

مشخصات فنی عمومی و اجرایی
پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال
سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه در
پست های فشار قوی
نشریه شماره ۴۸۵

وزارت نیرو - شرکت توانیر
طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت برق
www.tavanir.ir

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور
معاونت نظارت راهبردی
دفتر نظام فنی اجرایی
<http://tec.mporg.ir>

جمهوری اسلامی ایران

مشخصات فنی عمومی و اجرایی
پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال
سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه
در پست های فشار قوی
نشریه شماره ۴۸۵

وزارت نیرو - شرکت توانیر
طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت برق
www.tavanir.ir

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور
معاونت نظارت راهبردی
دفتر نظام فنی اجرایی
<http://tec.mporg.ir>



بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

شماره:	۱۰۰/۲۲۴۹۲
تاریخ:	۱۳۸۸/۳/۱۰

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران

موضوع:

مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه در پست‌های فشار قوی

به استناد آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی، موضوع ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۴۸۵ دفتر نظام فنی اجرایی، با عنوان « مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه در پست‌های فشار قوی » از نوع گروه دوم ابلاغ می‌شود.

شایسته است دستگاه‌های اجرایی و مهندسان مشاور مفاد نشریه یاد شده، ضوابط و معیارهای مندرج در آن را ضمن تطبیق با شرایط کاری خود - در طرح‌های عمرانی مورد استفاده قرار دهند.

امیرمنصور برقی

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور با استفاده از نظر کارشناسان برجسته، مبادرت به تهیه این دستورالعمل نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این رو، **از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی،**

مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

- ۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
 - ۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
 - ۳- در صورت امکان، متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
 - ۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.
- کارشناسان این دفتر نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی شاه
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، دفتر نظام فنی اجرایی

سازمان مرکزی - تهران ۱۱۴۹۹۴۳۱۴۱ - خیابان صفی علی شاه

<http://tec.mporg.ir>

بسمه تعالی

پیشگفتار

در اجرای ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور و به منظور تعمیم استانداردهای صنعت برق و ایجاد هماهنگی و یکنواختی در طراحی و اجرای پروژه‌های مربوط به تولید، انتقال و توزیع نیروی برق، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (معاونت نظارت راهبردی - دفتر نظام فنی اجرایی) با همکاری وزارت نیرو - شرکت توانیر در قالب طرح «ضوابط و معیارهای فنی صنعت برق» اقدام به تهیه مجموعه کاملی از استانداردهای مورد لزوم نموده است.

نشریه حاضر با عنوان «مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها ، خطوط فوق توزیع و انتقال - سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه در پست های فشار قوی» در دو بخش تهیه و تدوین شده است. بخش اول در بر گیرنده حداقل نیازهای کلی مربوط به طراحی، ساخت، بازرسی، آزمونهای کارخانه ای، برچسب گذاری، بسته بندی، حمل و نصب سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه در پست های فشار قوی در رده ولتاژی ۶۳ تا ۴۰۰ کیلو ولت می باشد که به دو زبان فارسی و انگلیسی ارائه شده است. بخش دوم مشتمل بر مباحث مربوط به سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه شامل اهداف، تعاریف و کلیات، معرفی و شناخت سیستم، و معیارهای طراحی و مهندسی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه می باشد.

معاونت نظارت راهبردی به این وسیله از کوشش‌های دست‌اندرکاران به ثمر رسیدن این نشریه و همچنین سازمان‌ها و شرکت‌های مهندسی مشاور که با اظهارنظرهای سازنده خود این معاونت را در جهت غنا بخشیدن به آن یاری نموده‌اند سپاسگزاری و قدردانی نموده و توفیق روزافزون آنان را از درگاه ایزد یکتا آرزومند است.

معاون نظارت راهبردی

۱۳۸۸

مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه در پست های فشار قوی - نشریه شماره ۴۸۵

تهیه کننده

این مجموعه به وسیله شرکت مهندسين مشاور نیرو با همکاری آقایان مهندسين پوريا اعرابی، شهرام معقولى و آقای دکتر عارف درودی تهیه و تدوین شده است و توسط آقای اسماعیل زارعی مورد ویراستاری قرار گرفته است.

کمیته فنی

این نشریه همچنین در کمیته فنی طرح با مشارکت مجری و مشاور طرح و نمایندگان شرکت های مهندسی مشاور تحت پوشش وزارت نیرو به شرح زیر بررسی، اصلاح و تصویب شده است.

آقای مهندس جمال بیاتی وزارت نیرو - سازمان توانیر - مجری طرح

آقای مهندس بهمن الله مرادی سازمان توسعه برق ایران

آقای مهندس مرتضی یعقوبی شریف شرکت مشانیر

آقای دکتر عارف درودی مهندسين مشاور نیرو

آقای مهندس حامد نفیسی مهندسين مشاور نیرو

آقای مهندس بهروز قهرمانی سازمان توسعه برق ایران

آقای مهندس سید جمال الدین واسعی پژوهشگاه نیرو

آقای مهندس هادی قیاسی معاصر مهندسين مشاور قدس نیرو

آقای مهندس احسان الله زمانی وزارت نیرو - سازمان توانیر - دبیر کمیته فنی طرح

مسئولیت کنترل و بررسی نشریه در راستای اهداف دفترنظام فنی اجرائی به عهده آقایان مهندسين پرویز سیداحمدی و محمدرضا طلاکوب بوده است.

بخش اول

۴	۱- نیازهای عمومی
۴	۲- سیم‌های گارد.....
۴	۳- میله‌های حفاظتی
۴	۴- هادیهای اتصال به شبکه زمین
۴	۵- اتصالات
۴	۶- پلاک مشخصات.....
۴	۶-۱- سیم گارد.....
۴	۶-۲- میله حفاظتی.....
۴	۷- آزمونها.....
۵	۷-۱- آزمونهای هادیهای حفاظتی
۵	۷-۱-۱- آزمونهای نوعی
۵	۷-۱-۲- آزمونهای نمونه‌ای.....
۵	۷-۲- آزمونهای هادیهای اتصال به شبکه زمین.....
۶	۸- لوازم یدکی و وسایل مخصوص
۶	۹- نقشه‌ها و مدارک.....
۶	۹-۱- مدارکی که باید پیشنهاددهندگان ارائه نمایند.....
۶	۹-۲- مدارکی که باید پیمانکار یا سازنده ارائه نماید.....

بخش دوم

فصل اول- اهداف، تعاریف و کلیات

۱۹	۱-۱- کلیات
۲۰	۲-۱- تعاریف.....
۲۰	۱-۲-۱- ولتاژ جرقه بحرانی(CFO).....
۲۱	۲-۲-۱- دامنه جریان ضربه بحرانی
۲۱	۳-۲-۱- شاخه پیشرو صاعقه.....
۲۱	۴-۲-۱- حفاظت مؤثر.....
۲۱	۵-۲-۱- مدل الکتروهندسی(EGM)
۲۱	۶-۲-۱- تئوری مدل الکتروهندسی.....

۲۱	۷-۲-۱- چگالی صاعقه‌های زمین (GFD).....
۲۱	۸-۲-۱- سطح کروونیک.....
۲۲	۹-۲-۱- خطوط ایزوکروونیک.....
۲۲	۱۰-۲-۱- میله حفاظت از صاعقه.....
۲۲	۱۱-۲-۱- سیم گارد.....
۲۲	۱۲-۲-۱- زاویه حفاظتی سیم‌های گارد نسبت به هادی‌های فاز.....
۲۲	۱۳-۲-۱- زاویه حفاظتی منفی.....
۲۳	۱۴-۲-۱- زاویه حفاظتی مثبت.....
۲۴	۱۵-۲-۱- زاویه حفاظتی میله‌های حفاظ.....
۲۴	۱۶-۲-۱- روش گوی غلطان.....
۲۵	۱۷-۲-۱- شاخه پله‌دار.....
۲۵	۱۸-۲-۱- فاصله برخورد.....
۲۵	۱۹-۲-۱- امپدانس موجی.....
۲۵	۲۰-۲-۱- رعد.....
۲۵	۲۱-۲-۱- روز رعد و برقی.....
۲۵	۲۲-۲-۱- ساعت رعد و برقی.....
۲۵	۲۳-۲-۱- نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFR).....
۲۶	۲۴-۲-۱- نرخ وقوع قوس الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR).....
۲۶	۲۵-۲-۱- قوس برگشتی.....

فصل دوم- معرفی و شناخت سیستم حفاظت از صاعقه در پست های فشارقوی

۲۹	۱-۲- پدیده برخورد صاعقه.....
۲۹	۱-۱-۲- صاعقه و نحوه شکل‌گیری آن.....
۳۱	۲-۱-۲- مشخصات صاعقه.....
۳۲	۳-۱-۲- فاصله برخورد.....
۳۳	۴-۱-۲- دامنه جریان برخورد.....
۳۴	۵-۱-۲- سطح کروونیک.....
۳۵	۶-۱-۲- چگالی صاعقه‌های برخوردی به زمین.....
۳۵	۲-۲- روشهای مرسوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه.....
۳۶	۱-۲-۲- روش زوایای ثابت.....
۳۸	۲-۲-۲- روش منحنی‌های تجربی.....
۳۹	۳-۲-۲- روش مدل الکتروهندسی.....
۴۳	۳-۲- یراق آلات سیستم حفاظت از صاعقه.....

فصل سوم- معیارهای طراحی و مهندسی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه

- ۱-۳- کلیات ۴۹
- ۱-۱-۳- انتخاب آرایش بهتر ۵۱
- ۲-۳- روش منحنی‌های تجربی ۵۱
- ۱-۲-۳- طراحی سیستم حفاظت از صاعقه با استفاده از منحنی‌های تجربی ۵۱
- ۲-۲-۳- سطوح حفاظتی فراهم شده توسط میله‌های حفاظ در روش منحنی‌های تجربی ۵۳
- ۳-۲-۳- اثر شیب‌دار بودن زمین ۵۵
- ۳-۳- روش مدل الکتروهندسی ۵۶
- ۱-۳-۳- اصول طراحی سیستم حفاظت از صاعقه با استفاده از روش مدل الکتروهندسی ۵۶
- ۲-۳-۳- معادلات فواصل برخورد ۵۷
- ۳-۳-۳- شیوه استفاده از فواصل برخورد جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست ۵۹
- ۱-۳-۳-۳- حفاظت با استفاده از سیم‌های گارد ۵۹
- ۲-۳-۳-۳- حفاظت با استفاده از میله‌های حفاظ ۶۲
- ۴-۳-۳- خلاصه نحوه استفاده از معادلات فواصل برخورد جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست ۷۴
- ۵-۳-۳- حفاظت در مقابل جریانهای متفاوت از جریان طراحی IS [Id]: ۷۷
- ۱-۵-۳-۳- حفاظت در مقابل جریانهای صاعقه‌ای بزرگتر از IS ۷۷
- ۲-۵-۳-۳- حفاظت در مقابل جریانهای صاعقه‌ای کوچکتر از IS ۷۷
- ۶-۳-۳- تغییرات در سطوح ولتاژ ۸۱
- ۷-۳-۳- حداقل جریان برخورد ۸۱
- ۸-۳-۳- محاسبه نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده ۸۱
- ۱-۸-۳-۳- سیم‌های گارد ۸۱
- ۲-۸-۳-۳- میله‌های حفاظتی ۸۲
- ۴-۳- استقامت مکانیکی و حرارتی سیم‌های گارد و میله‌های حفاظ ۸۴
- ۵-۳- مثال‌هایی از طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه ۸۵
- ۱-۵-۳- مثال اول ۸۵
- ۱-۱-۵-۳- حفاظت تجهیز با استفاده از یک سیم گارد ۸۵
- ۲-۱-۵-۳- حفاظت تجهیز با استفاده از دو میله حفاظ ۸۶
- ۲-۵-۳- مثال دوم ۸۷
- ۱-۲-۵-۳- بررسی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات بی‌های ۲۳۰ کیلوولت ۸۸
- ۲-۲-۵-۳- بررسی سیستم حفاظت از صاعقه تجهیزات بی‌های ۶۳ کیلوولت ۹۰
- ۳-۵-۵-۳- بررسی سیستم حفاظت از صاعقه برای تجهیزاتی که در حد فاصل بین بی‌های ۲۳۰ کیلوولت و ۶۳ کیلوولت قرار می‌گیرند ۹۲
- ۴-۵-۵-۳- محاسبه نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده ۹۳
- منابع و مراجع ۱۱۵

فصل ۱

بخش دوم

اهداف، تعاریف و کلیات

مقدمه

در این فصل، اهداف، تعاریف و کلیاتی از سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات مستقر در پست‌های فشارقوی ارائه می‌شود.

۱-۱- کلیات

پست‌های فشارقوی به جهت وجود استراکچرهای فلزی و سطوح ولتاژی بالا، در شرایط نامناسب جوی، نسبت به سایر تأسیسات غیرالکتریکی مشابه میزان صاعقه بیشتری را به سوی خود جذب می‌نمایند.

برخورد صاعقه به تجهیزات پست می‌تواند آثار مخربی به همراه داشته باشد. این مسئله از آنجا ناشی می‌شود که برخورد صاعقه به تجهیزات داخل پست موجب ایجاد جریانهای صاعقه‌ای با دامنه و شیب‌های بسیار تندی می‌گردد. این امواج به نوبه خود قادر به ایجاد امواج سیار ولتاژی هستند که دامنه آنها ممکن است به مراتب بزرگتر از سطح عایقی تجهیزات داخل پست باشد و این امر می‌تواند باعث صدمه دیدن تجهیزاتی که در مسیر این اضافه ولتاژها قرار دارند، گردد. صدمه دیدن تجهیزات نیز به نوبه خود منجر به قطع فیدها و قطع سرویس‌دهی به مشترکین می‌گردد. بروز این گونه حوادث خصوصاً در پستهای کلیدی می‌تواند بسیار نگران‌کننده باشد، لذا ضروری است که جهت حفاظت تجهیزات پست در مقابل صاعقه اقدامات زیر صورت گیرد:

- از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات پست جلوگیری به عمل آید. این مسئله را می‌توان با استفاده از یک سیستم مناسب حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه^۱ به طور مؤثری فراهم نمود.
 - امواج سیار داخل شده به پست، از طریق خطوط انتقال محدود گردند. این مسئله را می‌توان با استفاده از برقگیرها به طور مؤثری کنترل کرد. همچنین با رعایت فواصل مجاز می‌توان نتایج حاصل از ورود این امواج سیار را محدود نمود.
- تجهیزات فشار قوی بسته به ولتاژ نامی و سطح عایقی آنها در اثر ولتاژهای نسبتاً بالایی آسیب می‌بینند، در حالیکه تجهیزات فشار ضعیف پست شامل رله‌ها، کامپیوترها و تجهیزات الکترونیکی و مخابراتی با ولتاژ نسبتاً کم (در حد چند صد ولت) ممکن است دچار صدمه شوند.

در محل برخورد به دلیل بالا بودن جریان صاعقه ولتاژ بسیار بالایی می‌تواند به وجود آید. این ولتاژ به صورت موج سیار در طول شینه‌ها و فیدها حرکت می‌کند و چنانچه این ولتاژ از سطح عایقی تجهیزات بزرگتر باشد، می‌تواند موجب بروز قوس الکتریکی^۲ گردد. همچنین علاوه بر اثر مستقیم (هدایت بوسیله هادیها)، اثر القایی نیز بر روی تجهیزات دورتر از محل برخورد خواهد داشت. ولتاژ القاء شده بر روی تجهیزات فشار قوی پستهایی که ولتاژ نامی آنها بالا است، خطر چندانی به دنبال نخواهد داشت. اما القاء این ولتاژ (مغناطیسی و یا خازنی) بر روی دستگاههایی که ولتاژ نامی آنها پایین است (و در صورتی که دستگاهها از حفاظت مناسب برخوردار نباشند)، می‌تواند موجب صدمه دیدگی آنها گردد.

