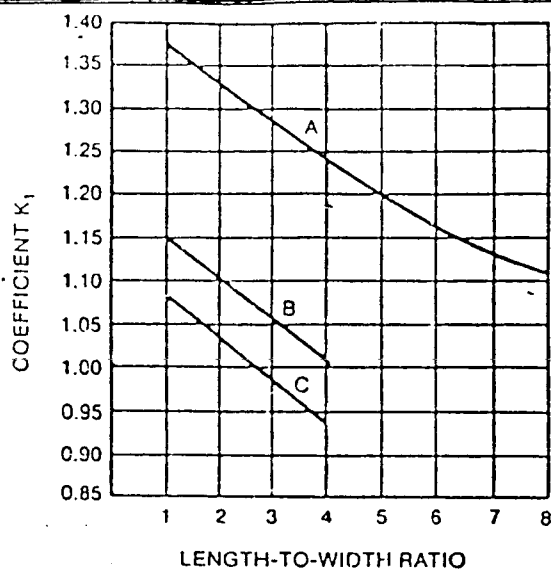
$$\rho_a = l_2 (\rho_1 \rho_2) / (\rho_2 \cdot (H-h) + \rho_1 (l_2 + h-H)) \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

چنانچه ρ_1 و ρ_2 خیلی بهم نزدیک باشند و ضخامت لایه بالایی (H) حداقل در حدود

$b/1$ باشد معادلات فوق به راحتی قابل استفاده خواهند بود.

طبیعتاً در شبکه متشکل از هادیهای موازی و متقاطع و میله های زمین که نسبت به

شبکه بطور عمودی و در محیط گسترده شبکه زمین قرار گرفته اند مقاومت متقابل اجزاء



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$

$$y_A = -0.04x + 1.41$$

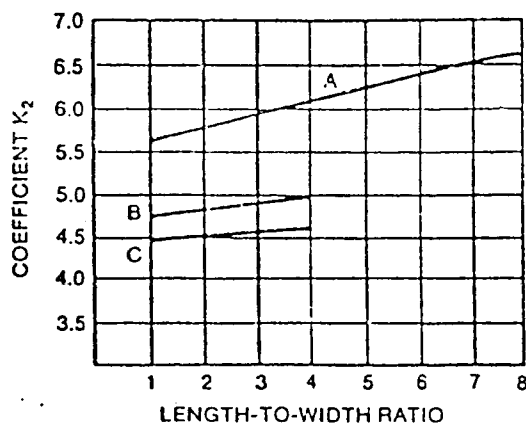
CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

$$y_B = -0.05x + 1.20$$

CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$

$$y_C = -0.05x + 1.13$$

Coefficients K_1 and K_2 of Schwarz's Formula
(a) Coefficient K_1



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$

$$y_A = 0.15x + 5.50$$

CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

$$y_B = 0.10x + 4.68$$

CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$

$$y_C = -0.05x + 4.40$$

(b) Coefficient K_2

شبکه در تعیین مقاومت کبی شبکه بسیار موثر است و ارزیابی دقیق آن نیاز به محاسبات کامپیوتری و سپس بررسی نتایج آن دارد.

۷ - تعیین حداکثر جریان منتقل شده به شبکه زمین

۱ - ۷ روش و تعاریف مربوطه

برای محاسبه تعیین حداکثر شدت جریان منتقل شده به شبکه زمین (I_g) به ترتیب زیر عمل می شود.

۱ - ارزیابی نوع و محل جریانهای خطا که احتمالا بیشترین مقدار جریان را بین شبکه زمین و محیط اطراف جاری می نمایند و از بینو بیشترین پتانسیل الکتریکی شبکه نسبت به نقطه زمین دوردست را ایجاد می نماید و یا بیشترین گرادیان پتانسیل در سطح پست را باعث میشود.

۲ - تعیین ضریب توزیع جریان (S_f) بروشهای محاسباتی برای هر کدام از انواع جریانهای خطا و مشخص نمودن شدت جریان متقارن اتصال کوتاه جاری شده به شبکه (I_g).
۳ - برای هر کدام از انواع خطا متناسب با زمان انتظار جریان اتصال کوتاه (t_f) ضریب کاهش شدت جریان غیر متقارن (D_f) تعیین گردد.

۴ - انتخاب حداکثر مقدار مربوط به حاصلضرب (D_f) و (I_g) برای تعیین بدترین نوع خطا و تعیین ضریب توسعه شبکه (C_p). تعاریف مربوط به موارد بالا بشرح زیر خواهند بود.

- مولفه های متقارن جریان شبکه :

عبارتست از آن قسمتی از شدت جریان متقارن خطا که بین شبکه زمین و محیط اطراف جاری میگردد و عبارتست از :

$$I_g = S_f \cdot I_f \quad \text{رابطه (۴۰)}$$

که در آن: مقدار موثر شدت جریان متقارن خطا به آمپر I_f ،

$$I_g = \text{مولفه متقارن شدت جریان شبکه زمین به آمپر}$$

$S_f =$ ضریب توزیع جریان خطا که برابر است با نسبت آن قسمتی از جریان که

بین شبکه زمین و محیط اطراف جاری می‌گردد به شدت جریان خطا (I_f).

- حداکثر شدت جریان منتقل شده به شبکه :

حداکثر شدت جریان منتقل شده به شبکه که در طراحی شبکه بکار گرفته می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$I_G = C_p \cdot D_f \cdot I_g \quad \text{رابطه (۴۱)}$$

$I_G =$ حداکثر شدت جریان منتقل شده به شبکه به آمپر

$D_f =$ ضریب کاهش شدت جریان خطا در طول کلی زمان برقراری خطا به ثانیه

$C_p =$ ضریب توسعه شبکه در طول عمر مفید آن، چنانچه هیچ توسعه‌ای در آینده در شبکه انجام نگیرد مقدار آن برابر با یک خواهد بود.

$I_g =$ مقدار موثر شدت جریان متقارن شبکه زمین به آمپر (شدت جریان تریق شده به شبکه زمین)

- ضریب توزیع جریان خطا :

ضریبی است که نسبت شدت جریان متقارن خطا را به آن قسمتی ازین جریان که بین شبکه زمین و محیط اطراف جاری می‌گردد بیان می‌نماید و برابر است با :

$$S_f = \frac{I_g}{3 I_0} \quad \text{رابطه (۴۲)}$$

$I_g =$ مقدار موثر شدت جریان متقارن شبکه

$I_0 =$ مولفه صفر جریان خطا

- راکتانس فوق کذرا :

عبارتست از راکتانس ژنراتور در لحظه وقوع خطا. این راکتانس برای محاسبه جریان اتصال کوتاه متقارن در لحظه وقوع خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. علیرغم آنکه مقدار آن پس از وقوع خطا دائما در حال کاهش است. با اینحال با تقریب خوب در ۰.۵/ ثانیه اول آن با مقدار ثابت فرض می‌شود.

- راکتانس سنکرون :

عبارتست از راکتانس پایداری دائم ژنراتور در شرایط خطا که برای تعیین شدت جریان

دائم اتصال کوتاه مورد استفاده قرار نسیکیرد. شدت جریان محاسب شده بدون تاثیر رگولاتور ولتاژ اتوماتیک و یا کاورتر منظور میشود.

- dc offset :

عبارتست از تفاوت بین موج شدت جریان متقارن و شدت جریان واقعی در شرایط گذرای سیستم شبکه قدرت. از لحاظ ریاضی شدت جریان واقعی می تواند به دو بخش مجزا تقسیم گردد. یکی مولفه متقارن جریان متناوب و دیگری مولفه dc یکجته و یا یکی از اینها بتنهائی و یا هر دو، که معمولا هر دو آنها می تواند باشد. مولفه dc یکجته می تواند مثبت و یا منفی بوده ولی بهر حال با حفظ پولاریته خود بعد از مدت مشخصی محو خواهد شد.

- فاکتور dc offset :

عبارتست از نسبت پیک شدت جریان خطا به پیک مقدار متقارن آن.

- نسبت X/R :

عبارتست از نسبت راکتانس اندوکتیو سیستم به مقاومت آن و متناسب می باشد با نسبت L/R (ثابت زمانی سیستم) و بنابراین برابر است با میزا محو شدگی dc offset. ازینرو هرچه نسبت X/R بزرگتر باشد ثابت زمانی سیستم بیشتر و لذا میزان محو شدگی آن کمتر خواهد بود.

۲ - ۷ انواع جریان خطای زمین

انواع بسیاری از جریانهای خطا به زمین وجود دارند. لیکن بعلمت عدم دسترسی به قوانین ساده بسیار مشکل می توان آن نوعی که بیشترین مقدار جریان خطا را به شبکه زمین میفرستد مشخص نمود.

با اینحال برای تعیین عملی انواع خطا بایستی به احتمال وقوع خطاها در سیستم توجه داشت. در صورتیکه احتمال وقوع چندین خطای همزمان ناچیز باشد، حتی اگر شدت زیادی هم بهمراه داشته باشند بایستی آنها را بشمار آورد. ازینرو توصیه میگردد به خطاهای ساده خطبه زمین و یا خطاهای خطبه خط و به زمین توجه شود.

حال در صورتیکه خطای خطبه خط و به زمین ایجاد شود، مولفه صفر جریان خطا از فرمول

زیر قابل استخراج خواهد بود .

$$I_0 = \frac{E (R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1) (R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2)) + (R_2 + jX_2) (R_0 + 3R_f + jX_0)} \quad \text{رابطه (۴۳)}$$

در صفحات بعد انواع خطاهای محتمل و معمول ترسیم گردیده است.

در صورت وقوع خطای یکخط به زمین، مولفه صفر جریان خطا از فرمول زیر قابل استخراج خواهد بود .

$$I_0 = \frac{E}{3R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j (X_1 + X_2 + X_0)} \quad \text{رابطه (۴۴)}$$

در بسیاری از حالتها قسمت مربوط به مقاومت فرمولهای فوق ناچیز و قابل صرفنظر کردن است. و عملا معادله ساده شده زیر در موارد بسیار زیادی پاسخگو خواهد بود .

برای خطاهای خط به خط و به زمین

$$1 - I_0 = \frac{EX_2}{X_1 (X_0 + X_2) + X_2 X_0} \quad \text{رابطه (۴۵)}$$

$$2 - I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad \text{رابطه (۴۶)}$$

پارامترها در روابط بالا بصورت زیر تعریف می شوند :

I_0 = مولفه صفر متقارن جریان خطا به آمپر

E = ولتاژ فاز به نول به ولت

R_f = حداقل مقاومت خطا به اهم (معمولا صفر فرض می شود)