1 . Direct lightning stroke protection

2 . Flashover

بنابراین حفاظت این دستگاهها علاوه بر حفاظت از برخورد مستقیم، نیازمند حفاظتهای دیگری است تا بتواند اثر القاء را کاهش دهد. این موارد عبارتند از:

- هم پتانسیل نمودن هادیهای که وارد دستگاهها می‌شوند.
 - استفاده از ترانسفورماتور ایزوله برای تغذیه دستگاهها.
 - هادیهای که وظیفه تخلیه موج صاعقه به زمین را دارا می‌باشند، از سایر تجهیزات دور نمود.
- حفاظت تجهیزات پست در مقابل برخورد مستقیم صاعقه با استفاده از سیم‌های گارد و میله‌های حفاظتی صورت می‌گیرد. سیم‌های گارد و میله‌های حفاظتی در مجاورت تجهیزات و شینه‌های پست در ارتفاعی بالاتر از ارتفاع سایر تجهیزات داخل پست، نصب می‌گردند. ارتفاع بلند این سیم‌ها و میله‌ها موجب می‌گردد که در هنگام فرود آمدن ضربات صاعقه به محل پست، مانع برخورد این ضربات به تجهیزات پست و بروز عیب در آنها شده و به این سیم‌ها و میله‌های حفاظتی برخورد نماید.
- هر آرایش از سیم‌ها و میله‌های حفاظتی دارای نواحی حفاظتی مختص به خود می‌باشد. نواحی حفاظتی دارای این ویژگی هستند که در صورت قرار گرفتن تجهیزات در داخل این نواحی، در مقابل برخورد صاعقه حفاظت شده و هر تجهیزیتی که بیرون از این نواحی قرار گرفته باشد، در معرض برخورد صاعقه قرار خواهد داشت. جهت رسم این نواحی حفاظتی از ایده فواصل برخورد که وابسته به دامنه جریان صاعقه هستند، استفاده می‌گردد.
- تئوری حاکم و ویژگی‌های نواحی حفاظتی فراهم شده بوسیله سیم‌ها و میله‌های حفاظتی، باعث بوجود آمدن روش‌های مختلفی جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه گردیده است. روش‌های طراحی که امروزه جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست مورد استفاده قرار می‌گیرند، در ادامه ارائه خواهند شد.
- سیستم حفاظت از صاعقه قادر است از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات پست به ازای جریان‌های صاعقه بالاتر از حد مشخصی به داخل ناحیه حفاظت شده ممانعت به عمل آورد. برخورد صاعقه‌های با دامنه‌های پایین‌تر از محدوده عملکرد سیستم حفاظت از صاعقه، با انتخاب مناسب سایر تجهیزات حفاظت‌کننده در مقابل امواج سیار گذرا (مانند برقگیرها) تحت کنترل خواهند بود. حفاظت از صاعقه ساختمان‌های پست مانند حفاظت از صاعقه ساختمان‌های صنعتی محسوب می‌شود و استاندارد ساختمان‌های صنعتی برای این ساختمان‌ها در نظر گرفته می‌شود.

۱-۲- تعاریف

در خصوص مبحث حفاظت از صاعقه پستهای فشار قوی، حداقل تعاریف شامل موارد زیر می‌گردند:

۱-۲-۱- ولتاژ جرقه بحرانی (CFO)^۱

میزان اضافه ولتاژ گذرای است که چنانچه به ترمینال‌های تجهیز برسد، احتمال اینکه عایق تجهیز این اضافه ولتاژ را تحمل کند، ۵۰ درصد است.

1 . Critical flashover voltage

۱-۲-۲- دامنه جریان ضربه بحرانی^۱

دامنه جریان موج ضربه صاعقه‌ای است که چنانچه بر روی یک هادی جاری شود، می‌تواند موجب ایجاد ولتاژی برابر با سطح ولتاژ جرعه بحرانی (CFO) عایق آن هادی گردد.

۱-۲-۳- شاخه پیشرو صاعقه^۲

شاخه‌ای پایین رونده به سمت زمین، در صاعقه‌هایی که از چندین شاخه تشکیل شده‌اند.

۱-۲-۴- حفاظت مؤثر^۳

حفاظتی که مانع برخورد صاعقه‌هایی با دامنه بزرگتر از دامنه جریان ضربه بحرانی به تجهیزات پست می‌گردد (البته ممکن است به دلیل حواشی ایمنی، اندازه جریان ضربه بحرانی کوچکتر از مقدار واقعی در نظر گرفته شود، که در این حالت حفاظت مؤثر براساس این جریان جدید تعریف می‌گردد).

۱-۲-۵- مدل الکتروهندسی (EGM)^۴

یک نمایش هندسی از تجهیز و سیستم حفاظت آن می‌باشد که در آن روابط ریاضی مورد استفاده برای نمایش ابعاد هندسی به جریان صاعقه برخوردکننده به سیستم حفاظت از صاعقه، زمین و یا سایر تجهیزات وابسته می‌باشد.

۱-۲-۶- تئوری مدل الکتروهندسی^۵

تئوری توصیف‌کننده مدل الکتروهندسی همراه با تحلیل کمی مربوطه که شامل ارتباط میان فواصل برخورد با المانهای مختلف مدل و اندازه اولین ضربه بازگشتی می‌باشد، تئوری مدل الکتروهندسی را تشکیل می‌دهد.

۱-۲-۷- چگالی صاعقه‌های زمین (GFD)^۶

تعداد متوسط برخورد صاعقه بر واحد سطح، در واحد زمان، در یک مکان مشخص را چگالی صاعقه‌های زمین در آن مکان می‌نامند.

۱-۲-۸- سطح کرونیک^۷

تعداد متوسط روزها یا ساعاتی از سال که رعد و برق در یک مکان مشخص به وقوع می‌پیوندد. سطح کرونیک به دو گونه زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

1. Critical stroke amplitude
2. Dart leader
3. Effective shielding
4. Electrogeometric model
5. Electrogeometric model theory
6. Ground flash density
7. Keraunic level

- سطح کروونیک روزانه: تعداد متوسط روزهایی از سال که رعد و برق در یک دوره ۲۴ ساعته مشاهده می‌گردد.
- سطح کروونیک ساعتی: تعداد متوسط ساعتهایی از سال، که رعد و برق در یک دوره ۶۰ دقیقه مشاهده می‌گردد.

۱-۲-۹- خطوط ایزوکروونیک^۱

چنانچه نقاط روی یک نقشه جغرافیایی را که دارای سطح کروونیک یکسانی هستند به هم متصل کنیم، از اتصال این نقاط، خطوطی حاصل می‌شود که آنها را خطوط ایزوکروونیک می‌نامند.

۱-۲-۱۰- میله حفاظت از صاعقه^۲

میله‌ها، ستونها و استراکچرهای فلزی که جهت حفاظت تجهیزات در مقابل برخورد مستقیم صاعقه به کار می‌روند.

۱-۲-۱۱- سیم گارد^۳

سیم یا سیم‌هایی که در بالای هادی‌های فاز و تجهیزات پست قرار می‌گیرند تا از برخورد ضربات صاعقه به آنها جلوگیری به عمل آورند. این سیم‌ها گاهی اوقات سیم زمین شده هوایی یا سیم محافظ نیز نامیده می‌شوند.

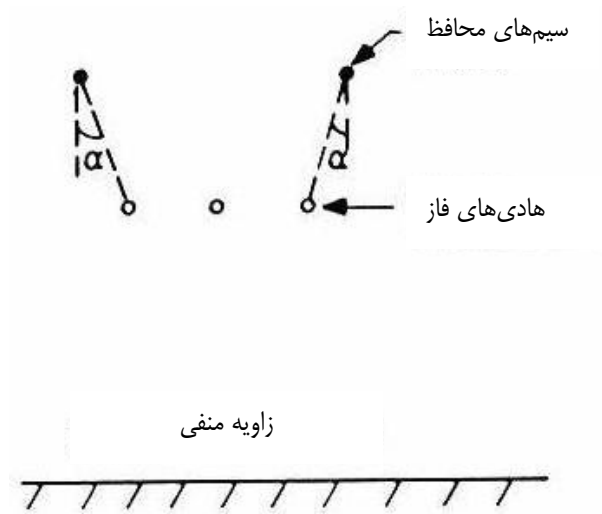
۱-۲-۱۲- زاویه حفاظتی سیم‌های گارد نسبت به هادی‌های فاز

زاویه بدست‌آمده از تقاطع خط عمودی رسم شده از طریق سیم گارد به زمین با خط دیگری که از سیم گارد به هادی حفاظت‌شده کشیده شده است. این زاویه به منظور فراهم نمودن ناحیه حفاظتی برای هادی به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که ضربات صاعقه به جای برخورد به تجهیزات، به سیم گارد برخورد نمایند.

۱-۲-۱۳- زاویه حفاظتی منفی^۴

چنانچه سیم گارد در بالا و بیرون سطح اشغال شده توسط هادی‌های فاز قرار گیرد، زاویه تشکیل‌شده از طریق این سیم و هادی فاز کناری، زاویه حفاظتی منفی نامیده می‌شود. این زاویه در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

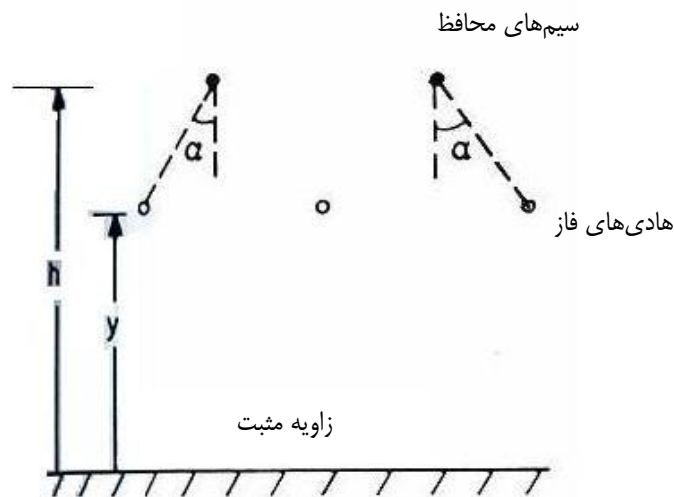
1 . Isokeraunic lines
 2 . Lightning mast
 3 . Shield wire
 4 . Negative shielding angle



شکل ۱-۱: زاویه حفاظتی منفی

۱-۲-۱- زاویه حفاظتی مثبت^۱

چنانچه سیم گارد در بالا و داخل سطح اشغال شده توسط هادی‌های فاز قرار گیرد، زاویه تشکیل شده از طریق این سیم و هادی فاز کناری، زاویه حفاظتی مثبت نامیده می‌شود. این زاویه در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



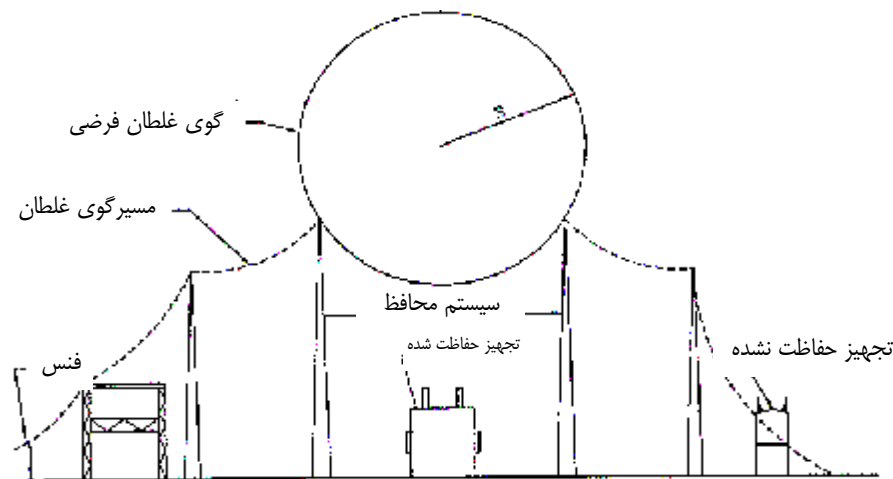
شکل ۲-۱: زاویه حفاظتی مثبت

۱-۲-۱- زاویه حفاظتی میله‌های حفاظ

زاویه بدست آمده از تقاطع خط عمود رسم شده به زمین از سر میله صاعقه با خط دیگری که به صورت زاویه‌دار با خط عمود از سر میله صاعقه تا زمین رسم شده است، زاویه حفاظتی میله حفاظ نامیده می‌شود. چرخش این زاویه اطراف میله یک ناحیه حفاظتی مخروطی شکل را برای تجهیز قرار گرفته در داخل این ناحیه فراهم می‌نماید. زاویه حفاظتی میله حفاظ به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که ضربات صاعقه به جای اینکه به تجهیزات برخورد کنند به میله حفاظت از صاعقه برخورد نمایند.

۱-۲-۱- روش گوی غلطان^۱

یکی از روشهای طراحی سیستم حفاظت از صاعقه، که مبتنی بر مدل الکتروهندسی است، روش گوی غلطان است. این تکنیک شامل غلطاندن یک گوی فرضی با شعاع مشخص در بالای سطح پست می‌باشد. این گوی بر روی میله‌های حفاظتی، سیم‌های گارد، فنسها و سایر تجهیزات فلزی زمین شده برای حفاظت در مقابل صاعقه غلطانده می‌شود. چنانچه تمام سطح تجهیزات در زیر منحنی سطح گوی قرار گیرد، آن تجهیزات در مقابل برخورد مستقیم صاعقه محافظت شده است، اما در صورتی که برخی تجهیزات با سطح گوی تماس پیدا کند یا به داخل سطح نفوذ کند دیگر در مقابل برخورد مستقیم صاعقه محافظت شده نخواهد بود. اصول این روش در شکل (۱-۳) نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: اصول روش گوی غلطان

۱-۲-۱۷ - شاخه پله‌دار^۱

تخلیه استاتیکی که از طریق ابر به هوا به وقوع می‌پیوندد، شاخه پله‌دار نامیده می‌شود. دامنه جریان مربوط به این شاخه‌های پله‌دار در مقایسه با جریان ضربه نهایی کوچک است (نوعاً از مرتبه ۱۰۰ آمپر هستند). شاخه‌های پله‌دار در جهات تصادفی، در پله‌های منفصلی به طول ۱۰ تا ۸۰ متر منتشر می‌گردند. در اغلب موارد سرعت انتشار آنها در حدود ۰/۰۵ درصد سرعت نور می‌باشد.

۱-۲-۱۸ - فاصله برخورد^۲

طولی از فاصله هوایی که پتانسیل لازم برای شکست عایقی آن کمتر از پتانسیل آخرین جهش شاخه پله‌دار صاعقه می‌باشد، فاصله برخورد نامیده می‌شود. طول این فاصله هوایی به اندازه جریان صاعقه بستگی دارد.

۱-۲-۱۹ - امپدانس موجی^۳

نسبت ولتاژ به جریان موج سیاری که بر روی هادی حرکت می‌کند، امپدانس موجی نامیده می‌شود.

۱-۲-۲۰ - رعد^۴

صدایی که به همراه برق صاعقه به گوش می‌رسد، رعد نامیده می‌شود. این صدا به علت انبساط ناگهانی هوا در مسیر تخلیه الکتریکی به وجود می‌آید.

۱-۲-۲۱ - روز رعد و برقی^۵

روزی که در آن رعد و برق قابل مشاهده است، روز رعد و برقی نامیده می‌شود.

۱-۲-۲۲ - ساعت رعد و برقی^۶

ساعتی که در حین آن رعد و برق قابل مشاهده است، ساعت رعد و برقی نامیده می‌شود.

۱-۲-۲۳ - نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFR)^۷

تعداد سالیانه ضربات صاعقه‌ای که از سیستم حفاظت از صاعقه عبور کرده و به تجهیزات پست برخورد نماید، نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFR) نامیده می‌شود. این حادثه ممکن است منجر به بروز قوس گردد و یا ممکن است منجر به بروز قوس نگردد.

1 . Stepped leader
 2 . Striking distance
 3 . Surge impedance
 4 . Thunder
 5 . Thunderstrom day
 6 . Thunderstrom hour
 7 . Shielding failure rate

۱-۲-۲۴- نرخ وقوع قوس الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR)^۱

تعداد سالیانه ضربات صاعقه‌ای که از سیستم حفاظت از صاعقه عبور کرده و به تجهیزات و هادیهای پست برخورد نموده و موجب بروز قوس الکتریکی در پست می‌گردند، نرخ وقوع قوس الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR) نامیده می‌شود.

۱-۲-۲۵- قوس برگشتی^۲

قوس الکتریکی که در ایزولاسیون خط و در نتیجه برخورد صاعقه به بخش‌هایی از شبکه یا تجهیزات الکتریکی که عموماً دارای پتانسیلی برابر با زمین هستند (مانند سیم محافظ یا دکل) به وجود می‌آید.

1 . Shielding failure flashover rate
2 . Back flashover

فصل ۲

معرفی و شناخت سیستم حفاظت از صاعقه در

پست‌های فشارقوی

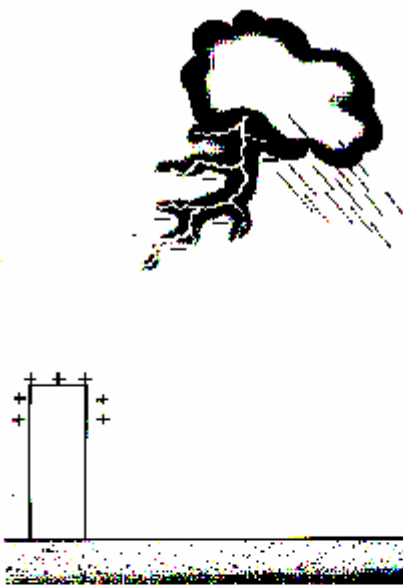
مقدمه

هدف از این فصل معرفی و شناخت سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات مستقر در پست‌های قوی می‌باشد. مشخصات صاعقه، فواصل برخورد و معرفی روش‌های طراحی سیستم حفاظت از صاعقه از دیگر مباحث مطرح شده در این فصل می‌باشد.