R_1 = مولفه مثبت مقاومت معادل سیستم به اهم به فاز که در محل خطا محاسبه میشود

R_2 = مولفه منفی مقاومت معادل سیستم به اهم به فاز که در محل خطا محاسبه میشود

R_0 = مولفه صفر مقاومت معادل سیستم به اهم به فاز که در محل خطا محاسبه میشود

X_1 = مولفه مثبت راکتانس معادل سیستم (راکتانس فوق گذرا) به اهم به فاز در محل

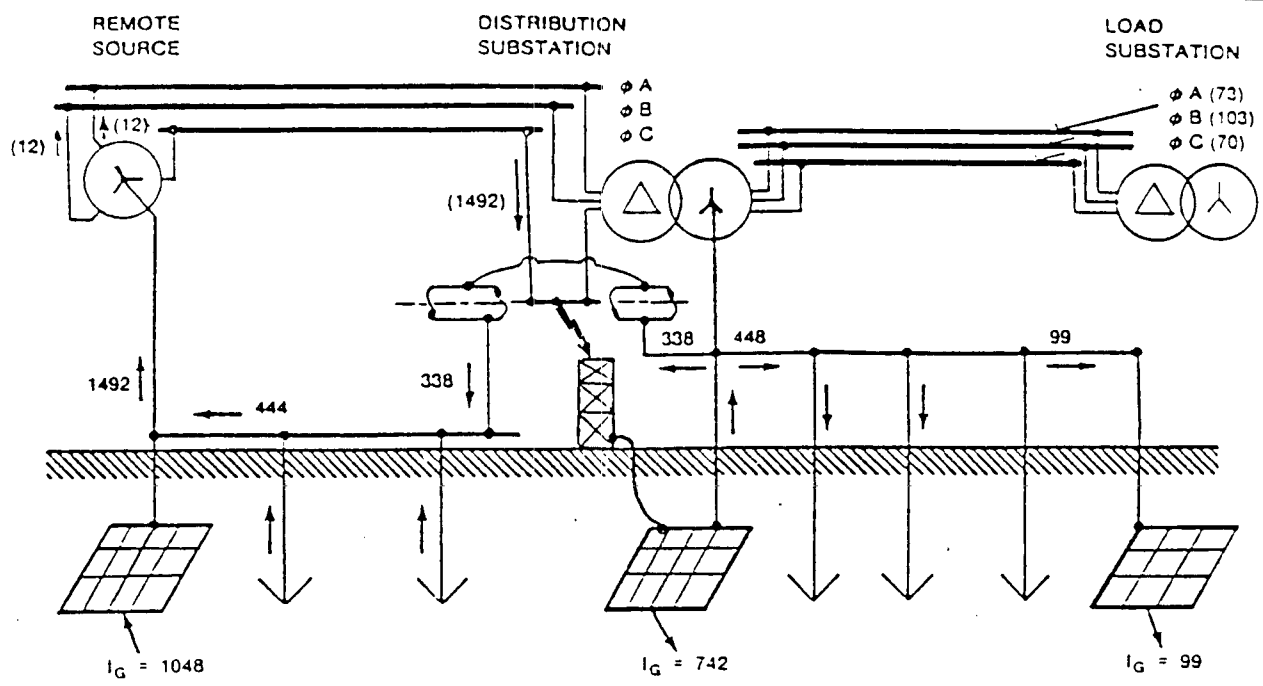
خطا

X_2 = مولفه منفی راکتانس معادل سیستم به اهم به فاز در محل خطا

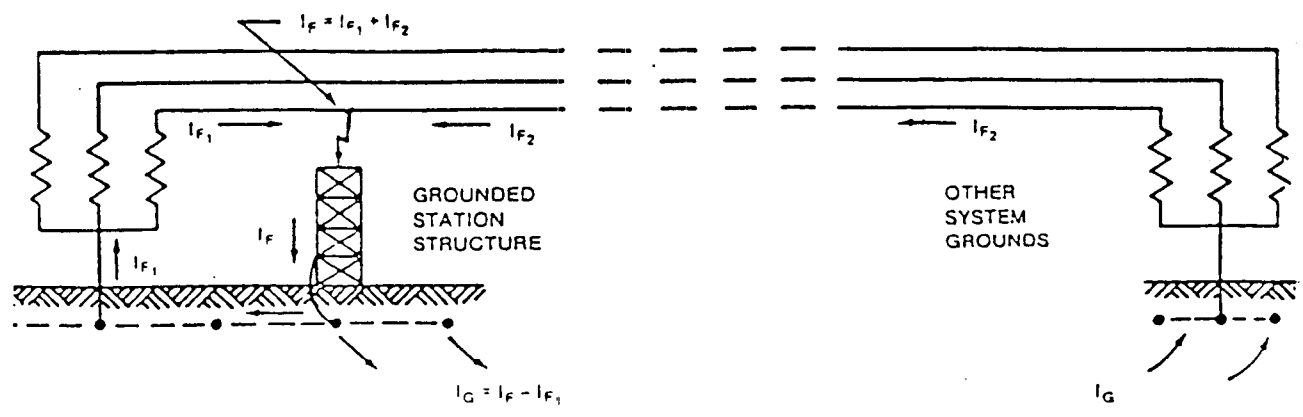
X_0 = مولفه صفر راکتانس معادل سیستم به اهم به فاز در محل خطا

مقادیر مربوط به R_1 و R_2 و R_0 و X_1 و X_2 و X_0 مقادیری هستند که سیستم در محل وقوع

خطا از خود نشان میدهد .

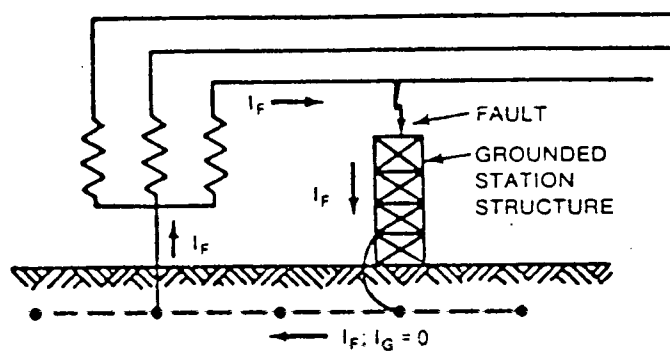


Typical Current Division for a Fault on High Side of Distribution Substation

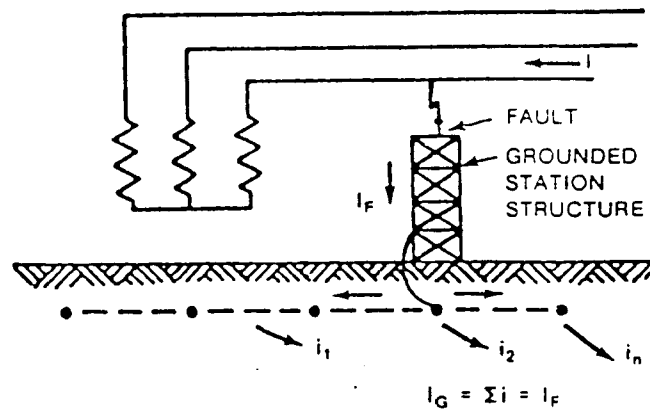


Fault In Station; System Grounded at Local Station and Also at Other Points

Fault Within Local Station; Local Neutral Grounded



Fault Within Local Station; Neutral Grounded at Remote Location



همانوریکه توضیح داده شد برای اندازه گیری دقیق شدت جریان اتصال کوتاه در محل پست به داشتن مقادیر مربوط به حداقل مقاومت خطا، مولفه مثبت راکتانس معادل سیستم در محل خطا، مولفه منفی راکتانس معادل سیستم در محل خطا و مولفه صفر راکتانس معادل سیستم نیاز هست. لیکن با توجه به این نکته که در ارزیابی های اولیه شبکه زمین معمولاً مقادیر فوق در دسترس نیستند لذا با استفاده از تقریب مناسب می توان از روابط زیر، مولفه صفر متقارن جریان خطا را محاسبه کرد. حال با توجه باین نکته که در اکثر حالات غیر از موارد بسیار استثنائی بیشترین مقدار مربوط به مولفه صفر متقارن جریان خطا در خطاهای یکفاز به زمین رخ می دهد خواهیم داشت:

$$I_f = I''_{k1p} = 3 \frac{I''_{k3p}}{2 + X_0/X_1} \quad \text{رابطه (۴۷)}$$

که I''_{k3p} شدت جریان اتصال کوتاه سه فاز متقارن در محل پست بوده که معمولاً جزو پارامترهای معلوم پست می باشد و I''_{k1p} شدت جریان اتصال کوتاه یک فاز می باشد که برابر با $3I_0$ می باشد. در محاسبات ساده و سرانگشتی می توان به موارد زیر نیز توجه نمود:

- بنابر موقعیت پستها و نوع آنها در شبکه ها X_0/X_1 مقدار ^{مورد}ی بین عدد ۱ و ۳ خواهد داشت. در پستهای که در نزدیکی نیروگاهها واقع باشند X_0/X_1 برابر یک خواهد بود و در این حالت بیشترین مقدار مربوط به مولفه صفر جریان خطا را بدست خواهد داد. در صورتیکه پست آنها کلیدها^ن و یا بسیار بزرگ بوده و از حدود نیروگاهها دورتر باشد در اینصورت X_0/X_1 برابر ۲ خواهد بود. و در صورتیکه ایستگاه انتهائی و کوچک و یا در نقطه ای بسیار دور از نیروگاهها واقع شده باشد در اینصورت X_0/X_1 برابر ۳ خواهد بود که کمترین مقدار مولفه صفر جریان را بخود اختصاص خواهد داد.

با توجه به نکات فوق خواهیم داشت:

- برای پستهای واقع در نزدیکی نیروگاهها
- $$I_f = I''_{k3p}$$
- برای پستهای کلیدی یا بسیار بزرگ خارج از حدود نیروگاهها
- $$I_f = 3/4 * I''_{k3p}$$
- برای پستهای انتهائی و کوچک
- $$I_f = 3/5 * I''_{k3p}$$

۳ - ۷ تاثیر مقاومت شبکه زمین ایستگاه

در بیشتر حالات، برای محاسبه شدت جریان خطا به شبکه زمین I_g همانطوریکه قبلا هم اشاره شد از جزء مربوط به مقاومتهای سیستم بعلمت ناچیز بودن آنها در مقابل راکتانسها صرفنظر میشود. از اینرو خطای ایجاد شده در محاسبات ناچیز و قابل اغماض خواهند بود. با اینحال ممکن است مواردی هم وجود داشته باشد که مقاومت زمین ایستگاه باندازه کافی بزرگ بوده و ازینرو در معادلات فوق‌الذکر قابل مطرح کردن باشند. در این موارد چنانچه مقدار دقیق آن روشن نباشد میتوان از معادلات عنوان شده در فصول قبل برای تخمین مقاومت زمین ایستگاه استفاده کرد.

۴ - ۷ تاثیر مقاومت خطا

همانطوریکه شکل‌های فصل ۲ - ۷ نشان میدهد، چنانچه خطا در داخل ایستگاه واقع شده باشد بهتر است مقاومت آنرا صفر فرض نموده، معادلات مربوطه را تحلیل کرد. و در صورتیکه خطا روی یک خط مرتبط با ایستگاه و در خارج از آن اتفاق افتاده باشد (مثل شکل ۲۴)، بهتر است مقدار مینیمی برای مقاومت خطا تخمین زد (R_f) سپس معادلات مربوطه را تحلیل نمود. در اینحالت همانطوریکه معادلات نشان می‌دهد R_f را در عدد ۳ ضرب می‌کنند و حاصل آنرا با سایر مقاومتهای دیده شده از محل خطا در سیستم جمع می‌کنند. در صورتیکه مقدار واقعی مقاومت خطا از R_f استفاده شده در معادلات فوق‌الذکر بیشتر نباشد، از آن صرفنظر می‌کنند.

۵ - ۷ تاثیر سیمهای هوائی زمین و هادیهای نوترال :

چنانچه سیمهای هوائی زمین خطوط انتقال نیرو و یا هادیهای نوترال، به شبکه زمین پست متصل شده باشند در اینصورت این هادیها بخش قابل ملاحظه‌ای از جریان خطا را توسط خود به خارج از شبکه زمین ایستگاه منتقل می‌نمایند. در اینصورت می‌توان در تحلیل معادلات شبکه زمین تاثیر این هادیها را نیز منظور نمود. البته ذکر این نکته

ضروریست که با اتصال سیمای هوایی زمین خطوط انتقال نیرو و هادیهای نوترال به شبکه زمین خطرات داخل ایستگاه کاهش می یابد و لیکن خطرات ایجاد شده روی برجهای خطوط انتقال نیرو متناسباً افزایش می یابند. چون باینترتیب افزایش پتانسیل شبکه زمین در صورت وقوع خطا متناسباً پتانسیل الکتریکی برجهای همجوار ایستگاه را افزایش میدهد و حتی در صورتی ممکن است بجای شکست عایقی در داخل ایستگاه وضعیت مشابه روی برجهای همجوار پست اتفاق افتد. که در این صورت اتصال پایه های مربوطه به شبکه زمین ایستگاه خطرات مربوط به افزایش گرادیان پتانسیل در کنار برجهای راکاهش خواهد داد.

تقسیم جریان اتصال کوتاه توسط القاء و هدایت مستقیم بین شبکه و سیم

هوایی زمین خطوط انتقال نیرو :

بر اساس مطالعات انجام شده توسط "Sunil K. Madan", "B.Thapar" (از اهالی پنجاب هندوستان) در نشریه شماره ۹ ماه سپتامبر ۱۹۸۴ در مجله IEEE، در صورت وقوع اتصال کوتاه در حدود ایستگاههای برق، قسمتی از شدت جریان اتصال کوتاه توسط سیمهای هوایی محافظ خطوط انتقال (SHIELD WIRE) که بهر حال به شبکه زمین ایستگاه مرتبط هستند چه از طریق القاء و چه از طریق هدایت مستقیم از محل ایستگاه دور می شود. قسمتی از جریان که از طریق القاء روی سیم زمین هوایی می افتد با عبارت زیر بیان میگردد.

$$I_i = -m I_l \quad \text{رابطه (۴۸)}$$

$$m = Z_{gm} / Z_g \quad \text{رابطه (۴۹)}$$

$$Z_{gm} = 0.000988.f + j 0.0028938.f. \log \frac{D_e}{10GMD} \quad \text{ohms/Km} \quad \text{رابطه (۵۰)}$$

(امپدانس متقابل بین هادی فاز و سیم زمین هوایی)

$$Z_g = r_c + 0.000988.f. + j 0.0028938.f. \log D_e / 10GMR(G.W) \quad \text{ohms/Km} \quad \text{رابطه (۵۱)}$$

(امپدانس خودی سیم زمین هوایی با زمین طبیعی)

در روابط بالا:

$$D_e = 658.4 \sqrt{\rho/f} \quad \text{رابطه (۵۲)}$$

عمق معادل زمین طبیعی برای برگشت جریان

$r_c =$ مقاومت الکتریکی سیم زمین هواش

$\rho =$ مقاومت الکتریکی خاک طبیعی پای برج

$f =$ فرکانس شبکه

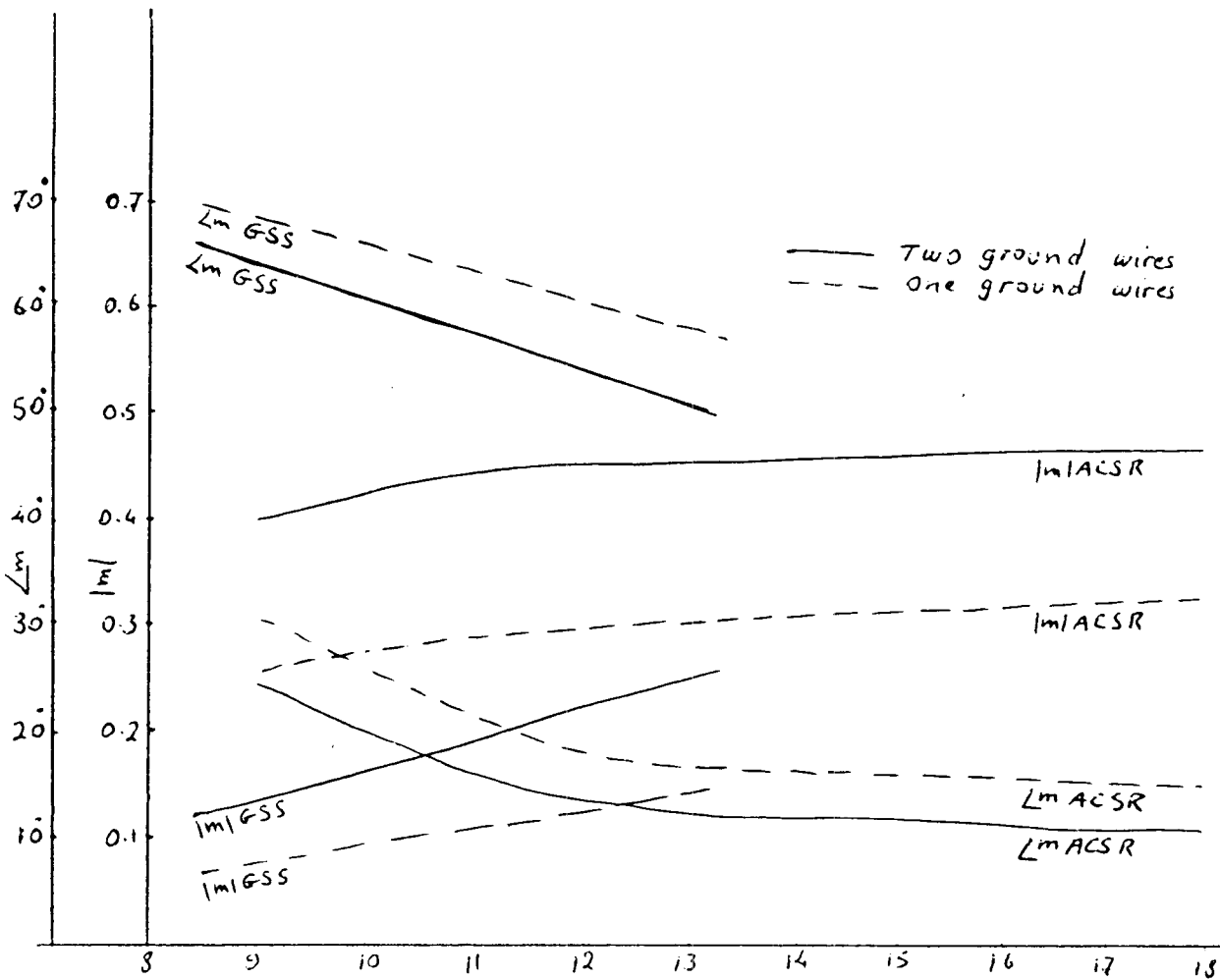
مجموع مطالعات این دو نفر با استفاده از کامپیوتر برای تعیین ضریب (m) در منحنی-های پیوست این فصل جمع آوری شده است.

نکته قابل ذکر اینکه وضعیت فیزیکی هادی های برجها تاثیر چندانی روی ضریب فوق نداشته ولی مقاومت الکتریکی زمین طبیعی پای برجها بین ۵۰ تا ۳۰۰ اهم متر تنها حدود ۱۲٪ روی ضریب فوق تاثیر می گذارد. ولی سطح مقطع و تعداد سیمهای هواش زمین بکار رفته و نیز نوع هادی انتخاب شده به این منظور، روی مقدار این ضریب تاثیر زیادی دارند بعنوان مثال چنانچه از سیمهای نوع ACSR بجای نوع GSS با فرض یکسان بودن سطح مقطع و نیروی کششی آنها استفاده شود، در اینصورت در سیمهای ACSR قابلیت حمل جریان سه برابر نوع GSS خواهد بود. منحنی های نمایش داده شده در صفحه بعد ضریب هدایت جریان اتصال کوتاه را از طریق القاء روی سیمهای زمین خطوط انتقال نیرو بیان می کند و بر حسب دو نوع هادی (ACSR و GSS) و سطح مقطع هادی و تعداد سیمهای زمین خطوط انتقال بیان شده است. از روی منحنی فوق می توان به حداقل سطح مقطع لازم برای شیلد و ایر خط انتقال متصل به ایستگاه نیز پی برد.

قسمتی از شدت جریان اتصال کوتاه از طریق هدایت مستقیم و بوسیله سیم هواش زمین نیز از محل ایستگاه دور می شود. برای روشن شدن این مطلب فرض می کنیم سیم هواش زمین خط انتقال و برجهای نگهدارنده آن بصورت نردبانی تصور شوند که یک پایه آن سیم زمین هواش و دیگری زمین طبیعی پای برجها و پله های آن خود برجها باشند.

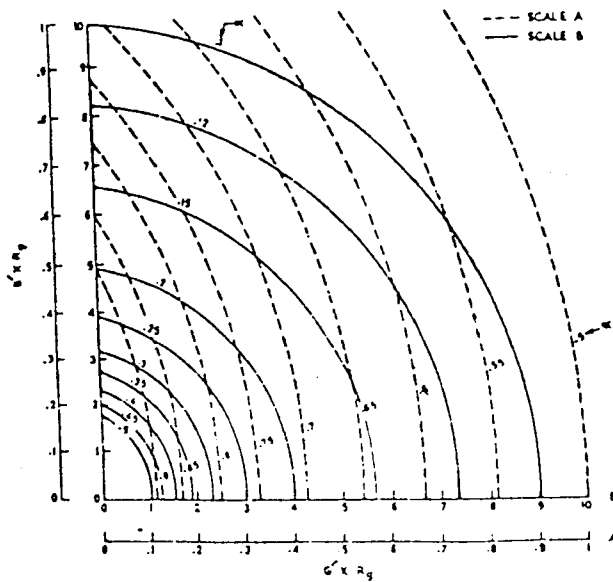
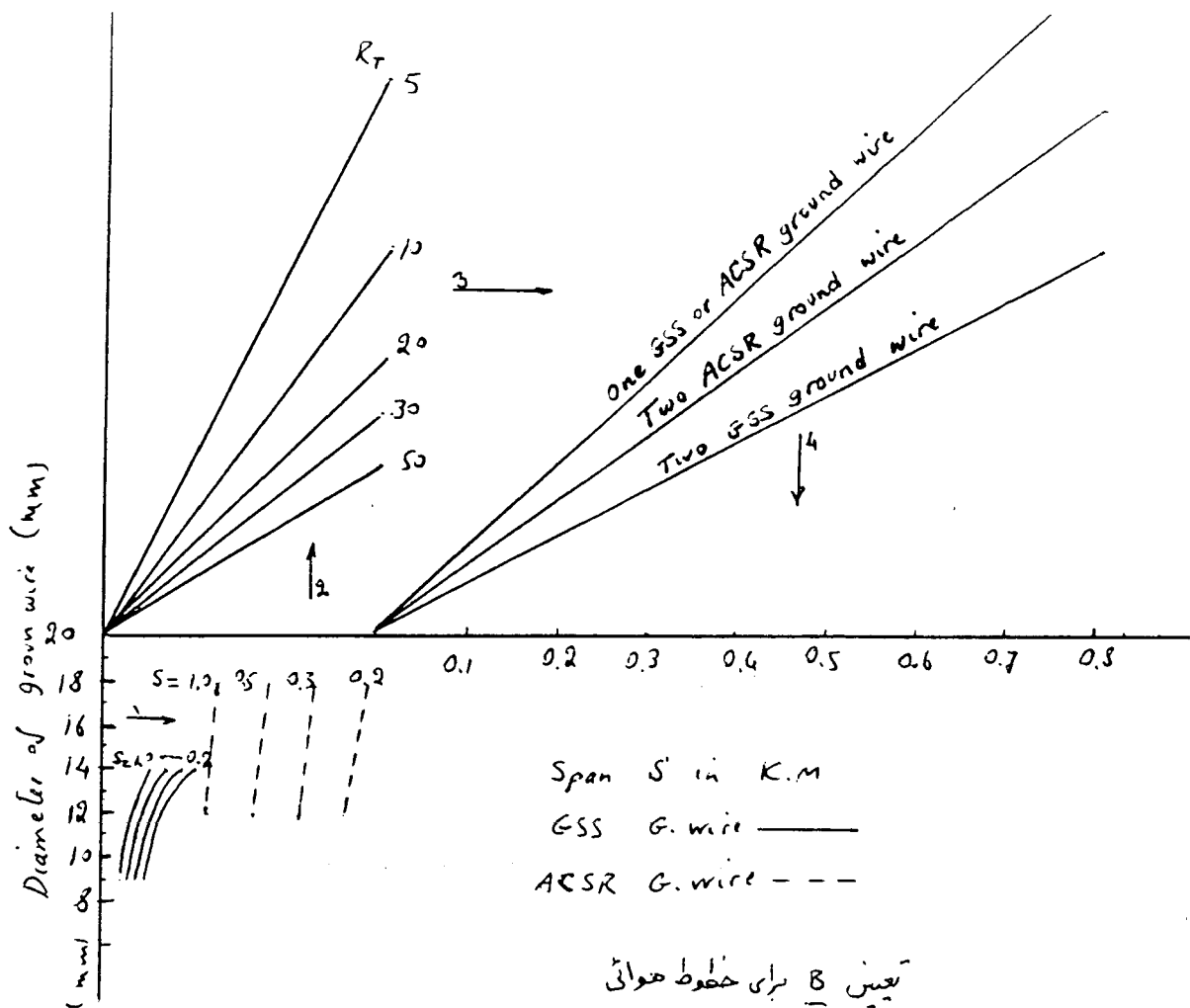
چنانچه تعداد برجها از ۲۰ متجاوز باشد می توان تعداد آنها را از لحاظ ریاضی در این مبحث بی نهایت تصور نمود. و تنها ۲۰ برج اول را مورد ارزیابی قرار داد. با استفاده از تشبیه فوق ادمیتانس هر خط برابر خواهد بود با:

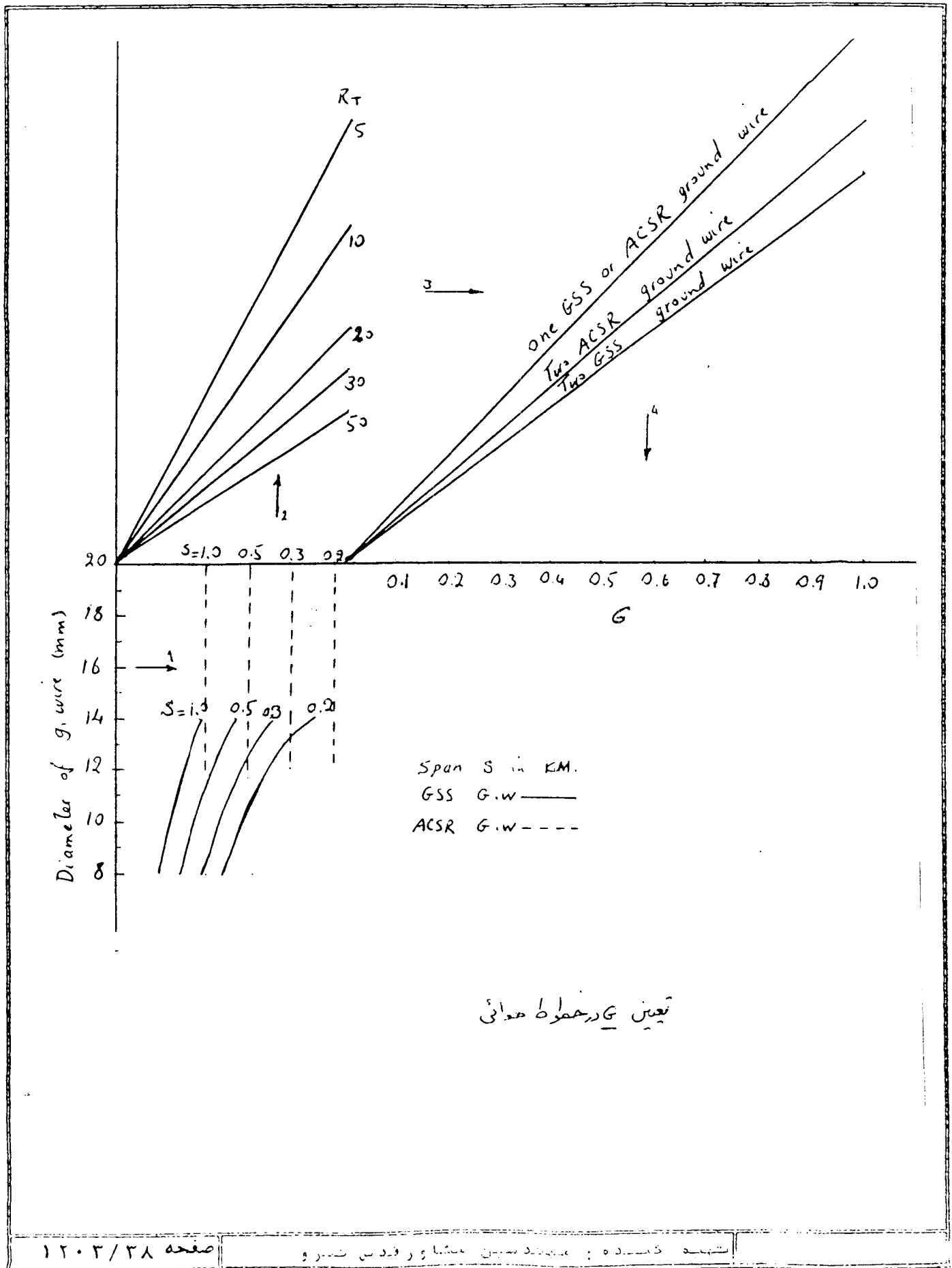
$$Y = G + jB = \frac{1}{Z_{span}/2 + \sqrt{Z_{span} * R_t}} \quad \text{رابطه (۵۳)}$$



تعداد ارجی نسیم به میله متر

تعیین m برای سیم‌کشی هوایی خطوط انتقال





تعیین G در مجموعله مدائی

که در رابطه بالا: امپدانس خودی یک اسپن سیم هوایی زمین با زمین طبیعی

$$Z_{span} \quad \text{بر حسب } \Omega/\text{Km}$$

متوسط مقاومت الکتریکی پای برجها برای ۲۰ برج اول به Ω

ادمیتانس معادل تمام خطوط متصل به پست (Y') را می‌توان با استفاده از تشبیه فوق برای هر خط و توجه به این نکته که کلیه خطوط به طور موازی هم به پست متصل شده‌اند ارزیابی کرد. Y' و R_g (مقاومت الکتریکی شبکه زمین پست) نیز موازی هم خواهند بود. شدت جریان تزریق شده به شبکه زمین از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$|IG| = |I'G| \left| \frac{1/Y'}{R_g + (1/Y')} \right| = |I'G| \cdot a \quad (۵۴) \quad \text{رابطه}$$

که رابطه فوق $|I'G|$ قدر مطلق مجموع جریانهای متصل به ایستگاه در شرایط اتصال منهای آن قسمتی که توسط القا و از طریق شیلدوایر خطوط انتقالی از محل پست دور می‌شوند خواهد بود. مقادیر مربوط به B و G و a بر حسب پارامترهای متعدد و شرایط مختلف خطوط انتقال نیرو با استفاده از کامپیوتر محاسبه شده و در منحنیهای ضمیمه این فصل جمع آوری گردیده‌اند. برای استفاده از منحنی‌های فوق بایستی با در دست داشتن قطر خارجی شیلدوایر از محور سمت چپ شروع و بطور افقی حرکت کرد تا به منحنی مربوط به اسپن سیم رسید. سپس بطور عمودی در جهت بالا حرکت می‌کنیم تا به منحنی

مربوط به مقاومت الکتریکی متوسط پای برجا R_g برسیم. سپس ازین نقطه مجدداً بسند راست حرکت می‌کنیم تا به منحنی تعداد و نوع هادی شیلدوایر برسیم. سپس بخور عمودی در جهت پایین حرکت می‌کنیم تا به نقطه مورد نظر روی محور B و یا G برسیم. با استفاده از کلیه مقادیر مربوط به B و G پای خطوط مختلف، B' و G' بدست خواهند آمد و سپس با استفاده از دیاگرامهای نمایش داده شده در اشکال این فصل به ترتیب زیر به عدد a خواهیم رسید. روی منحنی مربوطه مقادیر مربوط به $B' * R_g$ را روی محور عمودی و $G' * R_g$ را روی محور افقی با اشل A یا B متناسب با مقادیر فوق انتخاب می‌کنیم. محل تلاقی این دو محور روی دایره‌های نمایش داده شده مقدار a را بدست خواهد داد.

۶ - ۷ تاثیر لوله‌ها و یا کابل‌های مدفون در زمین

لایه محافظ کابلها و یا آرمور آنها چنانچه در جایی در فاصله نزدیک از لوله‌های فلزی مدفون در زمین قرار گرفت باشند، نظیر سیم هوائی زمین خطوط انتقال نیرو و استراکچر - ها عمل می‌کنند. در جایی ممکن است جریان اتصال زمین را تقسیم کنند و یا در جایی ممکن است باعث افزایش گرادیان پتانسیل در لایه محافظ کابلها در صورت انتقال اتصال توسط لوله‌های فلزی مدفون در زمین شوند. برای بررسی دقیقتر وضعیت فوق با توجه به شرایط مختلفی که ممکن است لوله‌ها و کابلها و یا غیره نسبت به هم داشته باشند. مطالعات و فرمولهای ارزیابی شده‌ای وجود دارند که در صورت ضرورت می‌توان به آنها مراجعه کرد.

۷ - ۷ بدترین نوع خطا و محل آن

۱ - ۷ - ۷ بدترین نوع خطا، خطائست که بیشترین مقدار جریان خطا (I_{c0}) را به شبکه زمین وارد می‌نماید. و چون این جریان با مقدار مولفه صفر جریان و ضریب توزیع جریان بستگی دارد، با وجودیکه ضریب توزیع جریان به نوع خطا بستگی ندارد. ازینرو بدترین نوع خطا را میتوان خطائی تعریف کرد که بیشترین مقدار مولفه صفر جریان را به شبکه زمین وارد می‌سازد ($3I_{0}$). در یک محل مشخص در صورت وقوع خطا، چنانچه رابطه $Z_0 Z_1 > Z_2^2$ برقرار باشد، در اینصورت خطای فاز

به زمین بدترین نوع خطا و چنانچه رابطه $Z_0 Z_1 < Z_2^2$ برقرار باشد، در اینصورت خطای فاز به فاز و به زمین بدترین نوع خطا خواهند بود.

بطور معمول چنانچه Z_1 برابر با Z_2 باشد در اینصورت روابط به ترتیب بصورت $Z_0 > Z_1$ و $Z_0 < Z_1$ خواهند بود. در مورد محل بدترین نوع خطا به این معنی که عمدتاً در چه جایی بیشترین جریان اتصال کوتاه به شبکه زمین تریق می شود باید اذعان داشت که اصولاً قانون عامی در مورد اینطور محلی وجود ندارد. در واقع بدترین محل خطا می تواند در طرف فشار قوی و یا فشار متوسط، در داخل و یا خارج پست وجود داشته باشد. در زیر بعضی از انواع بدترین نوع خطاها کلاسه و توضیح داده شده است.

در پستهای توزیع که ترانسفورماتور تنها از طرف ولتاژ پائین آن زمین شده است بدترین محل خطا برای IG می تواند در طرف ولتاژ بالای ترانسفورماتور اتفاق افتد. با اینحال چنانچه منبع جریان خطا در طرف ولتاژ بالا ضعیف باشد و یا چنانچه چند ترانسفورماتور بطور موازی کار کنند و بتوانند شدت جریان زیادی را در طرف ولتاژ پائین ایجاد نمایند، محل بدترین نوع خطا می تواند در جایی در ناحیه توزیع باشد.

برای خطاهای واقع در روی ترمینال طرف ولتاژ پایین ترانسفورماتورهائی که باین طریق زمین شده است جریان خطا داخل شبکه زمین به گردش در می آید و جریان ناشی کمی به داخل زمین تریق می کند. بنابراین تاثیر زیادی در افزایش پتانسیل شبکه زمین پست نخواهند داشت. برای خطاهای خارج از ایستگاه و روی فیدرهای توزیع که باندازه کافی از محل پست دور بوده و زمین آن در محل خطا بتواند بعنوان زمین دوردست بحساب آید، قسمت اعظم جریان بداخل منبع یعنی نوترال ترانسفورماتور و از طریق شبکه زمین پست باز خواهد گشت و لذا می تواند باعث افزایش پتانسیل شبکه زمین پست شود. در پستهای اصلی انتقال نیرو با ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه و یا اتو ترانسفورماتور، مورد فوق پیچیده تر است و بدترین محل خطا برای ایجاد جریان IG می تواند هم در طرف فشار قوی و هم در طرف فشار ضعیف تر ترانسفورماتور اتفاق بیافتد و لذا هر دو مورد بایستی کنترل و چک شود.