۲-۱- پدیده برخورد صاعقه

۲-۱-۱- صاعقه و نحوه شکل‌گیری آن

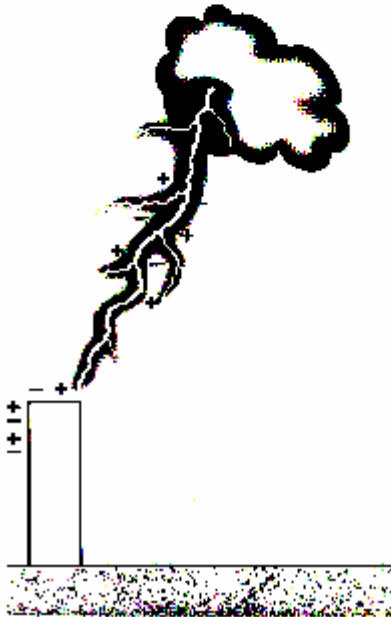
با باردار شدن ابر و با توجه به بار ابر و ظرفیت بین ابر و زمین، ولتاژی فشار قوی بین ابر و زمین بوجود می‌آید که ممکن است به چندین میلیون ولت برسد. ظرفیت خازنی بین ابر و زمین در حد میکروفاراد و شدت میدان الکتریکی بین ابر باردار و زمین به چندین هزار ولت بر متر می‌رسد. چنانچه شدت میدان الکتریکی بین زمین و ابر به قدر کافی بزرگ باشد، هوا در یک نقطه از سطح ابر شروع به یونیزاسیون نموده و در اثر یونیزاسیون، هوا به صورت یک گاز هادی در می‌آید و الکترونیله‌ای را تشکیل می‌دهد. مسیر یونیزه شدن هوا را کانال هادی می‌گویند. رشد این کانال با مدت زمانی در حدود $0/2$ میکروثانیه و با توقف‌های کوتاهی در حدود ۱۵ تا ۱۰۰ میکروثانیه انجام می‌شود. کانال هادی پس از هر توقف، مسیر خود را بسته به شرایط موجود، تعیین می‌کند و لذا مسیر کانال هادی شاخه به شاخه می‌شود. نزدیک‌ترین شاخه به الکترودهای تیز و بلند مانند درختان، ساختمانها، خطوط و پستهای انتقال برق موجب می‌شود شدت میدان بزرگی در حد یونیزاسیون هوا در نوک آنها ایجاد شود و در نتیجه یک کانال هادی نیز از این نقاط به طرف کانال هادی پایین آمده، صعود می‌کند. در لحظه‌ای که این دو کانال به یکدیگر می‌رسند، یک مسیر هادی بین ابر و زمین به وجود می‌آید که از این مسیر جریان الکتریکی شدیدی در حدود ۲ تا ۳۰۰ کیلوآمپر عبور می‌کند. شکل (۲-۱) نحوه شکل‌گیری صاعقه را نشان می‌دهد. زمان مربوط به پیشانی موج جریان ناشی از صاعقه در مقایسه با کل زمان برقراری آن خیلی کوچک است. این زمان در بسیاری از موارد کمتر از ۱۰ میکروثانیه می‌باشد. در شکل (۲-۲) یک موج جریان صاعقه نوعی رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدت زمان رسیدن دامنه موج جریان صاعقه به مقدار حداکثر آن بسیار کوتاه می‌باشد.



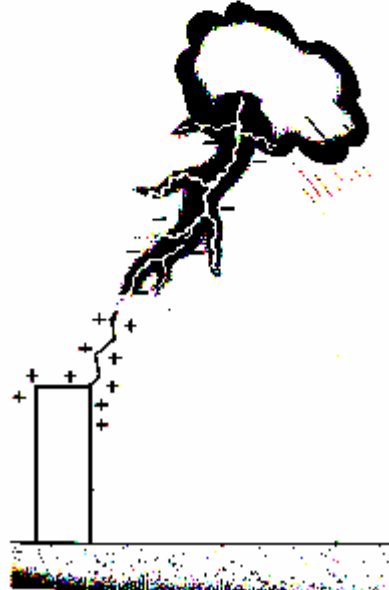
ب- پیشرفت کانال هادی به طرف شیء



الف- تجمع بارهای الکتریکی در ابر

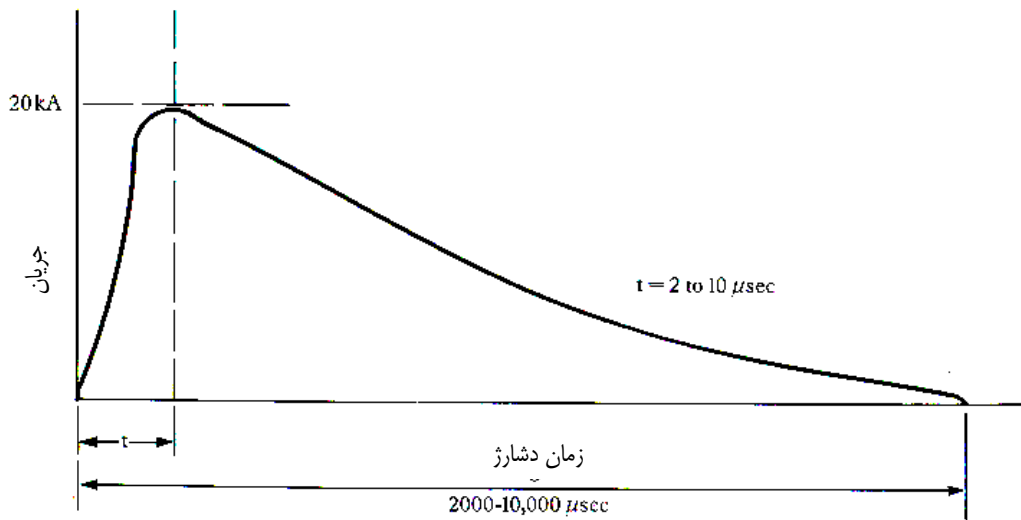


د- رسیدن دو کانال هادی به همدیگر و ایجاد مسیرهای جهت تخلیه بار ابر به شیء



ج- پیشرفت کانال هادی از طرف شیء به سوی ابر

شکل ۲-۱: مراحل مختلف شکل گیری صاعقه



شکل ۲-۲: نمونه یک موج جریان صاعقه

۲-۱-۲- مشخصات صاعقه

از مشخصات صاعقه می‌توان انرژی، حداکثر جریان، $\int i^2 dt$ ، di/dt و بار آن ($\int i dt$) را نام برد. صاعقه دارای انرژی چندان زیادی نیست، زیرا اگر بار ابر را ۲۰ آمپر ثانیه و اختلاف ولتاژ بین ابر و زمین ۱۰ میلیون ولت در نظر گرفته شود، انرژی ابر به ۱۰۰ مگاژول می‌رسد، که برابر انرژی تولیدی یک نیروگاه ۱۰۰ مگاواتی در یک ثانیه است. قسمتی از این انرژی صرف ایجاد نور و صدا و گرم کردن هوا در مسیر کانال هادی و حرکت می‌گردد. در صورتی که مقاومت زمین را ۵ اهم در نظر بگیریم انرژی صاعقه در محل برخورد آن به زمین با توجه به اینکه مقدار $\int i^2 dt$ برای صاعقه فوق حدود ۱۰ هزار $A^2 \cdot sec$ است، برابر خواهد بود با:

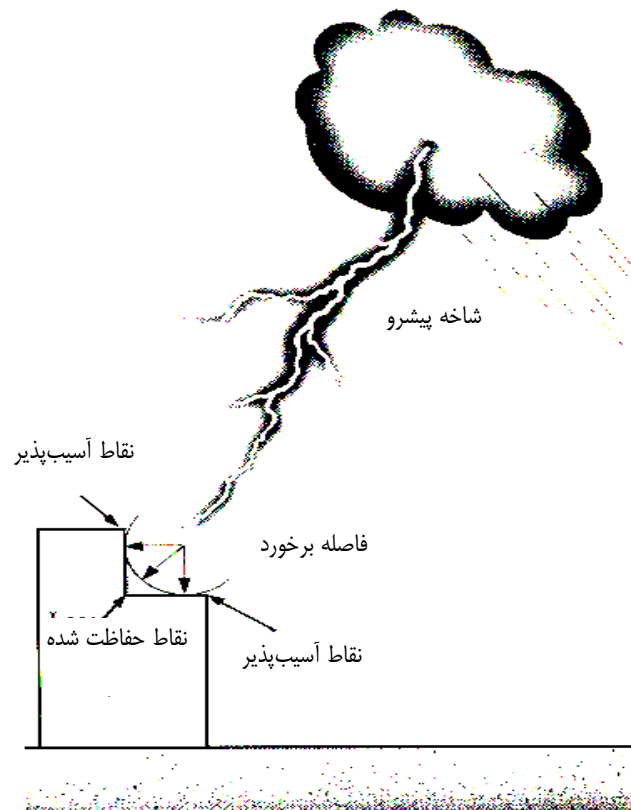
$$E = \int ri^2 dt \approx 50 \text{ kJ} \quad (۱-۲)$$

که مقدار قابل توجهی نمی‌باشد. ولی اگر صاعقه به یک درخت برخورد کند، با توجه به مقاومت اهمی نسبتاً بزرگ درخت، چند ده مگاژول انرژی در تنه درخت به گرما تبدیل می‌شود و همچنین نیروی الکترومغناطیسی ناشی از این جریان بزرگ صاعقه سبب شکستن و شکاف برداشتن درخت می‌گردد.

انواع مختلفی از صاعقه‌ها وجود دارد، از قبیل ضربات صاعقه بین ابرها و داخل ابرها، ضربات صاعقه بر روی استراکچرهای بلند و ضربات صاعقه بر روی زمین. آن دسته از ضربات صاعقه با پلاریته مثبت و منفی که به استراکچرهای بلند و سطح زمین برخورد می‌کنند می‌بایستی در طراحی سیستم‌های حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه، مورد توجه قرار گیرند.

۲-۱-۳- فاصله برخورد

برای هر تجهیز می‌توان فاصله‌ای به نام فاصله جذب یا فاصله برخورد تعریف نمود و مفهوم آن بدین صورت است که چنانچه شاخه پیشرو یک صاعقه وارد این فاصله بشود، آنگاه از طرف تجهیز مورد نظر نیز جریانی به طرف ابر جاری خواهد شد. این پدیده در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: فاصله برخورد - نقاطی که فاصله آنها بیشتر از فاصله برخورد می‌باشند کمتر در معرض برخورد صاعقه هستند

فاصله برخورد به دامنه جریان جاری شده از طرف تجهیز به ابر (جریان ضربه بازگشتی) وابسته است. معادلات فراوانی برای تعیین فاصله برخورد در مراجع مختلف ارائه گردیده‌اند، که برخی از آنها عبارتند از:

$S=2I+30(1-e^{-I/6.8})$	[مرجع ۱]	(۲-۲)
$S=10 I^{0.65}$	[مرجع ۲]	(۳-۲)
$S=9.4 I^{2/3}$	[مرجع ۳]	(۴-۲)
$S=8 I^{0.65}$	[مرجع ۴]	(۵-۲)
$S=3.3 I^{0.78}$	[مرجع ۵]	(۶-۲)
$S=27 I^{0.32}$	[مرجع ۶]	(۷-۲)
$S=6.4 I^{0.75}$	[مرجع ۷]	(۸-۲)
$S=9 I^{0.65}$	[مرجع ۸]	(۹-۲)

که در روابط فوق:

S: فاصله برخورد بر حسب متر

I: جریان ضربه بازگشتی بر حسب کیلوآمپر می‌باشد.

همانطور که مشاهده می‌گردد این معادلات ممکن است به ازای جریان‌های بازگشتی یکسان فاصله برخورد متفاوتی را ارائه بدهند. از این رو لازم است با توجه به نیاز طراحی از روابط ویژه‌ای استفاده نمود. روابط مربوط به فاصله برخورد که در این نشریه جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه به کار می‌روند، در فصل سوم ارائه خواهند شد.

۲-۱-۴- دامنه جریان برخورد^۱

از آنجایی که فاصله و جریان برخورد با هم در ارتباط هستند، اطلاع از دامنه جریان برخورد ضروری به نظر می‌رسد. مقدار میانی (۵۰٪ مشاهدات بالای این مقدار و ۵۰٪ مشاهدات زیر این مقدار) دامنه جریان برخوردی به سیم‌های گارد، هادی‌ها، استراکچرها و میله‌های بلند معمولاً برابر ۳۱ کیلوآمپر در نظر گرفته می‌شود [۴]. احتمال اینکه پیک جریان صاعقه در هر برخورد از مقدار جریان مشخصی (I) بیشتر باشد را می‌توان با معادله زیر تقریب زد:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (۱۰-۲)$$

که در آن:

P(I): احتمال اینکه جریان صاعقه در هر برخورد بیش از مقدار I باشد.

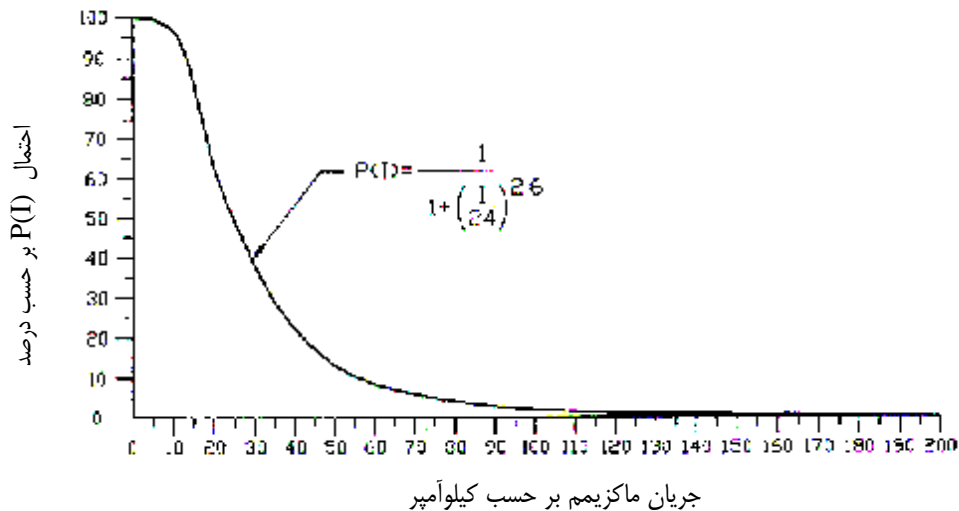
I: پیک جریان صاعقه بر حسب کیلوآمپر می‌باشد.

براساس اطلاعات بدست آمده از آزمایشات در مرجع [۸] نشان داده شده است که مقدار میانی دامنه جریان اصابت صاعقه ۲۴ کیلوآمپری برای اصابت‌های روی زمین مسطح، نتایج بهتری را به نمایش می‌گذارد. با استفاده از این مقدار متوسط برای جریان اصابت صاعقه، احتمال اینکه پیک جریان صاعقه در هر برخورد از مقدار I بیشتر باشد، با معادله زیر تقریب زده می‌شود:

1 . Stroke current magnitude

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{24}\right)^{2.6}} \quad (11-2)$$

رابطه (۱۱-۲) براساس پیک جریان اصابت صاعقه در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: احتمال افزایش دامنه جریان صاعقه از مقدار مشخص شده به ازای صاعقه‌های برخوردکننده به زمین مسطح

۲-۱-۵- سطح کرونیک

سطح کرونیک به صورت تعداد متوسط روزها یا ساعات رعد و برقی در سال برای یک مکان ویژه تعریف می‌گردد. سطح کرونیک روزانه که سطح رعد و برق روزانه نیز نامیده می‌شود، عبارت است از تعداد متوسط روزهایی از سال که رعد و برق در یک پریود ۲۴ ساعته در آن روزها مشاهده می‌گردد. در این تعریف، اگر رعد و برق در یک روز بیش از چند بار هم مشاهده گردد، آن روز همچنان براساس یک روز رعد و برقی طبقه‌بندی می‌شود. سطح کرونیک ساعتی که سطح رعد و برق ساعتی نیز نامیده می‌شود عبارت است از تعداد متوسط ساعت‌هایی از سال که رعد و برق در یک پریود ۶۰ دقیقه‌ای در آن ساعات مشاهده می‌گردد. در این تعریف، اگر رعد و برق در یک ساعت بیش از چند بار هم مشاهده گردد، آن ساعت همچنان براساس یک ساعت رعد و برقی طبقه‌بندی می‌شود. این طبقه‌بندی از سطوح کرونیک، اطلاعات جامع‌تری از چگالی صاعقه در یک سطح معین را ارائه می‌دهد. طبقه‌بندی سطوح ایزوکرونیک در مناطق مختلف کشور در نشریه "طبقه‌بندی شرایط محیطی و اقلیمی" از سری همین گزارشها آورده شده است.