در حال می‌توان فرض نمود که تدبیر محل خط در داخل یست روی ترمینالهای ترانسفور ماتورها اتفاق می‌افتد. اگر تاثیر سیستم قدرت روی جریان اتصال کوتاه بیشتر باشد. در موارد فوق الذکر استثنائاتی نیز وجود دارد ولی بطور کلی باید ادعان داشت که در یک سیستم قدرت مشخص حالت‌های مختلفی برای بدترین محل خط می‌تواند وجود داشته باشد و برای هر حالت بایستی به مقدار مولفه صفر جریان توجه داشت.

۸ - ۷ محاسبه تقسیم جریان

برای تمام مدت وقوع اتصال کوتاه میتوان فرض نمود که $I_0 = I_0 = I_0$ مقدار ثابت و ازینرو شدت جریان متقارن خط بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$I_g = S_f \cdot (3I_0)$$

لذا برای تعیین I_g می‌بایستی ضریب توزیع جریان (S_f) محاسبه و ارزیابی گردد.

در محاسبه ضریب توزیع جریان می‌بایستی به تاثیر سیم هوایی زمین خطوط انتقال متصل به پست و هادی‌های نوترال و نیرو که به شبکه زمین متصل هستند توجه داشت و به تقسیم جریان خط روی سیم هوایی زمین و هادی نوترال دقت کرد. ضریب توزیع جریان به عوامل مختلفی بستگی دارد که ذیلا به چند مورد اشاره می‌شود.

۱ - محل وقوع خط که در بخش ۷ - ۷ توضیح داده شده است.

۲ - مقدار مقاومت شبکه زمین که در بخش ۶ - ۷ توضیح داده شده است.

۳ - وضعیت کابلها و لوله‌های مدفون در زمین در محدوده شبکه زمین پست که در بخش

۶ - ۷ توضیح داده شد.

۴ - وضعیت سیمهای هوایی زمین خطوط انتقال نیرو و هادیهای نوترال که مسیرهای بالقوه برگشتی جریان خط هستند و در بخش ۵ - ۷ توضیح داده شد.

برای روشن تر شدن تاثیر عوامل فوق در تقسیم جریان خط بهتر آنست که با توجه به وضعیت ایستگاه و شبکه زمین آن، مدل ریاضی برای هر کدام از عوامل با توجه به امپدا -

نسهای دیده شده از شبکه زمین ترسیم شود و به یکی از روشهای متداول در حل معادلات مربوط به قوانین کیرشهف عمل شده، نحوه تقسیم جریان روی هر یک از عوامل تعیین گردد.

ولی باید باین نکته توجه داشت که اولاً در بیشتر حالات، ترمینال خطوط انتقال نیرو

ولذا سیمهای هوایی زمین آنها و نیز هادیهای نوترال همیشه در ایستگاهها وجود دارند

و با تقریب بسیار مناسب در اکثر موارد میتوان تنها به تاثیر آنها در تقسیم

جریان خنایید متناهد و بررسی برداخت. در زیر یک سال کد در حل آن از روش "Endreny" استفاده شده است توضیح داده می شود.

مثال : در شکل بعد سه شبکه مولد نیرو کد از طریق خطوط انتقال نیرو به یک ایستگاه متصل شده اند، نشان داده شده است. شبکه‌ها و خطوط انتقالی مربوطه کاملاً یکسان و هر کدام از خطوط انتقال نیرو متشکل از صد قسمت ۰/۵ کیلومتری فرض شده اند و امپدانسهای هر قسمت از خطوط انتقال نیرو و مقاومت پای برجها و شبکه‌های مولد نیرو و شبکه پست به قرار زیر در نظر گرفته شده اند.

$$Z_{ai} = 0.1 + j 0.425 \Omega / \text{section}$$

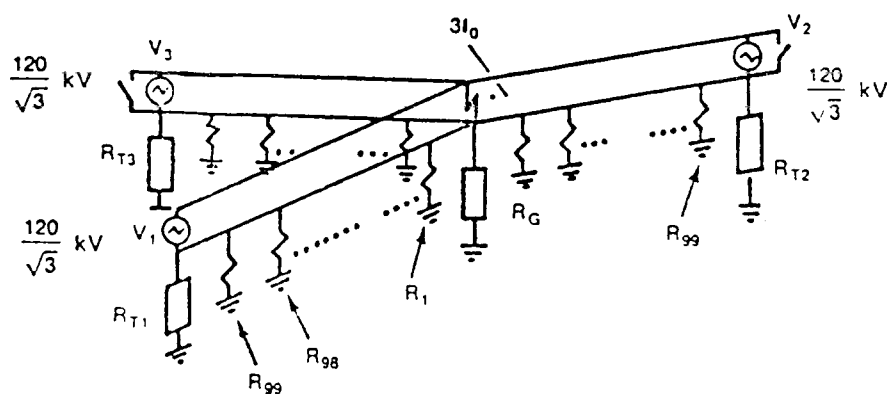
امپدانس خودی فاز مورد خط در هر قسمت

$$Z_{gi} = 3.5 + j 0.65 \Omega / \text{section}$$

امپدانس خودی سیمهای هواشی زمین و یا هادی

نوترال در هر قسمت

Example System for Computation of Current Division Factor S_f



$$Z_{mi} = 0.025 + j 0.19 \Omega / \text{section}$$

امپدانس متقابل بین یکفاز و هادی نوترال در

هر قسمت

$$R_i = 10 + j 0.0 \Omega$$

امپدانس برج شماره (i) نسبت به زمین دور دست

$$R_{T1}, R_{T2}, R_{T3} = 3.0 + j 0.0 \Omega$$

مقاومت زمین دیده شده در اثرهای هر خط

$$R_g = 2.5 + j 0.0 \Omega$$

مقاومت شبکه زمین ایستگاه نسبت به نقطه دور دست

نمنا فرض شده است یک خطای یک‌ناز بد زمین در محل پست بین هادی ناز و نوترال پست اتفاق افتاده است. با استفاده از متد "Endreny" امپدانس معادل سیمهای هوائی زمین برای هر خط انتقال نیرو که از محل خطا دیده شده باشد برابر خواهد بود با:

$$Z_{1i} = 0.5Z_{gi} + \sqrt{Z_{gi}R_i} = 0.5 * 3.56 + \sqrt{3.56 * 10} = 7.75 \Omega$$

$$Z_{1i} = 7.75 \Omega$$

و برای سیمهای هوائی زمین هر سه خط انتقال خواهیم داشت.

$$Z_{1i3} = 7.75/3 = 2.58 \Omega$$

و امپدانس معادل خطا، تقریباً برابر خواهد شد با:

$$Z_f = \frac{100}{3} (0.1 + j 0.425) + \frac{2.58 * 2.5}{2.58 + 2.5}$$

$$Z_f = 4.6 + j14.17 \Omega$$

بنابراین جریان خطا برابر خواهد شد با

$$3I_0 = \frac{12000/\sqrt{3} + j 0.0}{4.6 + j 14.17} = 4650.4 \text{ A}$$

و چون ضریب توزیع جریان S_f برابر است با:

$$S_f = \frac{2.58}{2.58 + 2.5} = 0.508$$

ازینرو جریان تزریق شده به شبکه زمین برابر خواهد بود با:

$$I_g = S_f * 3I_0 = 0.508 * 4650.4 = 2362.4 \text{ A}$$

حل مسئله فوق با روش‌های دیگر نیز جوابهایی در حدود جوابهای فوق خواهد داد.

۹ - ۷ تاثیر عدم تعادل در جریان خطا

همانطوریکه قبلاً در بخشهای ۱ - ۷ و ۲ - ۷ گفته شد، حداکثر جریان خطا I_g عبارتست از حداکثر جریان غیرمستقران متناوبی که بین شبکه زمین و زمین دوردست جریان می‌یابد. شدت جریان غیرمستقران فوق که در رابطه آن نیز بیان شد شامل مولفد متناوب و غیرمستقران I_g و نیز مولفد dc متناسب با آن می‌باشد. مولفد dc بطور اکسپونانسیل و

متناسب با ثابت زمانی آن محو می شود که به جریان dc offset معروف است. حال آنکه باید باینکه در طراحی شبکه زمین می بایستی شدت جریان غیر مستقران را منظور نمود. لذا ضریب کاهش آنرا که متناسب با شرایط شبکه می باشد (Df) بعنست وجود dc offset می توان اعمال نمود.

بطور کلی شدت جریان غیرمستقران شامل مولفه‌هایی مربوط به المانهای فوق گذرا و گذرا و حالت پایدار در قسمت متناوب آن و همچنین مولفه dc offset می باشد. مولفه های مربوط به المانهای فوق گذرا و گذرا بصورت نمایی میرا میشوند. بنابراین با تاثیر دادن تابع زمان در شدت جریان غیرمستقران می‌توانیم از رابطه زیر استفاده کنیم.

$$i_f(t) = \sqrt{2} * E [Y_{ac}(t) \cos(\omega t) + 1/Z'' e^{-t/T_a}] \quad (55) \quad \text{رابطه}$$

پارامترهای فرمول فوق بصورت زیر تعریف می شوند.

شدت جریان غیرمستقران در لحظه t ، به ثانیه بیان می شود.

ولتاژ موثر فاز به نول خط قبل از وقوع خطا

ادمیتانس معادل سیستم که با افزایش زمان از لحظه وقوع خطا کاهش می یابد
در ماشینهای الکتریکی تابع فوق بصورت زیر تعریف میشود:

$$Y_{ac}(t) = \left(\frac{1}{Z''} - \frac{1}{Z'} \right) e^{-t/T''} + \left(\frac{1}{Z'} - \frac{1}{Z} \right) e^{-t/T'} + \frac{1}{Z} \quad (56)$$

که در آن:

T'' = ثابت زمانی فوق گذرای ماشین به ثانیه

T' = ثابت زمانی گذرای ماشین به ثانیه

T_a = ثابت زمانی dc offset به ثانیه

Z'' = امپدانس فوق گذرای سیستم و ماشین در محل خطا

Z' = امپدانس گذرای ماشین و سیستم در محل خطا

Z = امپدانس ثابت سیستم و سنکرون ماشین در محل خطا

ω = فرکانس سیستم به رادیان بر ثانیه

عملاً، T'' بین ۰.۲ تا ۰.۴ ثانیه و T' بین ۰.۸ تا ۲ ثانیه قرار دارند. و T_a

بیان میگردد. با توجه اینکه خطا X/R سیستم در محل خطا ممکن است در هر لحظه ای از موج ولتاژ رخ دهد لذا برای

تعریف بدترین حالت خطا، زمانی که بیشترین مقدار مولفه dc حاصل می شود را در نظر

می‌گیرند. برای آن قسمتی از خطا که تارسیکل طول می‌کشد مولد غیر متقارن موج جریان با امپدانس فوق گذرا تعریف می‌شود و برای آن قسمتی از خطا که تقریباً بین ۶ تا ۶۰ سیکل قرار دارد مولفه موج جریان با امپدانس گذرا بیان می‌گردد. با توجه به زمان میراثی موج فوق گذرای جریان معادله (۵۵) بصورت زیر در خواهد آمد.

$$i_f(t) = \frac{\sqrt{2}}{Z''} E (\cos wt - e^{-t/T_a}) \quad \text{رابطه (۵۷)}$$

$$I_F = \sqrt{1/t_f \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad I_F = \text{شدت جریان موثر غیر متقارن در طول زمان خطا} \quad \text{رابطه (۵۸)}$$

$$I_F = I_f \sqrt{2/t_f \int_0^{t_f} [\cos wt - e^{-t/T_a}]^2 dt} \quad \text{رابطه (۵۹)}$$