۲-۱-۶- چگالی صاعقه‌های برخوردی به زمین^۱

چگالی صاعقه‌های برخوردکننده به زمین (GFD)، به صورت تعداد متوسط ضربات صاعقه بر واحد سطح و بر واحد زمان که به یک مکان مشخص برخورد می‌کنند، تعریف می‌شود. معمولاً فرض می‌شود که اصابت ضربات صاعقه به زمین و پست‌های انتقال متناسب با سطح کروونیک آن مکان ویژه می‌باشد.

در صورتی که تعداد روزهای رعد و برق در سال به عنوان مبنا در نظر گرفته شود، از معادله زیر می‌توان جهت بدست آوردن GFD استفاده شود [۲]:

$$N_g = 0.04(T_d)^{1.25} \quad (۱۲-۲)$$

یا می‌توان از معادله زیر استفاده نمود [۱]:

$$N_g = 0.12T_d \quad (۱۳-۲)$$

که در آن:

N_g : تعداد برخورد صاعقه به هر کیلومتر مربع از سطح زمین در سال.

T_d : متوسط سطح کروونیک سالیانه بر حسب روزهای رعد و برقی در سال، در آن مکان مشخص می‌باشد.

اگر ساعتهای رعد و برقی در سال به عنوان مبنا در نظر گرفته شود آنگاه از رابطه زیر می‌توان جهت محاسبه GFD استفاده نمود [۴]:

$$N_g = 0.054(T_h)^{1.1} \quad (۱۴-۲)$$

که در آن T_h ، متوسط سطح کروونیک سالیانه بر حسب ساعات رعد و برقی در سال است.

۲-۲- روشهای مرسوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه

همانطوری که قبلاً نیز اشاره گردید، روشهای مختلفی جهت طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه وجود دارد. این روشها براساس تئوریها و خواص حاکم بر نواحی حفاظتی فراهم شده بوسیله سیمهای گارد و میله‌های حفاظتی از یکدیگر تمیز داده می‌شوند.

روشهای مرسوم که جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه بکار برده می‌شوند عبارتند از:

- روش زوایای ثابت^۲

- روش منحنی‌های تجربی^۳

- روش مدل الکتروهندسی^۴

1 . Ground flash density
2 . Fixed angles
3 . Empirical curves
4 . Electrometric model

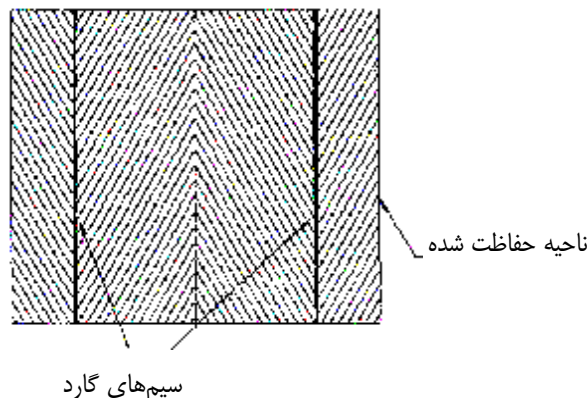
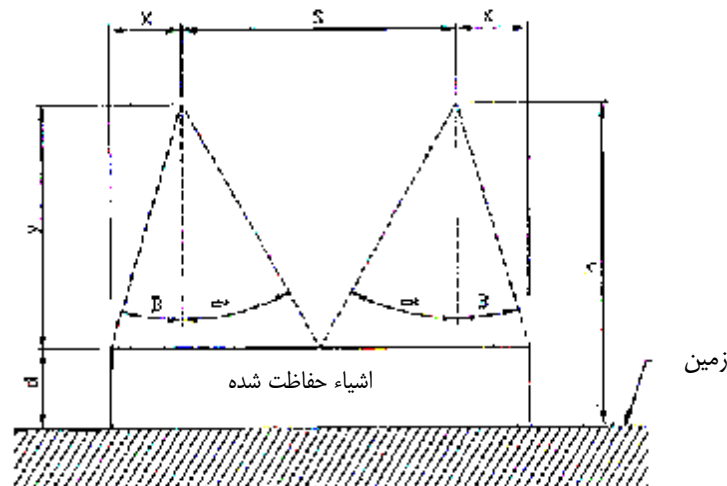
۱-۲-۲- روش زوایای ثابت

روش زوایای ثابت شاید قدیمی‌ترین روش طراحی سیستم حفاظت از صاعقه باشد. این روش جزء روش‌های تجربی طراحی سیستم حفاظت از صاعقه محسوب می‌گردد. در روش فوق از یک سری از زوایای ثابت جهت تعیین تعداد، محل و ارتفاع سیم‌های گارد و میله‌های حفاظتی استفاده می‌گردد.

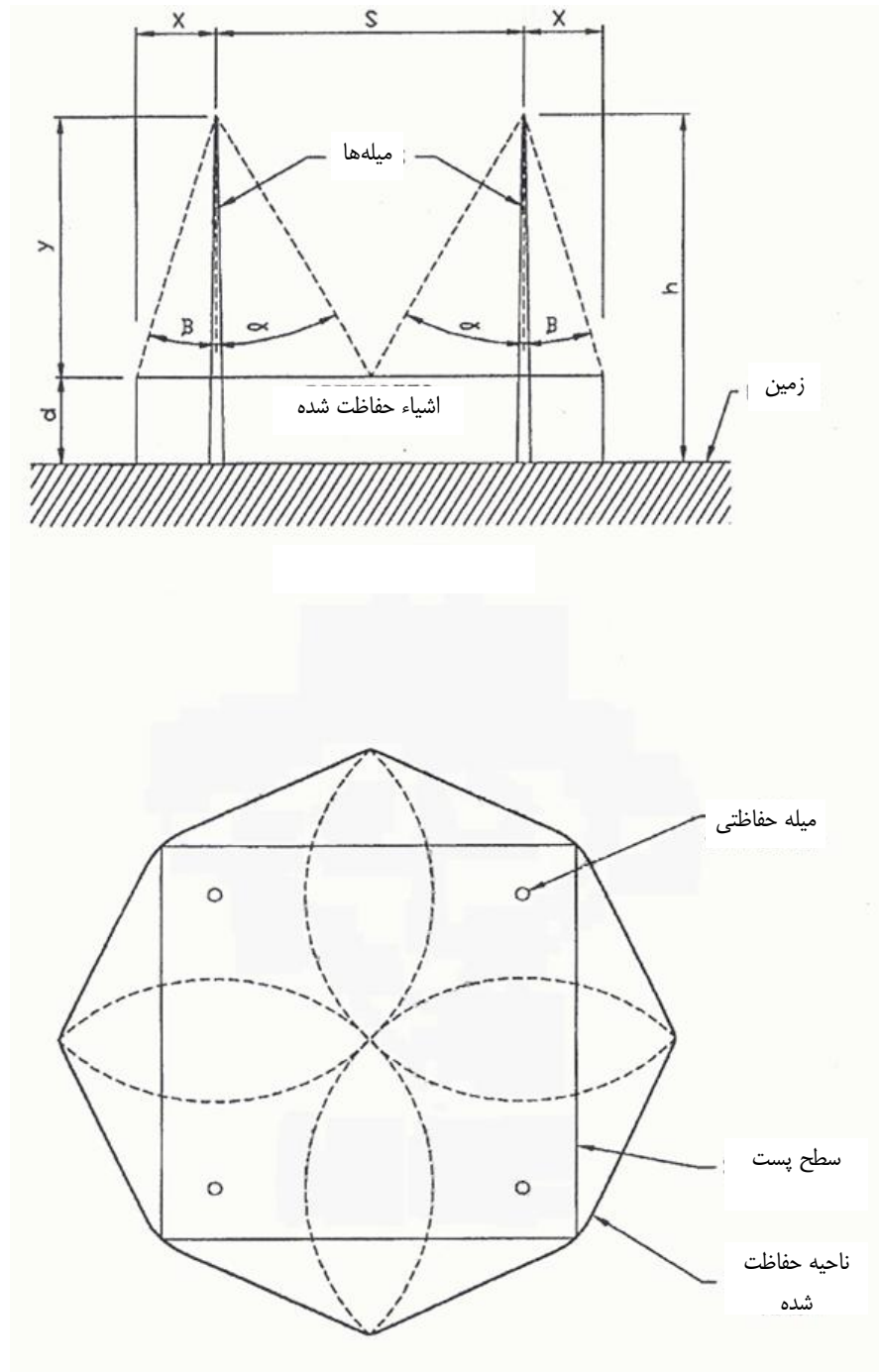
در این روش، نواحی حفاظتی فراهم شده بوسیله سیم‌های گارد و میله‌های حفاظتی با انتخاب زوایای ثابت تعیین می‌گردند. بعنوان مثال، شکل (۲-۵) نحوه کاربرد این روش را با استفاده از سیم‌های گارد و شکل (۲-۶) این روش را در هنگام استفاده از میله‌های حفاظتی نشان می‌دهد.

زوایای مورد استفاده با پارامترهایی نظیر نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه، اهمیت پستی که قرار است محافظت گردد و سطح فیزیکی اشغال شده بوسیله پست، تعیین می‌گردند. مقدار زاویه α عموماً برابر ۴۵ درجه انتخاب می‌شود و برای زاویه β نیز مقادیر ۳۰ یا ۴۵ درجه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با افزایش ارتفاع استراکچرها، به منظور دست یافتن به همان نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFR) قبلی می‌بایستی زوایای حفاظتی را کاهش داد. میزان تغییرات نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه به صورت تابعی از ارتفاع استراکچر تجهیزات حفاظتی و زاویه حفاظتی مطابق جدول (۲-۱) ارائه می‌گردد [۱۰].



شکل ۲-۵: ساختار سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه با استفاده از سیم‌های گارد به روش زوایای ثابت



شکل ۲-۶: ساختار سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه با استفاده از میله‌های حفاظتی به روش زوایای ثابت

جدول ۲-۱: مقادیر نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه که بصورت تابعی از ارتفاع و زاویه حفاظتی محاسبه شده‌اند [۱۰]

نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه در هر صدکیلومتر در سال به ازای زوایای حفاظتی زیر							ارتفاع سیم گارد بر حسب متر
۴۵ درجه	۴۰ درجه	۳۵ درجه	۳۰ درجه	۲۵ درجه	۲۰ درجه	۱۵ درجه	
۰/۲۲۸۶	۰/۱۰۳۲	۰/۰۳۸۳	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۰۱	۰	۰	۱۰
۰/۴۴۸۳	۰/۲۱۸۲	۰/۰۹۸۲	۰/۰۳۵۱	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۰۰۸۳	۱۵
۰/۶۹۰۳	۰/۳۴۶۶	۰/۱۶۹۵	۰/۰۷۱۱	۰/۰۲۱۴	۰/۰۰۲۶	$۸/۳ \times ۱۰^{-۶}$	۲۰
۰/۹۴۲۹	۰/۴۸۱۹	۰/۲۴۶۸	۰/۱۱۲۳	۰/۰۴۰۴	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۱۱	۲۵
۱/۲۰۰۸	۰/۶۲۰۸	۰/۳۲۷۵	۰/۱۵۶۵	۰/۰۶۲۰	۰/۰۱۷۰	۰/۰۰۳۵	۳۰
۱/۴۶۰۸	۰/۷۶۱۶	۰/۴۱۰۰	۰/۲۰۲۴	۰/۰۸۵۳	۰/۰۲۶۹	۰/۰۰۶۹	۳۵
۱/۷۲۱۴	۰/۹۰۳۵	۰/۴۹۳۶	۰/۲۴۹۴	۰/۱۰۹۶	۰/۰۳۷۸	۰/۰۱۰۹	۴۰
۱/۹۸۲۰	۱/۰۴۶۲	۰/۵۷۷۶	۰/۲۹۶۹	۰/۱۳۴۵	۰/۰۴۹۳	۰/۰۱۵۵	۴۵
۲/۲۴۲۳	۱/۱۸۹۲	۰/۶۶۱۹	۰/۳۴۴۷	۰/۱۵۹۸	۰/۰۶۱۲	۰/۰۲۰۴	۵۰

همانگونه که از جدول (۲-۱) مشاهده می‌گردد، در صورت افزایش ارتفاع سیم گارد، زاویه حفاظتی بمنظور همسان نگه‌داشتن نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه، باید کاهش یابد.

عموماً برای ارتفاعهای تا ۱۵ متر، زاویه حفاظتی ۴۰ تا ۴۵ درجه، برای ارتفاعهای بین ۱۵ تا ۲۵ متر، زاویه حفاظتی ۳۰ درجه و برای ارتفاعهای بالای ۲۵ تا ۵۰ متر، زاویه حفاظتی کمتر از ۲۰ درجه پیشنهاد می‌گردد [۱۰]. در این حالت میزان نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFR) بین ۰/۱ تا ۰/۲ در هر ۱۰۰ کیلومتر در سال در نظر گرفته شده است (البته در این مثال چگالی صاعقه‌های سطح مورد نظر مشخص نمی‌باشد، لذا ممکن است این مقادیر برای مکانهایی با چگالی صاعقه متفاوت، بگونه‌ای دیگر تغییر یابد). در مورد میله‌های حفاظ نیز می‌توان جدول مشابهی را تهیه نمود.

از آنجا که تقریبهای بکار رفته در رسم نواحی حفاظتی فراهم شده بوسیله سیمهای گارد و میله‌های حفاظتی در روش زوایای ثابت تا حدودی دور از واقعیت می‌باشد، امروزه استفاده از این روش جز در مواردی که قادر به پذیرش نرخ بالایی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه باشیم، منسوخ گردیده است. لذا پیشنهاد می‌گردد برای طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پستها از این روش استفاده نشود.

۲-۲-۲- روش منحنی‌های تجربی

استفاده از روش منحنی‌های تجربی در سال ۱۹۴۱ میلادی بوسیله Wagner, McCann و MacLane پیشنهاد شد. این منحنی‌ها براساس یک سری آزمونهای خاص استخراج شده‌اند [۱۱]. اساس آزمونهای مورد استفاده به این صورت بوده است که موجهای ضربه‌ای با پلاریته مثبت $1-1.2/40 \mu\text{sec}$ از طریق یک میله (که نمایشگر ابر باردار است) به صفحه زمین یا یک سیم گارد افقی و هادی که نزدیک آن قرار گرفته است، تخلیه می‌گردد. فاصله نسبی بین الکتروود، سیم گارد و هادی با هر تخلیه تغییر داده می‌شود تا یک سری اطلاعات پایه‌ای مناسب برای تحلیل‌های بعدی حاصل گردد. سپس از طرحهای رسم شده حاصل از این

اطلاعات مبنا می‌توان درصد تخلیه‌های انجام گرفته بر روی سیم گارد، هادی یا صفحه زمین را بدست آورد. همچنین آزمونهای مشابهی بر روی تعداد سیمهای گارد بیشتری صورت گرفت و ضرایب اصلاحی برای این حالتها نیز بدست آمد. در سالیان بعد، نتایج تحقیقات فوق براساس آزمونهای جدید توسعه یافت و یک سری از منحنی‌ها که براساس ارتفاع و فاصله سیمهای گارد و میله‌های حفاظ برای نرخهای خطای مختلف بدست آمده بودند، ارائه شد. به علت نزدیک بودن شرایط آزمونهای انجام گرفته به شرایط واقعی‌ای که سیستم حفاظت از صاعقه در هنگام بروز صاعقه با آن مواجه است، نتایج استخراج شده از این منحنی‌ها با نتایج حاصل از روشهای پیشرفته‌تر همانند روش الکتروهندسی همخوانی خوبی داشته و امروزه از این روش نیز جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پستهای فشار قوی استفاده می‌گردد. مشکل اصلی روش منحنی‌های تجربی، عام بودن آرایشهای سیستمهای حفاظتی است که منحنی‌ها برای آن آرایشها استخراج شده‌اند. به این صورت که با تغییر آرایش میله‌ها و سیمهای حفاظتی به شکلی غیر از آرایش مشخص شده در منحنی‌های تجربی، امکان استخراج اطلاعات دقیق از این منحنی‌ها به سختی قابل انجام است و لذا نمی‌توان این منحنی‌ها را در هنگام طراحی سیستم حفاظت از صاعقه‌ای که وضعیت قرارگیری سیمها و میله‌های حفاظتی در آن متفاوت از آرایشهای مشخص شده در این منحنی‌های تجربی است بکار برد. منحنی‌های تجربی که در طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست مورد استفاده قرار می‌گیرند، در پیوست (۱-۳) فصل سوم ارائه شده‌اند.