حال با توجه باینکه ضریب کاهش به نسبت شدت جریان موثر غیر متقارن به شدت جریان متقارن ابتدائی در لحظه و نوع خطا ($I_F = E/Z''$) تعریف می‌شود خواهیم داشت:

$$D_f = I_F/I_g = \sqrt{1 + T_a/t_f (1 - e^{-t_f/T_a})}$$

رابطه (۶۰)

ثابت زمانی فوق گذرای سیستم به ثانیه که برابر است با $T_a = X''/wR''$

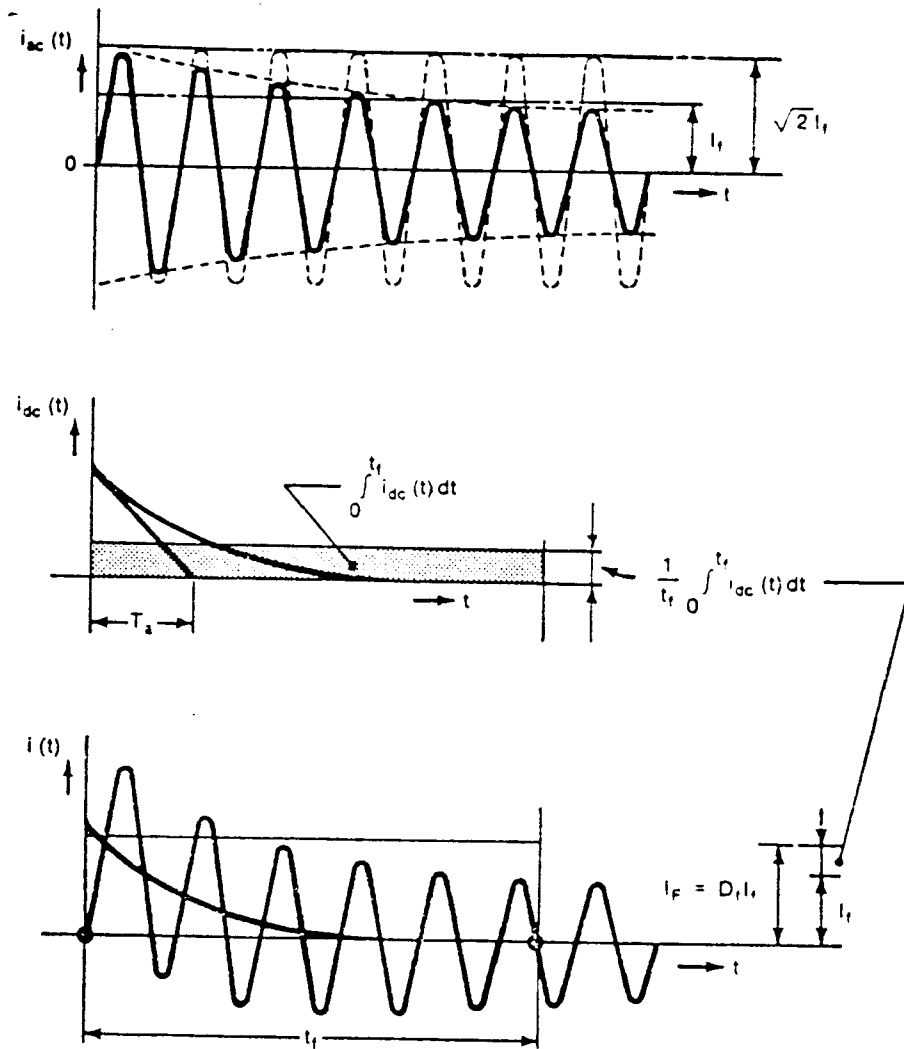
$t_f =$ زمان تداوم خطا به ثانیه

Typical Values of D_f

Fault Duration t_f (s)	Cycles(60Hz ac)	Decrement Factor D_f
0.008	1/2	1.65
0.1	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 or more	30 or more	1.0

۷-۱۰ تاثیر تغییرات احتمالی در آینده

با توجه باینکه ظرفیت اشغال ایستگاهها معمولاً در آینده افتاد می‌شود و بالطبع شدت جریان خطا (I_F) بیشتر خواهد شد لذا بسته به نوع توسعه احتمالی در



Relationship Between Actual Values of Fault Current and Values of I_F , I_f , and D_f for Fault Duration t_f

آینده ممکن است شدت جریان خطای تزریق شده به شبکه زمین (IG) کاهش و یا حتی افزایش یابد. تنها در حالتی که فقط خطوط انتقال نیروی بیشتری به ایستگاه متصل گردد. بعلاوه افزایش قدرت حمل جریان اتصال کوتاه توسط سیمهای هوایی زمین احتمالا شدت جریان خطای تزریق شده به شبکه زمین کاهش خواهد یافت. ولی به هر حال اگر حدودی برای افزایش جریان خطای زمین شده (IG) در نظر گرفته نشود شبکه در آینده مطمئن نخواهد بود و گسترش آن می تواند هزینه بیشتری را نسبت به طرح اولیه با توجه به توسعه احتمالی آینده در برداشته باشد.

بنابراین میتوان در طرح اولیه احتمال کاهش امپدانس معادل سیستم در محل ایستگاه در آینده را در نظر گرفت و یا ضریبی بعنوان ضریب افزایش شدت جریان خطا (Cp) را برای آینده پیش بینی کرد. که این ضریب با توجه به موارد فوق از یک بزرگتر خواهد بود. معمولا برای پستها ضریب توسعه 1.5 را در نظر میگیرند.

بهترین راه حل، بررسی دقیقتر وضعیت ایستگاه در آینده از لحاظ افزایش قدرت متبادل شده در ایستگاه و افزایش و یا حتی کاهش خطوط انتقال نیروی متصل به آن در آینده، میباشد.

۸- طراحی اساسی شبکه زمین

۸-۱ حدود مجاز طراحی

همانطوریکه در فصول قبل هم عنوان شد با طراحی شبکه زمین دو هدف را پیگیری می‌کنیم یکی تخلیه کامل جریان الکتریکی حاصل از اتصال کوتاه به زمین بدون ایجاد تغییر در رفتار طبیعی دستگاه‌های موجود در ایستگاه و دومی ایجاد اطمینان و ایمنی کافی برای کسانی که در محوطه ایستگاه کار می‌کنند و بنابر شرایط ناخواسته تحت تاثیر عوامل حاصل از اتصال کوتاه قرار می‌گیرند.

آنچه که منبسط توضیح داده می‌شود نحوه ایجاد ایمنی برای افراد در مقابل ولتاژهای تماس و یا گام در حدود پست برق خواهد بود.

با توجه باینکه ولتاژ شبکه E_m (Mesh Voltage) بدترین حالت ولتاژ تماس است لذا در محاسبات و بررسیها نحوه رفتار در مقابل این ولتاژ بررسی می‌شود ولتاژ گام ذاتاً از ولتاژ شبکه کمتر است ولی در صورتیکه حدود مرزهای شبکه زمین و یا دیوار ایستگاه از لایه سنگریزه مفروش نباشد می‌تواند به نوبه خود در آن حدود خطرناک باشد. در هر حال مقادیر محاسبه شده ولتاژهای گام و تماس با مقادیری که برای شرایط ایستگاه مخصوصی قابل تحمل تعریف می‌شوند بایستی مقایسه شوند و به حدود قابل قبولی محدود شوند.

برای شبکه هائی که حدوداً بطور متناسب و متساوی از خانه‌های ^{شماره‌ای} متشکل از هادیهای زمین طرح شده اند ولتاژ شبکه زمین از ناحیه مرکزی به طرف ناحیه مرزی رو به افزایش خواهد بود و میزان افزایش ولتاژ آن با ابعاد شبکه، تعداد و محل میله‌های زمین، فواصل سیمها در جهات مختلف از همدیگر، قطر هادیهای زمین و عمق دفن آنها و در نهایت پروفیل مقاومت الکتریکی خاک متناسب خواهد بود. جدول صفحه بعد سه شبکه را که برای یک محل بخصوص طراحی شده اند، با همدیگر مقایسه می‌کند در هر سه طرح تقارن شبکه و یکنواختی مقاومت الکتریکی خاک و نوع هادی یکسان فرض شده است. ولتاژ شبکه (Em) در مرکز هر کدام محاسبه شده اند. همانطوریکه از روی جدول ملاحظه می‌گردد نسبت ولتاژ گوشه شبکه از ولتاژ مرکز آن بمراتب بیشتر است و هر چه ابعاد

شیکه بزرگتر انتخاب گردد نسبت آن بزرگتر می نماید .

Typical Ratio of Corner-to-Center Mesh Voltage

Grid Number	Grid Size(Meshes.Meshes)	Em Corner/Center
1	10.10	2.71
2	20.20	5.55
3	30.30	8.85

هرچه شکل شبکه مستطان تر و یا تعداد هادیهای تشکیل دهنده شبکه بیشتر و تعداد میلدهای زمین در کناره شبکه افزایش یابد این نسبت کاهش می یابد . از روی جدول فوق این نتیجه را هم می توان گرفت که برای مطمئن تر کردن شبکه زمین پست بهتر است وضعیت ولتاژ کلند در خانه های گوشه ای شبکه ملاک عمل قرار گیرد و سعی شود از حدود قابل تحمل آن تجاوز ننماید .

۸-۲ پارامترهای مهم

پارامترهای زیر در تعیین وضعیت شبکه زمین موثر هستند .

۸-۲-۱ حداکثر شدت جریان تزریق شده به شبکه و به زمین اطراف

همانطوریکه در فصل هفتم عنوان شد برای بررسی حداکثر جریان تزریق شده به شبکه و به زمین بایستی به مقاومت کلی شبکه زمین، تقسیم جریان خطا بین شبکه و مسیرهای برگشتی جریان، ضریب کاهش شدت جریان انتقالی به زمین و وضعیت توسعه احتمالی ایستگاه در آینده توجه کرد .

۸-۲-۲ زمان وجود اتصال کوتاه و دوام برقگرفتگی

زمان وجود اتصال کوتاه و دوام برقگرفتگی معمولاً یکسان فرض میشوند . برای ایستگاههای انتقال نیرو بایستی این زمان کمتر و برای ایستگاههای توزیع و یاصنعتی بیشتر در نظر گرفته شود و سعی شود که زمان وجود اتصال کوتاه از زمان دوام برقگرفتگی و قابل تحمل انسان کمتر باشد .

۸-۳-۳ مقاومت الکتریکی خاک

اندازه مقاومت شبکه زمین ایستگاه و کرادیان ولتاژها در داخل ایستگاه مستقیماً به اندازه مقاومت الکتریکی خاک ایستگاه بستگی دارد و لذا بهتر است با روشهای مناسب مقاومت خاک دقیقتر و مطمئن تر اندازه گیری شود. ولی از آنجا که در کلیه فرمولهای ارائه شده در مورد شبکه زمین تنها مقاومت الکتریکی خاک همگون مورد استفاده قرار میگیرد و فرمولی که مبین تغییرات مقاومت الکتریکی خاک باشد ارائه نشده لذا در صورتیکه تغییرات عمده ای در میزان مقاومت خاک در سطح پست مشاهده نشود (مثلاً تفاوت کمتر از ۳۰٪)، بهتر است مقدار متوسط مقادیر اندازه گیری را، در محاسبات ملاک عمل قرار داده شود. معمولاً تغییرات زیادی بغیر از موارد استثنائی در سطح پستها بچشم نمی خورد. و الا بایستی با روشهای اصلاحی تاثیرات منفی آنرا خنثی کرد. چنانچه خاک سطح ایستگاه شامل دو لایه با مقاومتهای متفاوت باشد در اینصورت، پارامتر K که در ۲-۶ ضریب انعکاس نامیده شد، در روابط فوق تاثیر داده شود.

۸-۳-۴ مقاومت لایه مفروش سطح ایستگاه (ρ_s)

مقاومت ۸-۳-۴

همانطوریکه قبلاً نیز گفته شد، چنانچه سطح ایستگاه از سنگریزه با مقاومتی در حدود ۵۰۰۰ - ۱۰۰۰ اهم متر مفروش گردد. جریان عبور یافته از بدن انسان به نسبت قابل توجهی محدود خواهد بود و ایمنی شبکه زمین ایستگاه بیشتر خواهد شد.

۸-۳-۵ شکل هندسی شبکه

بطور کلی محدودیتهایی که در طرح شکل هندسی شبکه وجود دارد، صرفاً مسائل اقتصادی و یا در بعضی موارد محدودیتهای اجرایی است. بعنوان مثال عملاً بسیار مشکل خواهد بود که یک صفه بزرگ مسی در سطح ایستگاه بکار گرفته شود. و مثلاً وجود ترنجهای کابل در داخل سطح ایستگاه وضعیت هندسی کابلهای تشکیل دهنده خانههای شبکه را ممکن است تا چند متر تغییر دهد. خانههای شبکه می توانند ابعادی در حدود ۳ تا ۱۵ متر و عمق دهن هادیها در حدود ۰/۵ تا ۱/۵ متر باشند. هادیهای شبکه می توانند با اندازه - ای در حدود ۷۰ تا ۲۴۰ متر مربع باشند. طبیعی است که اندازه هادی بکار رفته در شبکه تاثیر چندانی روی کنترل کرادیان ولتاژها نخواهد داشت.

مهمترین مسئله‌ای که در شکل هندسی شبکه مطرح میشود مساحت کل تحت پوشش شبکه است که در تعیین مقاومت الکتریکی کل شبکه

تاثیر بسزائی دارد. هرچه شبکه وسیعتر باشد. مقاومت کل شبکه نسبت به زمین دور دست کاهش بیشتری می‌یابد و لذا ولتاژ شبکه نسبت به زمین دور دست (GPR) کمتر خواهد شد.

۳ - ۸ پارامترهای مورد لزوم طرح شبکه

در جدول زیر بطور خلاصه کلید پارامترهایی که در طراحی شبکه زمین بکار گرفته میشود عنوان شده است.

نام پارامتر	توضیح
$3I_0$	شدت جریان اتصال کوتاه متعارف داخل ایستگاه به آمپر
I_G	حداکثر شدت جریان مستقل شده به شبکه زمین و از آنجا به محیط اطراف (شامل مولفه dc) به آمپر
\int	مقاومت الکتریکی خاک به اهم متر
\int_s	مقاومت الکتریکی سطح مفروش ایستگاه به اهم متر
h_s	ضخامت سطح مفروش ایستگاه به متر
C_p	ضریب توسعه پست برای آینده
C_s	ضریب کاهش مقاومت سطح مفروش ایستگاه
t_c	زمان تداوم خطا برای تخمین اندازه هادی زمین به ثانیه
t_f	زمان تداوم خطا برای تعیین ضریب کاهش در مولفه dc به ثانیه
t_s	زمان تداوم خطا در برقرارتگی برای تعیین جریان مجاز عبوری از بدن به ثانیه
h	عمق دهن هادیهای زمین به متر
d	قطر هادی زمین به متر

A	کل سطح مورد پوشش شبکه زمین به متر مربع
D	فاصله فیزیکی بین هادیهای موازی به متر
D _f	ضریب کاهش برای تعیین I _g
N	تعداد هادیهای موازی هم در یک جهت
K _m	ضریب اصلاح فاصله برای تعیین ولتاژ خانه (مدل ساده)
K _s	ضریب اصلاح فاصله برای تعیین ولتاژ گام (مدل ساده)
K _i	ضریب اصلاح هندسه شبکه (مدل ساده)
K _{ii}	ضریب اصلاح وزنی تعدیل تاثیر هادیهای وسط شبکه روی گوشه های شبکه (مدل ساده)
K _h	ضریب اصلاح تاثیر عمق دفن هادی (مدل ساده)
L	طول کل هادیها بکار رفته در شبکه و شامل کلید میله های زمین به متر
R _g	مقاومت کل شبکه زمین به اهم
E _m	ولتاژ خانه در وسط خانه های کناری شبکه (در مدل ساده)
	ولتاژ گام بین نقطه بالای هادی کناری شبکه و یک متر دورتر از شبکه (در مدل ساده)
E _s	به متر
E _{touch 50}	ولتاژ قابل تحمل تماس برای یک فرد ۵۰ کیلوگرم به ولت
E _{touch 70}	ولتاژ قابل تحمل تماس برای یک فرد ۷۰ کیلوگرم به ولت
E _{step 50}	ولتاژ قابل تحمل گام برای یک فرد ۵۰ کیلوگرم به ولت
E _{step 70}	ولتاژ قابل تحمل گام برای یک فرد ۷۰ کیلوگرم به ولت

۴-۸ روش طراحی شبکه زمین

بلوک دیاگرام صفحه ضمیمه نحوه و ترتیب طرح شبکه را بصورت الگوریتم و بشرح زیر بیان مینماید. پارامترهای عنوان شده در الگوریتم فوق در جدول قبل معرفی شده اند.

۱- نقشه کلی نمایش صفحه شبکه زمین با توجه به ارزیابی های لازم و ملاحظات مورد لزوم برای زمین کردن ترسیم گردد. و مقاومت الکتریکی خاک و بیا در صورت لزوم پروفیل تغییرات آن تهیه شده و نوع همگون و یا دو لایه ای آن مشخص گردد.

۲- سطح مقطع سیم بکاررسته برای شبکه زمین بر اساس معادلات مربوطه محاسبه و تعیین گردد و از شدت جریان خطا ($3I_0$) می بایستی حداکثر مقدار قابل تزریق جریان به شبکه با توجه به توسعه های احتمالی آینده و نیز حداکثر زمان تا اتمام جریان اتصال کوتاه (tf) که شامل حفاظت پشتیبان نیز بوده باشد مشخص شود.

۳- حدود قابل تحمل ولتاژهای گام و تماس بر اساس معادلات فصل ۴ تعیین شوند. انتخاب زمان دوره اتصال کوتاه بعهده مهندس طراح و با توجه به ارزیابیهای لازم او خواهد بود.

۴- طرح مقدماتی شامل یکرشته هادی پیرامونی شبکه و به تعداد لازم از هادیهای مستطاع برای تشکیل خانه های شبکه خواهد بود به نحوی که اتصالات کلیه دستگاهها در آن مشخص شده باشند.

فواصل و طول هادی بکاررفته و میله های زمین مورد لزوم طرح می بایستی بر اساس ارزیابی شدت جریان تزریق شده به شبکه و به زمین اطراف باشد.

۵- مقاومت کل شبکه زمین مورد طرح بر اساس ارمولهای ارائه شده در فصل ۶ محاسبه و ارزیابی شود. برای طرح نهائی می بایستی اثر میله های زمین که تا عمق زیاد در خاک ایستگاه پیش میروند نیز در نظر گرفته شود، اصلاح مقاومت شبکه بازای میله های زمین بر اساس روابط عنوان شده در فصول مربوطه مشخص گردد. با استفاده از کامپیوتر می توان مقاومت کل شبکه و پارامترهای آنرا دقیقتر محاسبه و ارزیابی کرد.

۶- شدت جریان تزریق شده به شبکه و از آنجا به زمینهای اطراف بر اساس معادلات عنوان شده در فصل قبل ارزیابی شود. برای جلوگیری از طرح بیش از حد مورد نیاز شبکه تنها آن قسمتی از جریان اتصال کوتاه ($3I_0$) که به شبکه زمین تزریق می‌گردد و باعث ولتاژهای گام و تماس و ولتاژ نسبت به نقطه در دسترس (GPR) پست می‌شود مسلاک عمل قرار گیرد.

۷- چنانچه ولتاژ افزایش یافته پست (GPR) در طرح مقدماتی از حدود ولتاژ قابل تحمل تماس کمتر باشد احتیاج به تجدید نظر در طرح نیست. و تنها اتصالات زمین اضافی برای پوشاندن کلیه اتصالات زمین دستگاهها ممکن است مورد نیاز باشد.

۸- محاسبه و ارزیابی ولتاژهای شبکه و گام در طرح ارائه شده و بر اساس روابط عنوان شده در بخش ۵-۸ بطور ساده تر و در بخش ۹-۸ بطور دقیقتر انجام گیرد و با توصیه های گفته شده در این بخش ها تطبیق داده شود.

۹- چنانچه ولتاژ شبکه از حد قابل تحمل ولتاژ تماس کمتر باشد می‌توان طرح را خاتمه یافته تصور کرد. در غیر اینصورت بایستی طرح مورد تجدید نظر قرار گیرد.

۱۰- چنانچه ولتاژهای محاسبه شده گام و تماس از حدود قابل تحمل آنها کمتر باشد طرح تنها به اصلاحات جزئی نظیر تکمیل و وصل کلیه اتصالات لازم به شبکه خواهد بود. در غیر اینصورت بایستی طرح مورد تجدید نظر قرار گیرد. باینصورت که فواصل هادیها نسبت به هم کمتر شوند یا تعداد بیشتری میله زمین تعبیه شود و غیره که در بخش ۷-۸ به آنها اشاره خواهد شد.

۱۱- پس از تعیین حدود مورد نیاز ولتاژهای گام و تماس اصلاحات تکمیلی در طرح نظیر وصل برقگیرها، نوترال ترانسها و بعضی ادوات دیگر به میله های زمین و به شبکه می‌توانند مفید باشد.

۵-۸ نحوه محاسبه حداکثر ولتاژهای گام و شبکه

نحوه محاسبه حداکثر ولتاژهای گام و شبکه که در این فصل عنوان می‌شود به نحوی

است کد یا تقریب مناسبی نیاز چندانی به کامپیوتر وجود نداشته باشد و همینطور جداولی نیز تهیه شده کد برای ارزیابی سریع پارامترهای شبکه می‌توان از آنها استفاده نمود. بطور کلی ولتاژ شبکه (Em) و ولتاژ کام (Es) از روابط زیر تعریف می‌شود.

$$E_m = \int \rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot IG/L \quad \text{رابطه (۶۱)}$$

$$E_s = \int \rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot IG/L \quad \text{رابطه (۶۲)}$$

در فرمول‌های فوق ρ مقاومت الکتریکی خاک طبیعی پست و K_m و K_s ضریب اصلاح فاصله برای تعیین ولتاژهای شبکه و قدم، K_i ضریب اصلاح هندسه شبکه و مقدار متوسط شدت جریان عبوری از شبکه (Em) بازاء هر متر طول هادیهای شبکه (IG/L) می‌باشند.

۸-۵-۱ ولتاژ شبکه E_m

همانطوریکه قبلاً نیز توضیح داده شد چنانچه از میله‌های زمین استفاده نشود، دانسیته عبور جریان از هادیهای محیطی شبکه نسبت به جریان عبوری از هادیهای داخلی شبکه متفاوت می‌باشد. ازینرو جهت تعدیل در محاسبه مقدار متناسب ولتاژ شبکه ضریب K_m بصورت زیر تعریف شده است.

$$K_m = 1/2\pi \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad \text{رابطه (۶۳)}$$

این ضریب برای شبکه‌هایی که در محیط و یا گوشه‌ها و یا نسبتاً زیادی در داخل آنها از میله‌های زمین استفاده شده باشد برابر یک است.