۲-۲-۳- روش مدل الکتروهندسی

روش مدل الکتروهندسی که براساس ایده فواصل برخورد صاعقه بنا نهاده شده است، امروزه بطور وسیعی در طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پستهای فشار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هنگام طراحی سیستم حفاظت از صاعقه خطوط انتقال به ازای آرایش مشخصی از سیم یا سیمهای گارد (که دارای هندسه ساده‌ای می‌باشند) و با در نظر گرفتن میزان مشخصی از نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه می‌توان به یک جریان طراحی دست یافت که از آن جهت استخراج فواصل برخورد و رسم نواحی حفاظتی استفاده می‌گردد. با این حال کاربرد این روش در مورد پستها متفاوت می‌باشد. به این صورت که در این حالت بدست آوردن ارتباط بین جریان طراحی و نرخ خطای قابل قبول برای سیستم حفاظت از صاعقه مورد نظر، بسیار مشکل بوده و جز با استفاده از روشهای کامپیوتری امکان پذیر نمی‌باشد.

برای روشن شدن این مطلب، مشکل فوق را از دیدگاه نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه مورد بررسی قرار می‌دهیم.

نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFR) نشان‌دهنده تعداد ضربات صاعقه وارد شده بر روی هادیهای پست به جهت خطای سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه می‌باشد. اگر ولتاژ ایجاد شده بوسیله ضربات صاعقه بر روی هادی بیش از CFO (ولتاژ قوس بحرانی) باشد، ممکن است این ضربات صاعقه منجر به بروز قوس الکتریکی گردند. از این رو SFR دربرگیرنده کلیه ضربات صاعقه است چه این ضربات موجب بروز قوس شده و چه ایجاد قوس را به دنبال نداشته باشند. با توجه به شکل (۲-۷)، ولتاژ روی هادی و ولتاژ دو سر عایق، E، به ازای موج جریان صاعقه، I، از رابطه زیر تعیین می‌گردد (ولتاژ ضربه E با رسیدن به نقاط باز و ترانسفورماتورها به ۲ برابر دامنه می‌رسد):

$$E = \frac{Z_c}{2} \times I \quad (2-15)$$

که در آن Z_C امپدانس موجی هادی فاز است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \ln \frac{2h_{av}}{r} \quad (۱۶-۲)$$

که در آن:

h_{av} : فاصله متوسط هادی فاز از زمین برحسب متر

r : شعاع هادی برحسب متر می‌باشد.

چنانچه از هادیهای باندد استفاده شده باشد باید از شعاع معادل R_0 به جای r استفاده کرد. مقدار R_0 را می‌توان از روابط زیر

بدست آورد:

$$R_0 = \sqrt{r \times d} \quad \text{در حالت باندد دوتایی} \quad (۱۷-۲)$$

$$R_0 = \sqrt[3]{r \times d^2} \quad \text{در حالت باندد سه تایی} \quad (۱۸-۲)$$

$$R_0 = 1.09 \sqrt[4]{r \times d^3} \quad \text{در حالت باندد چهارتایی} \quad (۱۹-۲)$$

در این روابط d فاصله دو هادی باندد مجاور هم برحسب متر می‌باشد.

اگر ولتاژ E برابر با ولتاژ قوس بحرانی (CFO) با پلاریته منفی قرار داده شود، آنگاه جریان بحرانی که در آن و بالاتر از آن قوس

رخ می‌دهد از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$I_C = \frac{2.068(CFO)}{Z_C} \approx \frac{2.068(LIWL)}{Z_C} \quad (۲۰-۲)$$

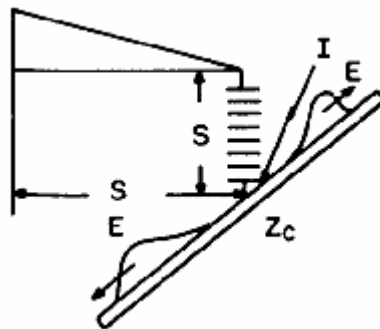
که در آن:

I_C : جریان بحرانی برحسب کیلوآمپر

Z_C : امپدانس موجی هادی برحسب اهم

CFO: ولتاژ جرقه بحرانی برحسب کیلوولت

LIWL: سطح استقامت عایقی مقره هادی در برابر موج ضربه صاعقه برحسب کیلوولت می‌باشد.



شکل ۲-۷: برای ایجاد جرقه، ولتاژ E باید بزرگتر از CFO باشد

ابتدا یک سیم گارد را در نظر بگیرید که قرار است تجهیز مجاور خود را در برابر برخورد مستقیم صاعقه محافظت نماید. این ترکیب در شکل (۸-۲) نشان داده شده است (برای آشنایی با چگونگی رسم این نواحی به بخش ۳-۳ مراجعه نمایید). با استفاده از رابطه زیر می‌توان نرخ خطای سیستم حفاظتی که منجر به ایجاد جرقه می‌گردد (SFFOR)، را بدست آورد.

$$SFFOR = N_g L \int_{I_c}^{I_m} D_c P(I) dI \quad (21-2)$$

در این رابطه:

N_g : تعداد ضربات صاعقه در سال در محل پست (رابطه ۲-۱۲)

L : بعدی از تجهیز که رو به داخل صفحه قرار می‌گیرد (برحسب کیلومتر)

D_c : طول افقی کمائی است که چنانچه صاعقه‌ای به آن کمان وارد شود به جسم مورد حفاظت برخورد خواهد کرد (برحسب کیلومتر) و این پارامتر تابعی از جریان است.

$P(I)$: احتمال افزایش جریان صاعقه از مقدار مشخص جریان I می‌باشد (رابطه ۲-۱۱ یا شکل ۲-۴).

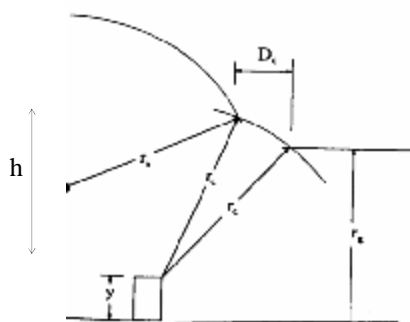
I_c : جریان بحرانی برحسب کیلوآمپر

I_m : جریانی که به ازای آن فواصل برخورد بگونه‌ای افزایش پیدا می‌کنند که کمانهای رسم شده به مرکزیت سیم‌های گارد، تمام ضربات صاعقه را جذب خواهند کرد و هیچ ضربه صاعقه‌ای بر روی تجهیز تحت حفاظت وارد نمی‌شود یا به عبارتی جریان صاعقه به ازای $D_c = 0$ (برحسب کیلوآمپر).

h : ارتفاع سیم گارد برحسب متر

y : ارتفاع تجهیز تحت حفاظت برحسب متر

r_c, r_g, r_s : طول فواصل برخورد صاعقه به ترتیب به سیم یا میله حفاظتی، زمین و تجهیز که همگی برحسب متر می‌باشند.

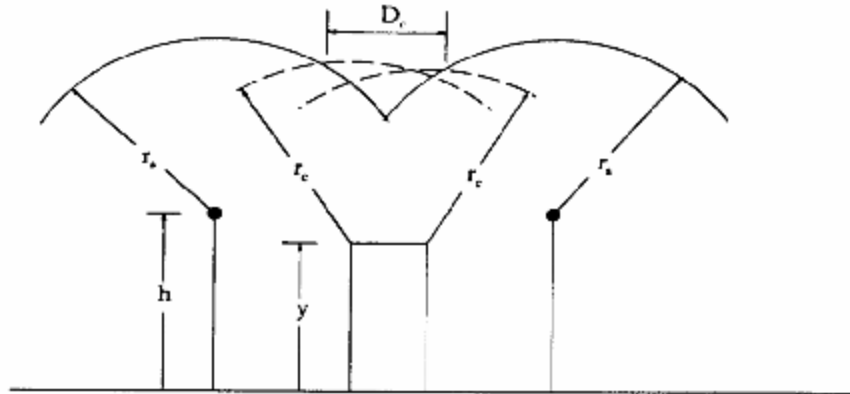


شکل ۲-۸: SFFOR برای یک سیم حفاظتی

حل معادله (۲۱-۲) به ازای میزان SFFOR موردنیاز جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه منجر به یک جریان طراحی می‌گردد که با استفاده از این جریان طراحی و ایده فواصل برخورد می‌توان نواحی حفاظتی فراهم شده بوسیله سیستم حفاظت از صاعقه را رسم و مورد بررسی قرار داد.

همانطور که از شکل (۸-۲) مشخص است، در حالتی که از یک سیم گارد استفاده می‌شود، محاسبه D_c چندان پیچیده و مشکل نمی‌باشد اما چنانچه بخواهیم D_c را در مورد دو یا تعداد بیشتری از سیم‌های گارد و میله‌های حفاظتی بدست آوریم، دچار مشکل

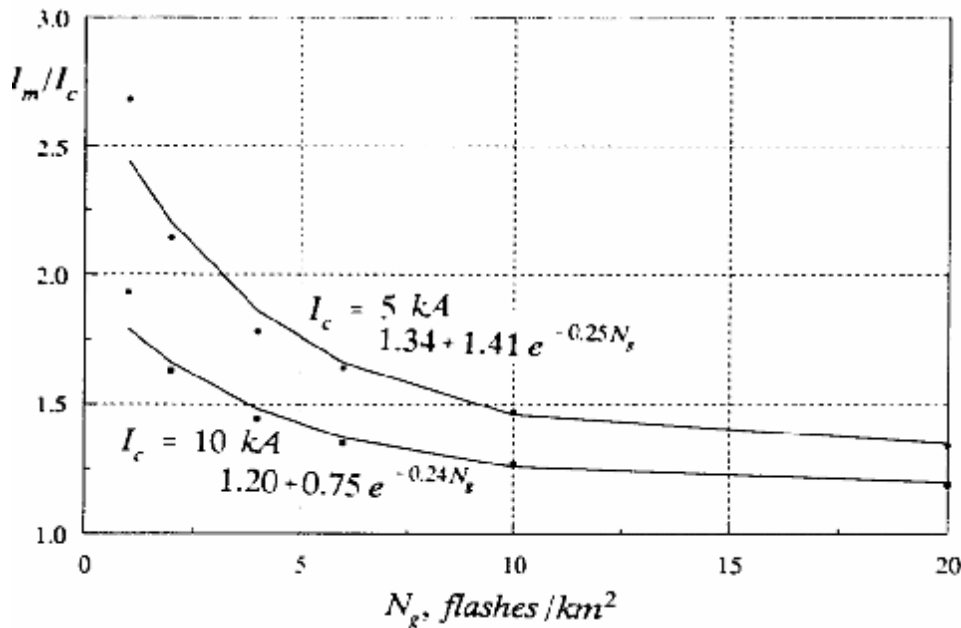
خواهیم شد و در بعضی موارد جز با روشهای کامپیوتری قادر به محاسبه SFFOR نخواهیم بود. بعنوان مثال در شکل (۲-۹) محاسبه D_C برای دو میله حفاظ بسیار پیچیده خواهد بود.



شکل ۲-۹: SFFOR برای دو میله حفاظتی

بطور ایده‌آل، روش طراحی با استفاده از مدل الکتروهندسی در پستهای فشار قوی از دیدگاه نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR) به همان صورت روش طراحی سیستم حفاظت از صاعقه خطوط انتقال می‌باشد. اما اگر بخواهیم از طریق SFFOR به جریان طراحی برسیم و سپس براساس ایده فواصل برخورد طراحی را انجام دهیم، این عمل تنها برای شینه‌های پست امکان‌پذیر خواهد بود و برای سایر تجهیزات گرچه که این روش از نظر تئوری میسر است اما بسیار پیچیده و پرهزینه می‌باشد. بطور کلی برای سادگی انجام رویه طراحی و فراهم نمودن قابلیت بکارگیری آن برای سایر تجهیزات پست علاوه بر شینه‌ها، طراحی حفاظت از صاعقه براساس یک جریان طراحی انجام می‌پذیرد. این جریان طراحی به منظور استفاده در معادلات فواصل برخورد صاعقه در نظر گرفته می‌شود.

به منظور دست یافتن به جریان طراحی، I_h ، نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR) را برابر با $0/05$ قوس بر هر صد کیلومتر در سال در نظر می‌گیریم. حال می‌توان نشان داد که نسبت جریان ماکزیمم I_m به جریان بحرانی I_C برای رابطه فاصله برخورد معادله (۲-۵) برای شکل (۲-۸)، به صورت شکل (۲-۱۰) تابعی از چگالی صاعقه‌های برخورد کننده به زمین N_g خواهد بود.



شکل ۲-۱۰: نسبت I_m/I_c به ازای $\Delta \text{Flash Over}/100\text{km-year}$ و معادله (۲-۵)

براساس شکل (۲-۱۰) می‌توان معادله زیر را برای جریان طراحی برحسب تابعی از جریان بحرانی و تعداد صاعقه‌های برخوردکننده به زمین نوشت:

$$I_d = (1.27 + 0.72e^{-N_g/4}) I_c \quad (2-22)$$

قبل از استفاده از این معادله، لازم است که مقدار N_g مشخص گردد. مقدار N_g معمولاً از طریق سطوح ایزوکرونیک در محل پست مورد نظر، جهت طراحی و با استفاده از معادله (۲-۱۲) استخراج می‌گردد.

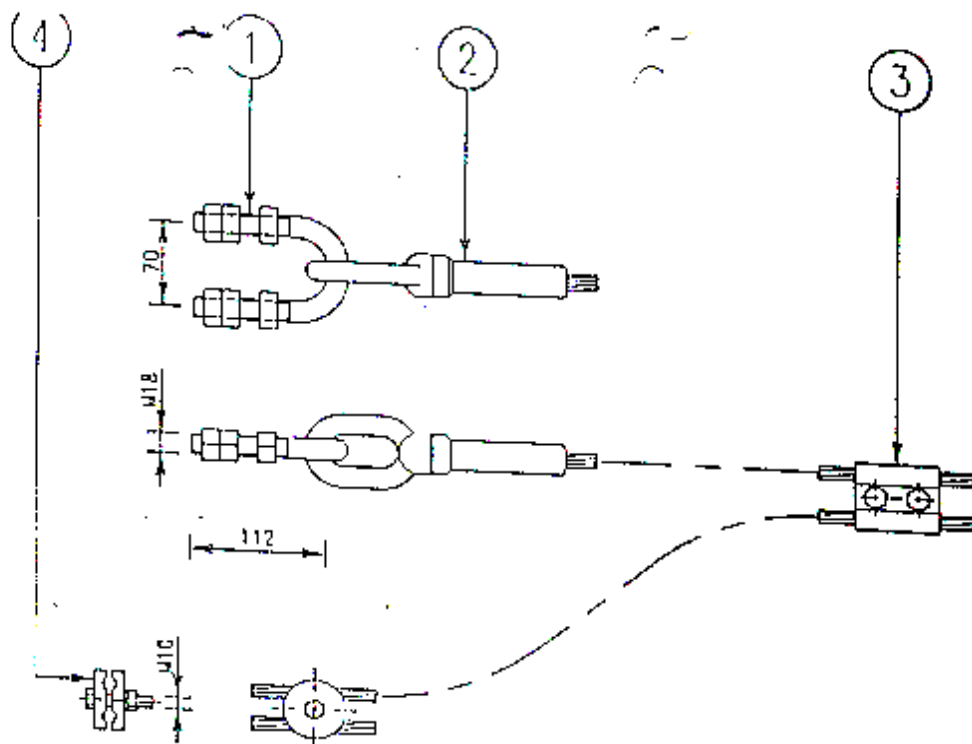
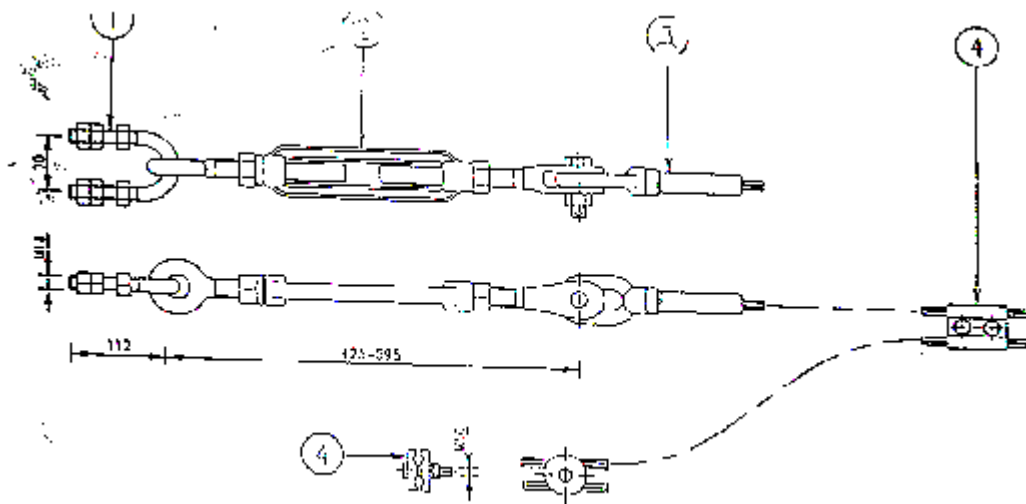
پس از مشخص شدن جریان طراحی I_d از رابطه فوق، به راحتی می‌توان با استفاده از ایده فواصل برخورد به رسم و بررسی نواحی حفاظتی پرداخت. استخراج معادله (۲-۲۲) به ازای میزان SFFOR برابر با ۰/۰۵ قوس بر هر صد کیلومتر در سال انجام گرفته است که جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست‌ها نرخ خطای قابل قبولی می‌باشد [۲].