برای شبکه‌هایی که میله‌های زمین به تعداد کمی در داخل آنها و نه در گوشه‌ها و یا هادیهای اطراف آن بکار رفته باشد.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad \text{رابطه (۶۴-۱)} \quad n = \sqrt{n_1 \cdot n_2} \quad \text{رابطه (۶۴-۲)}$$

n_1 و n_2 تعداد هادیهای بکاررفته در طول زمین شبکه. h عمق دفن هادی به متر و h_0 مبنای عمق دفن هادی که یک متر فرض شده است.

$$K_h = \sqrt{1 + h/h_0} \quad \text{رابطه (۶۵)}$$

ضریب K_i در روابط بالا برای ایجاد تعدیل در هندسه شبکه تعریف شده است، چون هادیها تماماً موازی هم نیستند و در موارد متعددی بطور مستطاع نسبت بهم قرار

دارند. (ضریب فوق یک را بحد تجزیه است که توسط "KOCH" بیان گردیده و بصورت $K_i = 0.656 + 0.172 n$ تعریف شده است)

در شبکه هائی که در آنها به تعداد قابل توجهی از میله های زمین استفاده شده باشد طول کلی هادیهای شبکه مدفون در زمین بصورت زیر اصلاح میشود.

$$L = L_c + 1.15L_r \quad \text{رابطه (۶۶)}$$

که در آن L_c طول کل هادیهای سیمی و L_r طول کل میله های زمین مدفون در شبکه زمین است.

با توجه باینکه دانسیته عبور جریان از میله های زمین واقع در محیط شبکه از هادیهای شبکه بیشتر است، ضریب 1.15 در رابطه فوق بکار گرفته شده است. ضریب فوق نیز تجزیه است.

در صورتیکه در شبکه ای از میله های زمین استفاده نشده باشد و یا به تعداد کمی از آنها بکار گرفته شده باشد رابطه بالا بصورت زیر تعریف شده است.

$$L = L_c + L_r \quad \text{رابطه (۶۷)}$$

۸-۵-۲ ولتاژ گام (E_s)

همانطوریکه قبلا نیز عنوان شد ولتاژ گام بصورت رابطه :

$$E_s = \int \frac{K_i \cdot K_s \cdot I_G}{L} \quad \text{رابطه (۶۸)}$$

در شبکه ای بدون تعداد قابل توجهی از میله های زمین تعریف شده است. در رابطه بالا نیز $L = L_c + L_r$ است. در صورتیکه در شبکه مخصوصا در اتصال به هادیهای محیطی شبکه از میله های زمین استفاده شده باشد، طول کلی هادیهای بکار رفته بصورت زیر تعریف میگردد.

$$L = L_c + 1.15L_r$$

برای تعیین مقدار ولتاژ گام در فاصله h متری از کناره شبکه و بطرف خارج آن

که $0.25 < h < 2.5$ متر است، از ضریب K_s سطح رابطه زیر استفاده میشود.

$$K_s = 1/\pi [1/2h + 1/(D+h) + 1/D * (1-0.5)^{n-2}] \quad \text{رابطه (۶۹)}$$

و چنانچه عمق دفن هادیها از ۲۵٪ متر کمتر باشد خواهیم داشت.

$$K_s = 1/\pi [1/2h + 1/(D+h) + W/D] \quad \text{رابطه (۷۰)}$$

اگر n از ۶ کمتر باشد خواهیم داشت : $n < 6$

$$w = 1/2 + 1/3 + \dots + 1/(n-1)$$

$$w = 1/2(n-1) + \ln(n-1) - 0.423 \quad ; \quad n \geq 6$$

و چنانچه n بیشتر یا مساوی ۶ باشد خواهیم داشت :

در روابط بالا مشاهده می‌گردد که K_s به عمق دفن شبکه بستگی دارد و در واقع نیز با افزایش عمق دفن شبکه ولتاژ گام نیز کمتر می‌گردد.

۸-۶ تخمین حداقل طول لازم هادی در تشکیل شبکه

برای بدست آوردن حداکثر ولتاژ تماسی کمتر از میزان قابل تحمل آن در هر شبکه رابطه ساده ای بصورت زیر عنوان می‌گردد.

$$\frac{K_m * K_i * \rho * I_G}{L} < (1000 + 1.5 C_s (h_s, k) * \rho_s) * 0.116 / \sqrt{ts}$$

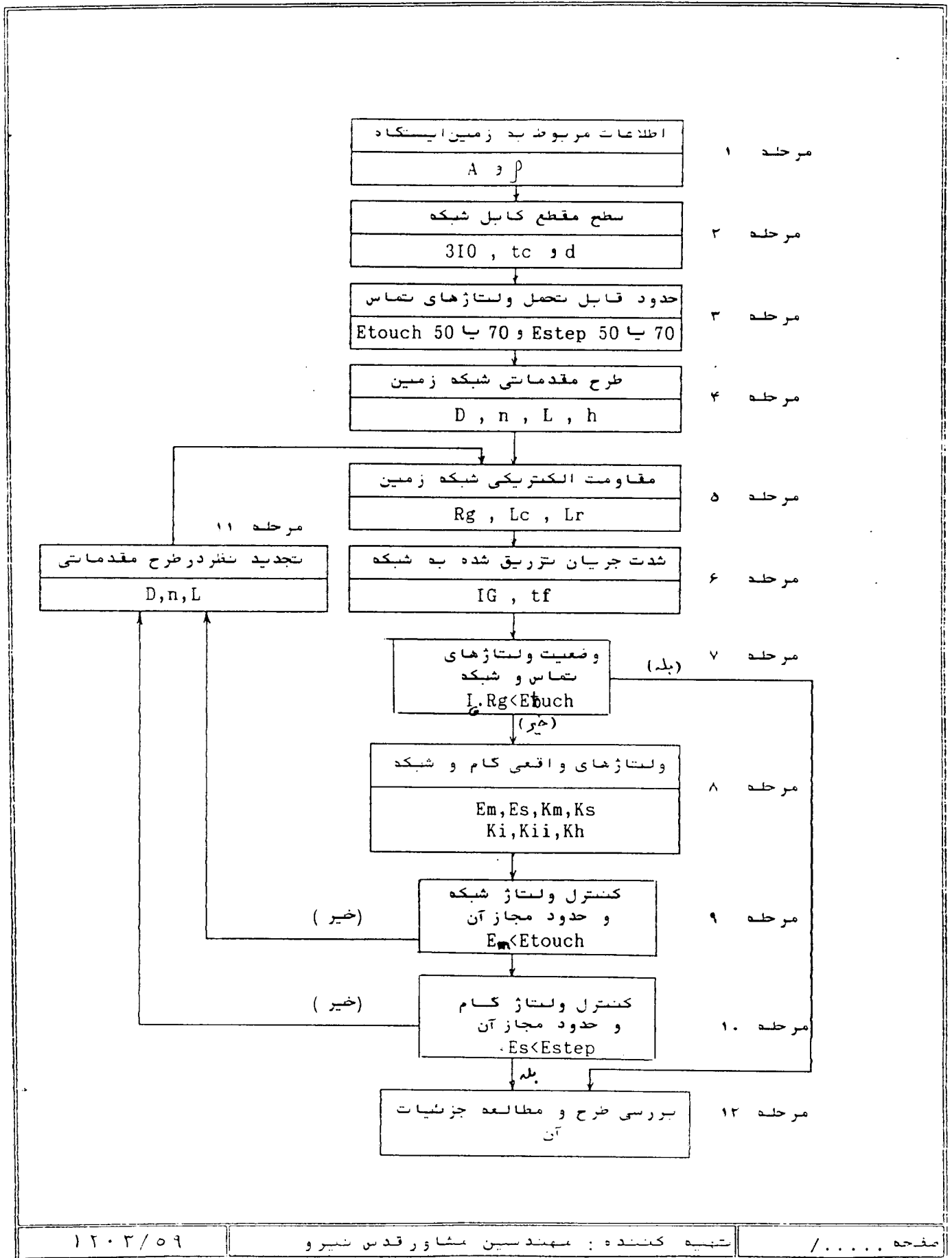
رابطه سمت راست در فصل { بعنوان ولتاژ تماس قابل تحمل برای یک فرد ۵۰ کیلوگرمی تعریف شد.

از رابطه بالا رابطه زیر نیز بدست می‌آید :

$$L > \frac{K_m * K_i * \rho * I_G * \sqrt{ts}}{(116 + 0.174 C_s (h_s, k) * \rho_s)} \quad \text{رابطه (۷۱)} \quad E_m < E_{touch} 50$$

$$L > \frac{K_m * K_i * \rho * I_G * \sqrt{ts}}{(157 + 0.235 C_s (h_s, k) * \rho_s)} \quad \text{رابطه (۷۲)} \quad E_m < E_{touch} 70$$

در مورد دو رابطه فوق نکاتی در فصل بعد عنوان خواهد شد. ولی ذکر این نکته نیز ضروریست که در شبکه هائی که مقاومت طبیعی خاک بسیار کم بوده یا اصولاً مقدار کمی جریان وارد آن میشود، روابط بالا طول کمی را بدست خواهند داد معذالک بعلمت رعایت مسائل ایمنی که پای هر وسیله فلزی می‌بایستی به شبکه زمین بطور محکم و اصولی متصل گردد صرفنظر از طول بدست آمده از رابطه فوق، هر چه شبکه در این جهت نیاز داشته باشد بایستی هادی زمین مصرف گردد.



۸-۷ اصلاح سگد مقدساتی زمین

در صورتیکه بعد از طرح مقدماتی شبکه معلوم گردد که ولتاژهای خطرناکی در ناحیه شبکه زمین وجود خواهند داشت، رعایت نکات زیر توصیه می گردد.

۱- با کاهش مقاومت کلی شبکه زمین، ولتاژهای شبکه حتی حداکثر ولتاژ قابل انتقال از نقاط دوردست به شبکه متناسباً کاهش خواهند یافت، مثلاً با افزایش سطح مورد پوشش شبکه مقاومت آن به نحو چشمگیری کاهش می یابد. در صورتیکه سطح ایستگاه محدود باشد، می توان از میله های زمین طویل و یا چاه پتانسیل استفاده کرد. و بنا به نحوه کاربرد آن ممکن است، مقاومت کل شبکه کاهش یابد و یا حتی بدون تغییر بماند. بررسی دقیق نکته آخر در مورد هر شبکه ای ضروری است.

۲- در صورتیکه از هادیهای نزدیکتر بهم استفاده شود شرط حصول یک دیسک فلزی بیشتر بر آورده می شود. بنابراین کنترل ولتاژهای خطرناک پست صرفاً بررسی مسائل اقتصادی را در پی خواهد داشت. ولی در مورد شبکه هائی که سطح آنها محدود و یا مقاومت طبیعی خاک آنها بسیار زیاد است مسئله حادتر خواهد بود. در اینصورت می توان با افزایش سطح شبکه تا آنجائیکه ممکن است در خارج از محدوده ایستگاه ولتاژهای خطرناک را کنترل نمود. و یا تعداد میله های زمین را در محیط خارجی شبکه تا حد امکان افزایش داد. راه دیگری که میتواند به حل این مسئله کمک کند استفاده از دو و یا چند هادی موازی در عمقهای مختلف در محیط خارجی شبکه خواهد بود.

۳- راه دیگر استفاده از مسیرهای برگشتی جریان اتصال کوتاه مثلاً از طریق سیم هوایی زمین خطوط انتقال نیرو و یا افزایش شبکه زمین برجهای مجاور ایستگاه خواهد بود. در اینصورت گرادیانهای پتانسیل نزدیک پایه برجها بایستی کنترل و مراقبت شود.

۴- در صورتیکه امکان آن وجود داشته باشد بایستی شدت جریان اتصال کوتاه و جریان تزریق شده به شبکه را کاهش داد.

۵- حتی الامکان از دسترسی و استفاده از نواحی که مشکلات خاصی از نظر تهیه شبکه زمین مناسب دارند جلوگیری کرد.

باتوجه به نکات فوق الذکر در کاهش مقاومت شبکه زمین ایستگاه، ذکر این نکته ضروریست که در طرح اولیه می بایستی کلیه نکات مهم در این مورد و نیز وضعیت

توسعه‌های احتمالی آینده در ایستگاه بدقت مورد توجه قرار گیرد تا از دردهای
بعدی جلوگیری بعمل آید.