۲-۳- پراک‌آلات سیستم حفاظت از صاعقه

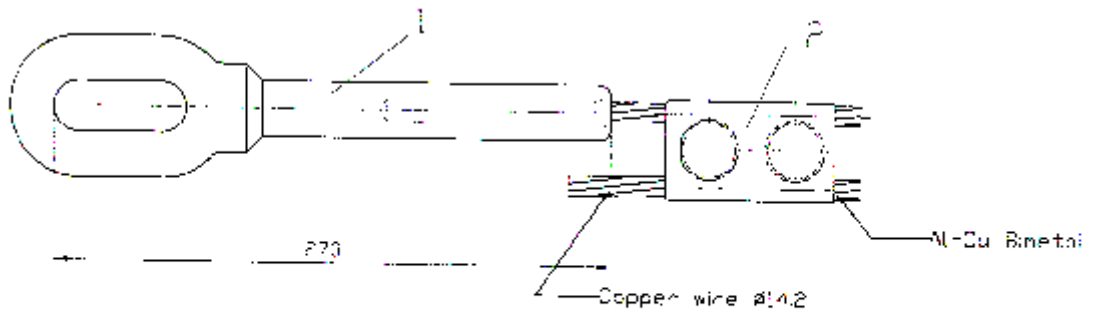
هادیه‌های حفاظتی از طریق اتصالات مناسب که شامل قلاب زنجیرها، پیچهای رکابی، صفحات یوغ و کلمپای انتهایی بررسی می‌باشند، به اسکلت‌های فلزی و سازه‌ها متصل می‌گردند.

اتصالاتی که جهت سیستم حفاظت از صاعقه انتخاب می‌شوند باید قادر باشند تنشهای موجود مربوط به باد، یخ، لرزش و نوسانات در اثر تغییر درجه حرارت و وقوع اتصال کوتاه را بدون تغییر شکل در خود تحمل کنند.

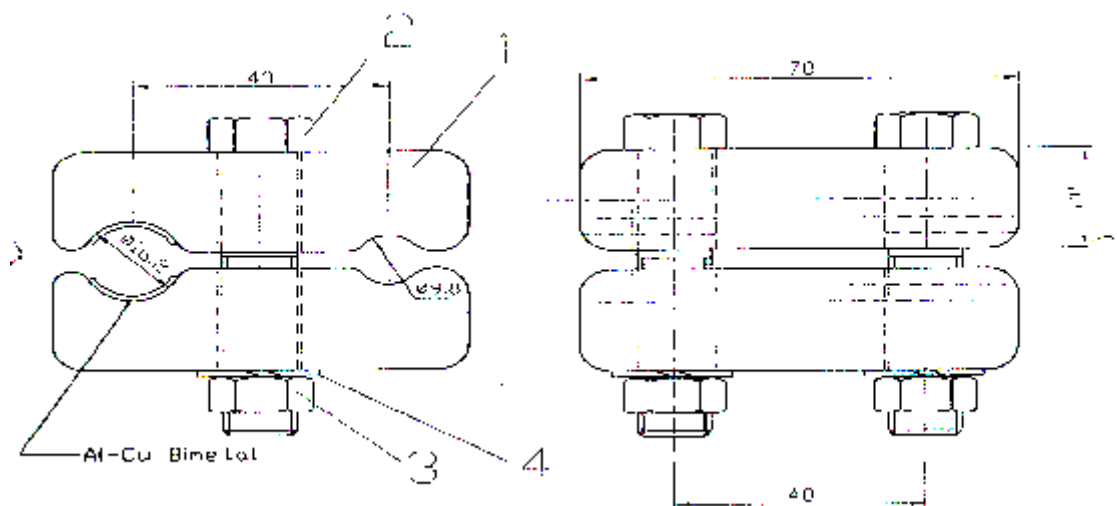
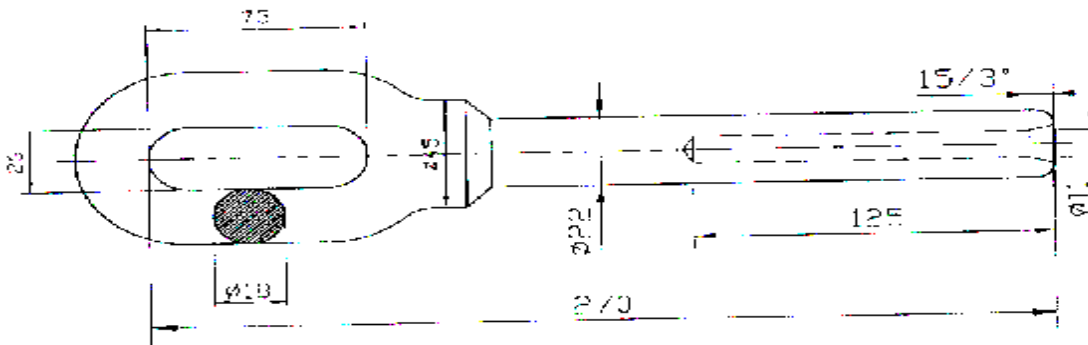
انتخاب اتصالات مناسب جهت نصب سیمها و میله‌های حفاظت از صاعقه با توجه به سیستم طراحی شده انتخاب می‌گردد، لذا برای هر آرایش خاصی از نحوه قرارگیری سیمها و میله‌های حفاظتی ممکن است از گونه‌های مختلفی از اتصالات مربوطه استفاده گردد، چند نمونه از این اتصالات که جهت نصب سیمهای گارد و میله‌های حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرند در شکل‌های (۲-۱۱) و (۲-۱۲) نشان داده شده است.



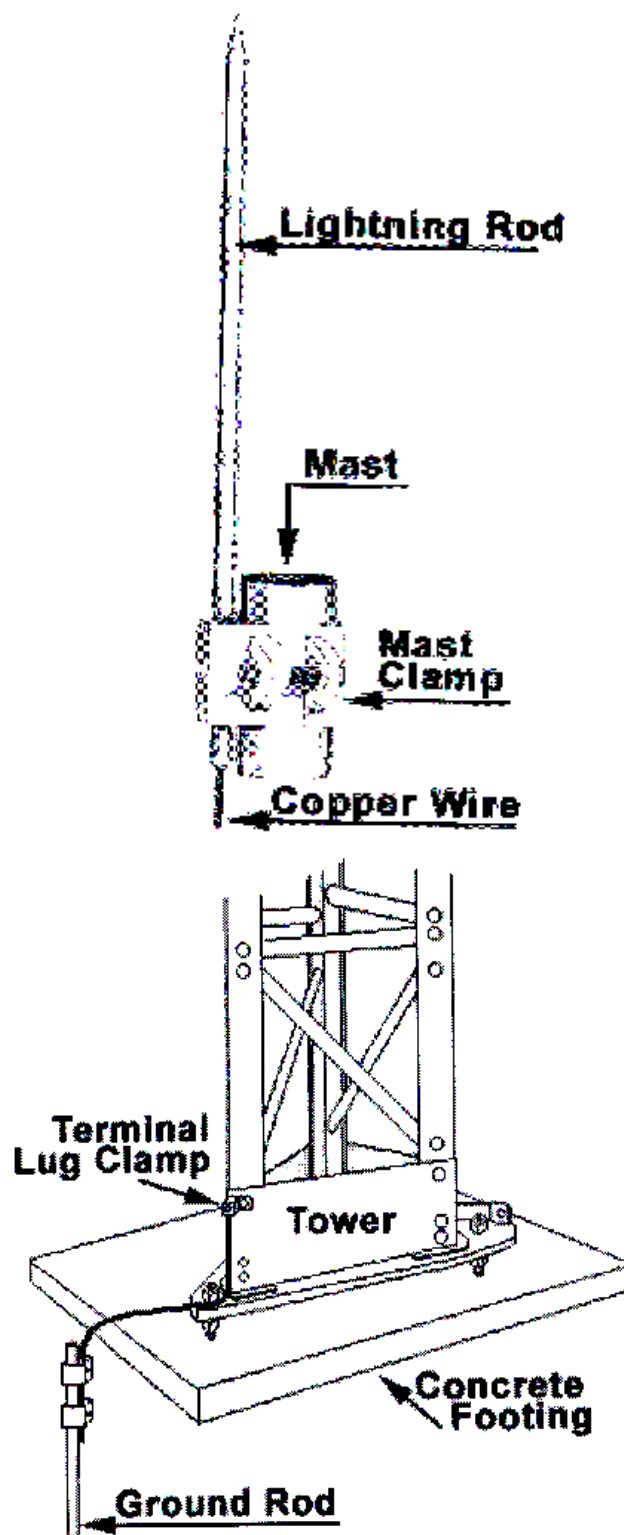
شکل ۲-۱۱: گونه‌های مختلفی از اتصالات مورد استفاده در نصب سیمهای حفاظت از صاعقه



M.n. Br. Lead -%95 UTS Shieldwire



ادامه شکل ۲-۱۱



شکل ۲-۱۲: گونه‌های مختلفی از اتصالات مورد استفاده در نصب میله‌های حفاظت از صاعقه

فصل ۲

معیارهای طراحی و مهندسی سیستم

حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه

مقدمه

در این فصل روشها و معیارهای طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پستهای فشار قوی بیان می‌گردد. در پایان مثالهایی جهت آشنایی با روشهای طراحی ارائه می‌شوند.

۳-۱- کلیات

همانطور که در فصل اول و دوم بیان گردید وظیفه سیستم حفاظت از صاعقه، جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات داخل پست می‌باشد. صاعقه‌هایی که جریان آنها کمتر از جریان بحرانی I_c هستند، نمی‌توانند برای تجهیزات داخل پست مشکل خاصی را ایجاد کنند. لذا عبور صاعقه‌هایی با دامنه کوچکتر از جریان بحرانی از سیستم حفاظت از صاعقه مجاز می‌باشد. آنچه که باید از آن اجتناب نمود ورود صاعقه‌هایی با دامنه بزرگتر از جریان بحرانی است چرا که اینگونه ضربات صاعقه می‌توانند ولتاژهایی بزرگتر از حد تحمل استقامت عایقی تجهیزات پست (LIWL) را ایجاد نموده و موجبات بروز قوس الکتریکی را در پست فراهم نمایند. طراحی سیستم حفاظت از صاعقه‌ای که بتواند از ورود تمامی ضربات صاعقه‌ای که دامنه آنها بزرگتر از جریان بحرانی است جلوگیری بعمل آورد، در عمل غیراقتصادی می‌باشد چرا که این امر مستلزم آن است که جریان بحرانی به عنوان جریان طراحی انتخاب گردد و به علت کوچک بودن این جریان، طول فواصل برخورد نیز کوچک می‌شود و لذا برای فراهم دیدن ناحیه حفاظتی مطلوب باید از تعداد زیادی سیم گارد و میله حفاظتی استفاده نمود که این امر ممکن است هزینه طراحی سیستم حفاظت از صاعقه را تحت تأثیر قرار دهد.

چنانچه مقدار کوچکی SFFOR (مثلاً ۰/۰۰۱ قوس در هر سال) برای سیستم حفاظت از صاعقه در نظر بگیریم، این مشکل نیز قابل حل خواهد بود چرا که با پذیرش این نرخ کوچک خطا می‌توان از جریانهای طراحی بزرگتر از جریان بحرانی استفاده نمود و به این طریق نسبت به حالت قبل سیمهای گارد و میله‌های حفاظتی کمتری را بکار برد و بدین طریق هزینه‌های طراحی را کاهش داد. البته به علت طبیعت احتمالی بودن پدیده صاعقه، پذیرش این نرخ کوچک خطا قابل قبول می‌باشد. در صورتی که پست مورد نظر برای طراحی از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده یا در شرایط محیطی نامناسب باشد، طراحی سیستم حفاظت از صاعقه می‌تواند بر مبنای جریان طراحی برابر با جریان بحرانی صورت گیرد تا حفاظت کامل فراهم شود. در حالت کلی جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست گامهای زیر باید دنبال گردد:

گام اول:

تعیین میزان اهمیت پست و مقدار شاخص حفاظت مورد نیاز برای طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست (تعداد قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه).

گام دوم:

بررسی تعداد صاعقه‌های احتمالی در محلی که پست در آن قرار دارد و یا قرار است که در آنجا احداث گردد (تعیین سطح کرونیک در محل پست).

گام سوم:

تهیه مشخصات پستی که قرار است در مقابل برخورد مستقیم صاعقه حفاظت گردد. پستها از نظر سطح ولتاژی که برای کار در آن ولتاژ طراحی شده‌اند متفاوت بوده لذا هماهنگی عایقی و سطح عایقی و وسعت پست بطور مستقیم بستگی به ولتاژ نامی پست دارد. بنابراین در طراحی سیستم حفاظت از صاعقه بایستی اطلاعات زیر مورد توجه قرار گیرند:

- ولتاژ نامی تجهیزات پست

- سطح عایقی تجهیزات پست

- مشخصات هادیهای استفاده شده در شینه‌ها (از قبیل باندلی بودن یا نبودن و شعاع هادیها)

- نقشه‌های جانمایی تجهیزات پست

گام چهارم:

انتخاب روش مناسبی جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه با توجه به موارد ارزیابی شده در گام‌های قبلی.

گام پنجم:

بررسی سیستم حفاظت از صاعقه از دو دیدگاه هزینه و میزان حفاظت موثر فراهم شده برای تجهیزات.

طراحی سیستم حفاظت از صاعقه براساس گام‌های فوق اغلب نیاز به جمع‌آوری اطلاعات و محاسبات نسبتاً پیچیده‌ای دارد. بدیهی است در صورتی که پست مورد مطالعه از درجه اهمیت بالایی برخوردار باشد، ضروری است کلیه گام‌های فوق با دقت و با استفاده از تحلیل‌های کامپیوتری دنبال گردند تا سیستم حفاظت از صاعقه مطلوب بدست آید. به هر حال، به منظور فراهم نمودن امکان طراحی بدون نیاز به محاسبات پیچیده و کامپیوتری می‌توان از روشهای تقریبی استفاده نمود. بطور کلی در طراحی سیستم حفاظت از صاعقه از دو روش زیر استفاده می‌شود:

- روش منحنی‌های تجربی
- روش مدل الکتروهندسی

در هنگام استفاده از منحنی‌های تجربی جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست، اطلاع از ولتاژ نامی و سطح عایقی تجهیزات پست و مشخصات هادیهای مورد استفاده در شینه‌ها ضرورتی ندارد و تنها با مشخص بودن محل قرارگیری تجهیزات پست و با داشتن نقشه جانمایی تجهیزات پست می‌توان سیستم حفاظت از صاعقه را با استفاده از این منحنی‌ها طراحی و یا بررسی نمود. اما در هنگام طراحی با استفاده از روش مدل الکتروهندسی اطلاع از موارد فوق کاملاً ضروری می‌باشد.

نتایج حاصل از مدل الکتروهندسی دقیق‌تر از روش منحنی‌های تجربی هستند و لذا توصیه می‌گردد که در طراحی‌ها بویژه طراحی پستهای کلیدی از این روش استفاده گردد. در خصوص این دو روش نکات زیر ضروری به نظر می‌رسد:

در روش منحنی‌های تجربی از منحنی‌هایی که دارای نرخ خطایی برابر با ۰/۱ یا ۱ درصد هستند استفاده می‌شود.

هنگام استفاده از روش مدل الکتروهندسی، در صورت استفاده از جریان طراحی مشخص شده بوسیله رابطه (۲-۲۲) نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR) کمتر از ۰/۰۵ قوس بر هر صد کیلومتر در سال خواهد بود و اطلاع از سطح کرونیکی در محل پست جهت استفاده از این رابطه الزامی است. در صورتی که به جای جریان طراحی مشخص شده بوسیله رابطه (۲-۲۲) از جریان

بحرانی، I_c به عنوان جریان طراحی استفاده گردد نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه صفر بوده (حفاظت کامل) و اطلاع از سطح کروونیک در محل پست ضرورتی ندارد.

بررسی سیستم حفاظت از صاعقه از دو دیدگاه هزینه و میزان حفاظت فراهم شده با توجه به مطالب فوق براساس میزان نرخ خطای در نظر گرفته شده در طراحی صورت می‌گیرد و طراح می‌تواند با تغییر نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (استفاده از منحنی‌های ۱ و ۰/۱ درصد خطا در روش منحنی‌های تجربی و یا استفاده از رابطه (۲-۲۲) و یا I_c در روش مدل الکتروهندسی) به بررسی سیستم حفاظت از صاعقه از این دو دیدگاه پردازد.

با در نظر گرفتن موارد فوق، اکنون طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست را با استفاده از روشهای منحنی‌های تجربی و مدل الکتروهندسی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۳-۱-۱- انتخاب آرایش بهتر

ممکن است برای حفاظت از صاعقه محوطه پست به آرایش‌های گوناگونی دست یافت که در شرایط یکسان انتخاب آرایش بهتر به عوامل زیر بستگی دارد:

- نواحی ترانسفورماتورها، شینه‌ها که اهمیت فراوانی دارند را کاملاً پوشش دهند.
- حداقل تجهیزات در زیر سیم گارد واقع گردد (کراس کمتری با تجهیزات داشته باشند).
- پیوستگی حفاظت از صاعقه در سوئیچ‌گیرها رعایت شده باشد.
- تنظیم فلش سیم گارد بر حداقل آکس واقع گردد (در بهره‌برداری بهتر است تنظیم فلش‌های چند سیم گارد از طریق یک گنتری انجام پذیرد).

۳-۲- روش منحنی‌های تجربی

براساس مطالعات انجام گرفته بر روی طبیعت صاعقه و مدل‌های آزمایشگاهی، منحنی‌های تجربی برای تعیین تعداد، مکان و ارتفاع سیم‌های گارد و میله‌های حفاظ تهیه شده است. این منحنی‌ها به ازای نرخهای خطای سیستم حفاظت از صاعقه برابر با ۰/۱، ۱ درصد خطا موجود می‌باشند. شکل‌های (الف-۱) تا (الف-۱۸) پیوست (۳-۱)، این قبیل منحنی‌ها را به ازای آرایشهای مختلفی از سیم‌های گارد و میله‌های حفاظت از صاعقه، برای نرخ خطای سیستم حفاظ ۰/۱ و ۱ درصد خطا ارائه می‌نمایند که عموماً در طراحی‌ها از نرخ خطای ۰/۱ درصد استفاده می‌گردد [۱].

۳-۲-۱- طراحی سیستم حفاظت از صاعقه با استفاده از منحنی‌های تجربی

طراحی سیستم حفاظت از صاعقه با انتخاب آرایشی از میله‌های حفاظ و سیم‌های گارد در مجاورت تجهیزات و بررسی ناحیه حفاظتی فراهم شده بوسیله آنها صورت می‌گیرد.

پس از آنکه طراح یک آرایش خاص از سیم‌ها و میله‌های حفاظتی را انتخاب نمود از طریق منحنی‌هایی که در شکل‌های (الف-۱) تا (الف-۱۸) پیوست (۳-۱) ارائه شده‌اند، می‌تواند وضعیت نواحی حفاظتی فراهم شده بوسیله این آرایش خاص را مورد بررسی قرار

دهد و چنانچه مشخص شود که تجهیز فاقد حفاظت مناسب است، با تغییر آرایش سیم‌ها و میله‌های حفاظتی (که می‌تواند به صورت تغییر مکان، ارتفاع و یا تغییر تعداد آنها باشد) این مشکل را برطرف نماید.

جهت استفاده از این منحنی‌ها باید به نکات زیر توجه شود:

- در سیستم حفاظت از صاعقه پستهای فشار قوی بهتر است که از نرخ خطای $0/1$ درصد استفاده شود.

- آرایش سیم‌های گارد یا میله‌های حفاظتی نسبت به تجهیز و یا تجهیزات تحت حفاظتشان در گوشه سمت راست منحنی‌ها نشان داده شده است. در کلیه این شکلها حروف نشان داده شده در آرایش‌های مختلف دارای مفاهیمی به شرح ذیل هستند:

h : ارتفاع سیم گارد یا میله حفاظتی

d : ارتفاع تجهیز و یا تجهیزات تحت حفاظت

y : اختلاف ارتفاع بین بلندترین و دورترین نقطه تجهیز با ارتفاع میله و یا سیم گارد

x : فاصله افقی بین بلندترین و دورترین نقطه تجهیز تا میله حفاظتی و یا فاصله هادی بیرونی تا سیم گارد

s : فاصله افقی مابین دو میله حفاظتی که حفاظت لازم را برای تجهیز مابین خود فراهم می‌آورند (در حالتی که نواحی حفاظتی هیچ کدام از میله‌ها ناحیه حفاظتی میله دیگر را پوشش نمی‌دهد) و یا فاصله افقی مابین دو سیم حفاظتی در حالتی که از دو سیم گارد جهت حفاظت هادیهای شینه استفاده می‌گردد.

s' : فاصله افقی مابین دو میله حفاظتی که حفاظت لازم را برای تجهیز مابین خود فراهم می‌آورند (در حالتی که نواحی حفاظتی هر کدام از میله‌ها، ناحیه حفاظتی میله دیگر را پوشش می‌دهد). در این حالت s' نصف مقدار s خواهد بود.

شکل‌های (الف-۱۳) تا (الف-۱۸) از نسبت‌های d/h ، x/h و s/h استفاده می‌نمایند در حالیکه شکل‌های (الف-۱) تا (الف-۱۲) از کمیات، s ، h ، x ، d و یا s' بهره گرفته‌اند. توجه کنید که این شکلها براساس dهای مختلف از طریق شکل‌های (الف-۱۳) تا (الف-۱۸) استخراج شده‌اند.

در هنگام استفاده از منحنی‌های شکل‌های (الف-۱) تا (الف-۱۸) باید از برون‌یابی بین منحنی‌ها، خارج از محدوده رسم شده خودداری نمود چرا که این کار می‌تواند منجر به نرخ خطاهایی متفاوت از مقادیر نشان داده شده گردد.

برای آشنایی با نحوه استفاده از این منحنی‌ها فرض کنید به عنوان مثال مطابق آرایش شکل (الف-۱۳) برای حفاظت یک تجهیز به ارتفاع ۷ متر از یک میله حفاظتی به ارتفاع ۱۰ متر استفاده شده است. هدف یافتن فاصله بیرونی‌ترین نقطه تجهیز تا میله

حفاظتی است به گونه‌ای که تجهیز تحت حفاظت قرار گیرد. از شکل (الف-۱۳) به ازای نسبت $\frac{d}{h} = \frac{7}{10} = 0.7$

و از منحنی مربوط به $0/1$ درصد خطا مقدار نسبت $\frac{x}{h}$ برابر $0/3$ بدست می‌آید که براحتی می‌توان فاصله بیرونی‌ترین نقطه تجهیز از

میله حفاظتی (x در شکل الف-۱۳) را به صورت زیر بدست آورد :

$$\frac{x}{h} = 0.3 \quad \text{P} \quad x = h \times 0.3 = 10 \times (0.3) = 3\text{m}$$

حال نتیجه فوق را به طریق مشابهی از شکل (الف-۱) نیز می‌توان بدست آورد. از آنجا که مقادیر d و h مشخص هستند، از

شکل (الف-۱) خواهیم داشت:

$$y = h - d = 10 - 7 = 3\text{m}$$

از درونیایی بین منحنی‌های $d=6.1m$ و $d=9.1m$ مقدار x از شکل (الف-۱) برابر ۳ متر بدست می‌آید. نکته‌ای که باید به آن توجه نمود این است که استفاده از منحنی‌های (الف-۱) تا (الف-۱۲) منحصر به مقادیری از d می‌باشد که در این شکلها نشان داده شده است ولی منحنی‌های (الف-۱۳) تا (الف-۱۸) به علت استفاده از نسبتهای s/h ، d/h و s/h محدودیت فوق را دارا نبوده و لذا هنگامی که مقادیر d در شکلهای (الف-۱) تا (الف-۱۲) موجود نباشد باید از شکلهای (الف-۱۳) تا (الف-۱۸) استفاده نمود.

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم حفاظت از صاعقه پست، می‌توان رویه زیر را دنبال نمود:
الف) ابتدا باید چگالی برخورد صاعقه در محل پست (N_g) را با استفاده از روابط (۲-۱۲) یا (۲-۱۴) استخراج نمود.

سپس

ب) تعداد صاعقه‌های برخوردی به سطح پست، N_s را با استفاده از رابطه زیر تعیین کرد:

$$N_s = N_g \times A / (1000)^2 \quad (۱-۳)$$

که در آن :

N_g : چگالی صاعقه‌های برخوردکننده به زمین برحسب تعداد ضربات بر هر کیلومتر مربع در هر سال

A : مساحت پست برحسب مترمربع می‌باشد.

پ) تعداد ضربات صاعقه‌ای که در هر سال از سیستم حفاظت از صاعقه عبور می‌نماید (S_p) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S_p = N_s \times SFR = N_s \times \text{نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه} \quad (۲-۳)$$

SFR معمولاً برابر با ۰/۱ درصد انتخاب می‌گردد.

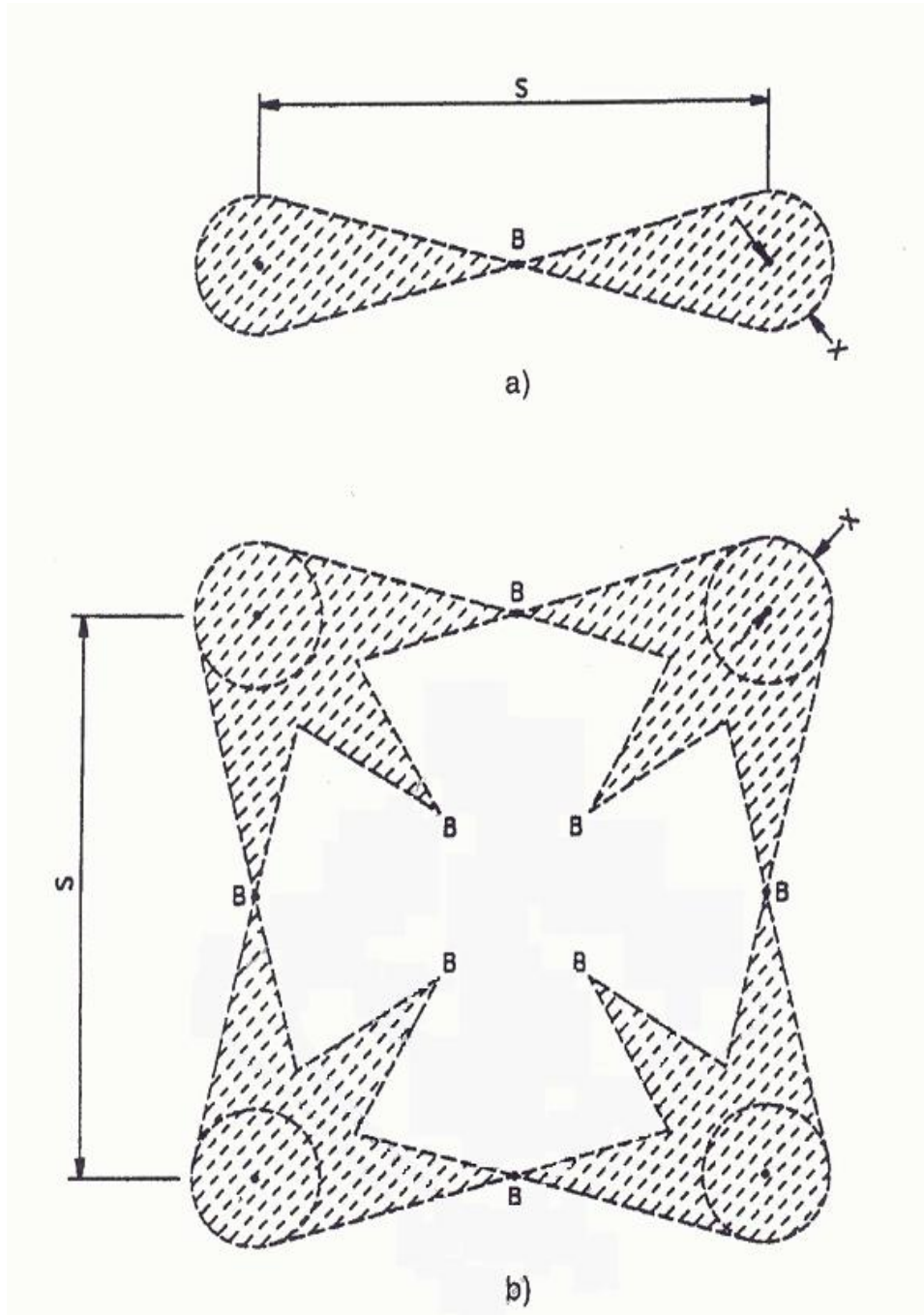
۳-۲-۲- سطوح حفاظتی فراهم شده توسط میله‌های حفاظ در روش منحنی‌های تجربی

شکلهای (۱-۳) و (۲-۳) سطوحی حفاظتی که بوسیله دو یا تعداد بیشتری از میله‌های حفاظتی فراهم می‌شود را نشان می‌دهند [۱۱]. اگر دو میله حفاظتی جهت حفاظت یک تجهیز مورد استفاده قرار گیرند، اطلاعات استخراج شده از منحنی‌های تجربی، تنها اطلاعات مربوط به حفاظت فراهم شده برای نقطه میانی بین دو میله حفاظ و نیم دایره‌هایی به شعاع x که در اطراف میله‌های حفاظتی کشیده شده‌اند را ارائه می‌نمایند. این مطلب در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. سطوح نشان داده شده در شکل (۳-۱) که با کشیدن نیم دایره‌هایی به شعاع x به مرکزیت میله‌های حفاظ و اتصال آنها به نقطه B حاصل شده‌اند نشان‌دهنده ناحیه حفاظتی به ازای نرخ خطای انتخاب شده می‌باشد. برای مقادیر مشخصی از d و y ، مقدار s از شکل (الف-۵) و مقدار x از شکل (الف-۳) می‌تواند به ازای نرخ نفوذ صاعقه ۰/۱ درصد استخراج گردد. هر نقطه داخل سطح هاشور خورده باید دارای نرخ خطای کوچکتر از ۰/۱ درصد باشد. نقاط خارج از سطح هاشور خورده دارای نرخ خطای بزرگتر از ۰/۱ درصد هستند. شکل (۳-۱) سطوح حفاظتی را برای چهار میله حفاظ که به فاصله s از هم قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد.

سطح حفاظت شده را می‌توان بوسیله نزدیک نمودن میله‌های حفاظ به یکدیگر بهبود بخشید. این مطلب در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. در شکل (۳-۲)، سطوح حفاظتی فراهم شده در مقایسه با شکل (۳-۱) بهبود یافته‌اند. در شکل (۳-۲)، فاصله S' نصف فاصله S در شکل (۳-۱) می‌باشد. برای محاسبه پهنای هم‌پوشانی، x' ، دو راه وجود دارد. راه اول اینکه مقدار y مرتبط با دو برابر فاصله بین میله‌ها از هم ($S=2S'$) از شکل (الف-۵) استخراج گردد. در روش دوم می‌توان از شکل (الف-۷) مستقیماً با استفاده از

S' این مقدار y را بدست آورد. پس از یافتن مقدار y ، از روی شکل (الف-۳)، مقدار x که معادل با پهنای هم پوشانی x' در شکل (۳-۳) می باشد بدست خواهد آمد.

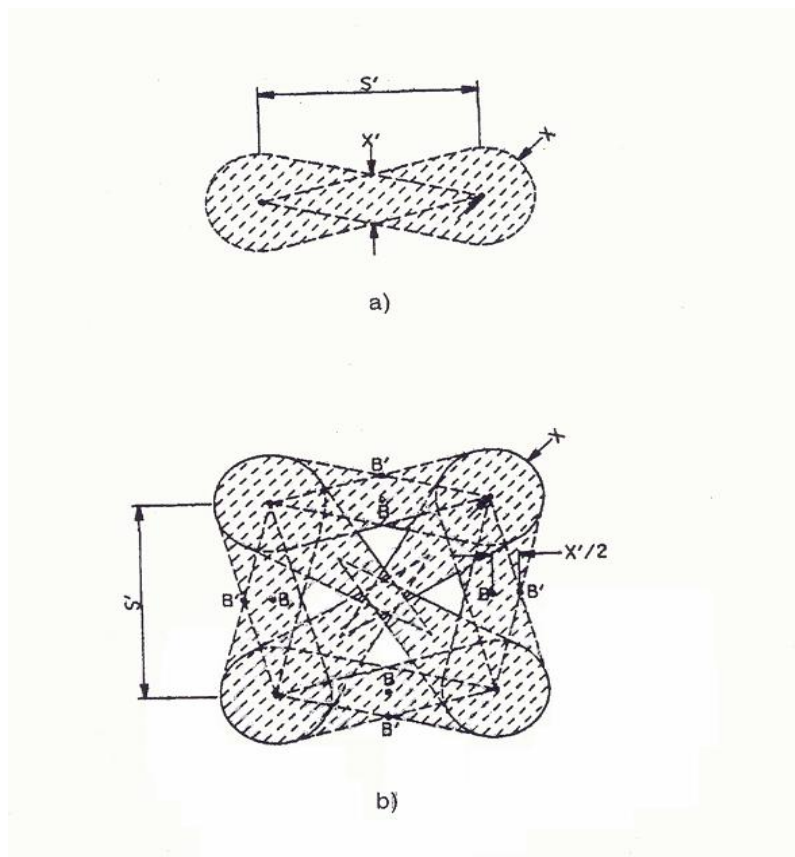
همانطور که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است، اندازه سطوح با نرخ خطای بزرگتر از ۰/۱ درصد بطور قابل ملاحظه ای کاهش یافته اند.



(b) توسط چهار میله حفاظ در روش منحنی های تجربی

(a) توسط دو میله حفاظ

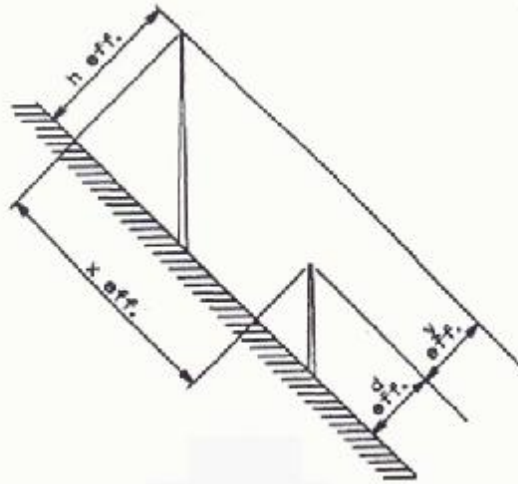
شکل ۳-۱: سطوح حفاظتی فراهم شده در روش منحنی های تجربی:



شکل ۳-۲: سطوح حفاظتی فراهم شده با استفاده از: (a) دو میله حفاظ (b) چهار میله حفاظ با میزان فاصله بین میله‌ها برابر با نصف فاصله S شکل ۳-۱، $(S'=0.5S)$ در روش منحنی‌های تجربی

۳-۲-۳- اثر شیب‌دار بودن زمین

هنگام استفاده از منحنی‌های تجربی جهت سطوح شیب‌دار، پارامترهای h (ارتفاع سیم‌گارد یا میله حفاظ) و d (ارتفاع تجهیز مورد حفاظت قرار گرفته) باید مطابق شکل (۳-۳) براساس خط عمودی که از سرسیم‌های گارد یا میله‌های حفاظتی تا زمین رسم شده‌اند، استخراج گردند. باید توجه نمود آنچه که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است، ناحیه حفاظت شده توسط میله‌های حفاظتی نمی‌باشد و تنها جهت مشخص شدن پارامترها و مقادیر آورده شده است و ناحیه حفاظت شده توسط این میله حفاظتی به صورت نامحدود نخواهد بود.



شکل ۳-۳: اثر شیب زمین بر روی ارتفاع‌های موثر تجهیزات و استراکچرهای حفاظت‌کننده

۳-۳- روش مدل الکتروهندسی

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره گردید روش مدل الکتروهندسی یکی از روش‌های پیشرفته‌ای است که امروزه به طور وسیعی در طراحی سیستم‌های حفاظت از صاعقه پست‌های فشار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این قسمت نحوه به کارگیری این روش بررسی می‌شود.

۳-۳-۱- اصول طراحی سیستم حفاظت از صاعقه با استفاده از روش مدل الکتروهندسی

- جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه با استفاده از روش مدل الکتروهندسی، موارد زیر را به کار می‌بندیم.
- ولتاژ یا ولتاژهای نامی و سطح یا سطوح ایزولاسیون پست را مشخص می‌نماییم. سطوح استقامت عایقی برای سطوح ولتاژی پست‌های ایران در جدول (۱-۳) ارائه شده‌اند.
 - برای هر سطح ولتاژ با توجه به آرایش شینه‌های پست، امپدانس موجی مرتفع‌ترین شینه‌های آن سطح ولتاژ با استفاده از روابط (۱۶-۲) تا (۱۹-۲) تعیین می‌گردد.
 - با توجه به سطح یا سطوح ایزولاسیون پست و با استفاده از رابطه (۲۰-۲) میزان جریان بحرانی هر سطح ولتاژ پست مشخص می‌شود.
 - در صورتی که حفاظت کامل مدنظر باشد، جریان یا جریان‌های بحرانی بدست آمده فوق به عنوان جریان طراحی انتخاب شده و با استفاده از آنها فواصل برخورد محاسبه می‌شوند و نواحی حفاظتی رسم می‌گردند. در این حالت میزان SFFOR سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده تقریباً صفر خواهد بود.

- در صورتی که به علت مسائل اقتصادی لازم باشد از جریان طراحی بزرگتر از جریان بحرانی استفاده نماییم، از جریان یا جریانهای بحرانی بدست آمده فوق، دامنه جریان طراحی مطلوب را با استفاده از سطح ایزوکرونیک در محل پست و با استفاده از معادلات (۲-۱۲) و (۲-۲۲) بدست می‌آوریم. سپس با استفاده از این جریان طراحی فواصل برخورد را بدست آورده و از طریق آنها نواحی حفاظتی را رسم و حفاظت فراهم شده برای تجهیزات را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این حالت میزان SFFOR سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده در حدود ۰/۰۵ قوس در هر صد کیلومتر در سال می‌باشد. چنانچه از جریانهای طراحی بزرگتر یا کوچکتر از مقدار بدست آمده در این قسمت استفاده نماییم میزان SFFOR حاصل به ترتیب بزرگتر و کوچکتر از مقدار ۰/۰۵ خواهد بود.

جدول ۳-۱: سطوح استقامت عایقی برای سطوح ولتاژی پستهای ایران

ولتاژ نامی سیستم بر حسب کیلوولت	سطح استقامت عایقی تجهیزات در مقابل موج ضربه صاعقه (LIWL) بر حسب کیلوولت
۶۳-۶۶	۳۲۵
۱۳۲	۴۵۰-۵۵۰-۶۵۰
۲۳۰	۶۵۰-۷۵۰-۸۵۰-۹۵۰-۱۰۵۰
۴۰۰	۱۰۵۰-۱۱۷۵-۱۳۰۰-۱۴۲۵

۳-۳-۲- معادلات فواصل برخورد

برای خطوط انتقال، اختلاف ارتفاع سیم‌های گارد و هادی‌های فاز چندان متفاوت نیستند، به نحوی که فاصله برخورد به سیم گارد و به سیم‌های فاز یکسان فرض می‌شود. در پستهای فشار قوی، ارتفاع تجهیزاتی که قرار است محافظت شود ممکن است دارای ارتفاعی نزدیک به سطح زمین و یا نزدیک به سیم گارد باشد، و در نتیجه فاصله برخورد در مورد جسم حفاظت شده می‌تواند برابر با فاصله برخورد تا زمین برای اشیاء کم‌ارتفاع و برابر فاصله برخورد تا سیم‌های گارد و میله‌های حفاظ برای اشیاء با ارتفاع تقریبی نزدیک به ارتفاع آنها باشد.

در این حالت سه فاصله برخورد باید در نظر گرفته شود:

- فاصله برخورد به سیم گارد یا میله حفاظ، r_s

- فاصله برخورد به تجهیز تحت حفاظت، r_c

- فاصله برخورد به زمین، r_g

r_s و r_c توسط رابطه زیر با فاصله برخورد r_g ارتباط پیدا می‌کنند:

$$r_s = \lambda_s \cdot r_g \quad (۳-۳)$$

$$r_c = \lambda_c \cdot r_g \quad (۴-۳)$$

که در آن λ_s و λ_c ضرایب مشخصی هستند.

معادلات فواصل برخوردی که در مراجع مختلف جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست ارائه گردیده‌اند، عبارتند از:

- معادلات Young [۲]

$$\begin{cases} r_g = 27(I^{0.32}) \\ \lambda_s = \frac{444}{462 - h} \\ \lambda_c = \frac{444}{462 - y} \end{cases} \quad (۵-۳)$$

در روابط فوق، h ارتفاع سیم گارد یا میله حفاظتی و y ارتفاع تجهیز تحت حفاظت هر دو برحسب متر و I جریان طراحی صاعقه برحسب کیلوآمپر می‌باشد.

در رابطه (۵-۳) برای $h < 18m$ مقدار $\lambda_s = 1$ برای $y < 18$ نیز مقدار $\lambda_c = 1$ خواهد بود.

- معادلات Love [۲]

$$\begin{cases} r_g = 10(I^{0.65}) \\ \lambda_s = \lambda_c = 1 \end{cases} \quad (۶-۳)$$

- معادلات Brown-Whitehead-CIGRE [۲]

$$\begin{cases} r_g = 6.4(I^{0.75}) \\ \lambda_s = 1 + \frac{h-18}{108} \\ \lambda_c = 1 + \frac{y-18}{108} \end{cases} \quad (۷-۳)$$

در رابطه فوق برای $h < 18m$ مقدار $\lambda_s = 1$ و برای $y < 18m$ نیز مقدار $\lambda_c = 1$ خواهد بود.

- معادلات کمیته انتقال و توزیع IEEE [۲]

$$\begin{cases} r_g = 9(I^{0.65}) \\ \lambda_s = \frac{1}{0.36 + 0.17 \ln(43 - h)} \\ \lambda_c = \frac{1}{0.36 + 0.17 \ln(43 - y)} \end{cases} \quad (۸-۳)$$

در رابطه (۸-۳) برای $h < 30m$ مقدار h برابر ۳۰ متر انتخاب می‌گردد و برای $y < 30m$ نیز مقدار y برابر ۳۰ متر انتخاب می‌شود.

- معادلات کمیته پست IEEE [۲]

$$\begin{cases} r_g = 8(I^{0.65}) \\ \lambda_s = \lambda_c = 1 \end{cases} \quad (۹-۳)$$

استفاده از معادلات (۵-۳)، (۷-۳) و (۸-۳) با مشکلات خاصی از جمله نیاز به استفاده از روشهای تکراری در هنگام طراحی سیستم حفاظت از صاعقه، همراه است (به علت ارتباط λ_c و λ_s با h و y که عموماً مجهولات مسئله هستند)، لذا جهت مقاصد طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست می‌توان از معادلات (۶-۳) یا (۹-۳) به راحتی استفاده نمود بدون اینکه با مشکلات فوق روبرو شویم. در این میان رابطه (۹-۳) که از سوی کمیته پست IEEE ارائه شده است دارای دقت بالاتری بوده و اغلب از این رابطه جهت طراحی

سیستم حفاظت از صاعقه پست استفاده می‌گردد. لذا جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پستها پیشنهاد می‌گردد که از این رابطه استفاده شود.

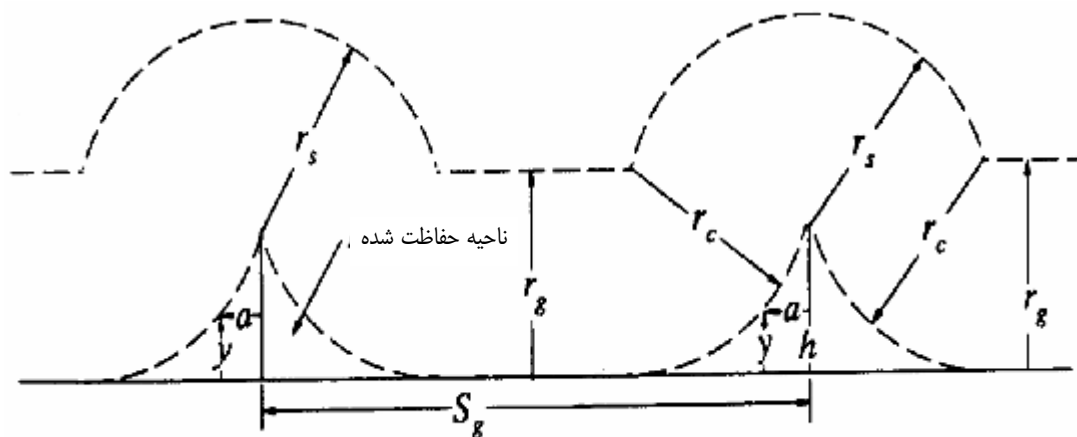
۳-۳-۳- شیوه استفاده از فواصل برخورد جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست

در این قسمت نحوه به کار بردن فواصل برخورد جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه برای حالت‌های مختلف تشریح می‌گردد.

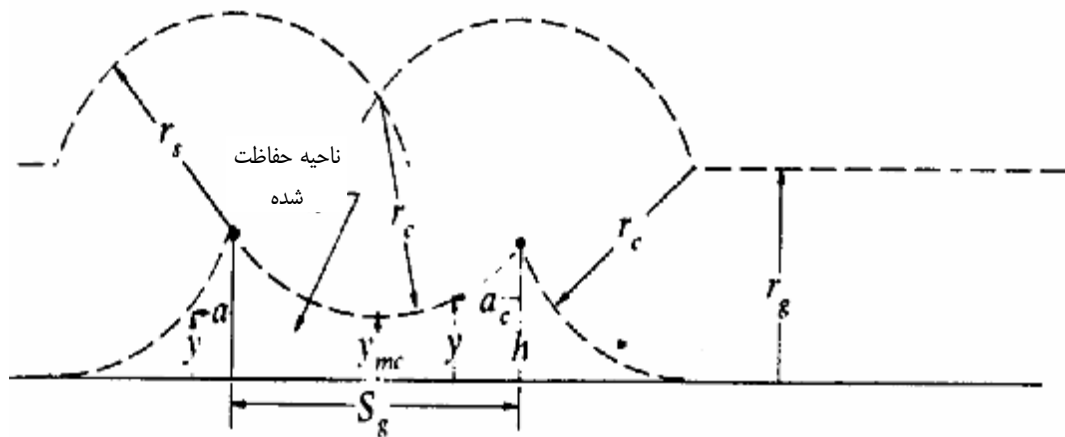
۳-۳-۳-۱- حفاظت با استفاده از سیم‌های گارد

ناحیه حفاظتی فراهم شده بوسیله دو سیم گارد در شکل‌های (۳-۴) و (۳-۵) نشان داده شده‌اند. شکل (۳-۴) وضعیتی را نشان می‌دهد که در آن سیم‌های گارد نسبت به هم فاصله نسبتاً زیادی دارند. برای ایجاد این نواحی، کمانی به شعاع r_s و به مرکز سیم گارد کشیده می‌شود تا با خط فاصله برخورد به زمین، r_g ، متقاطع شود. سپس به مرکزیت این تقاطع کمان دیگری به شعاع r_c از سر سیم گارد رسم می‌شود تا با زمین تماس پیدا کند. نواحی بدست آمده، نواحی حفاظتی می‌باشند و هر جسمی که در زیر این کمانها قرار گیرد حفاظت می‌شود. مقدار a که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$a = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (۳-۱۰)$$

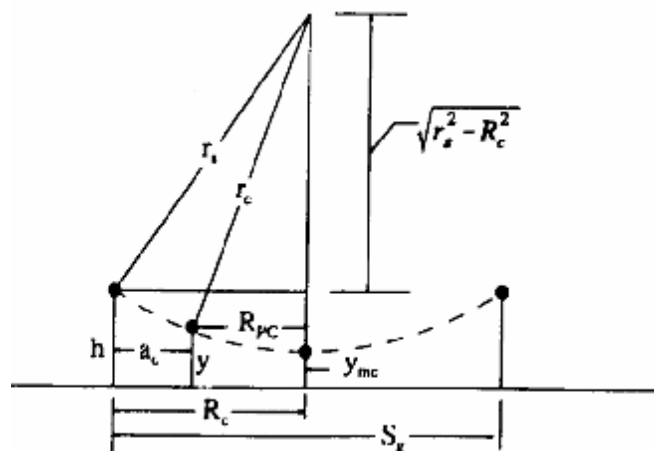


شکل ۳-۴: ناحیه حفاظتی فراهم شده بوسیله دو سیم گارد دور از هم



شکل ۳-۵: ناحیه حفاظتی بهبود یافته بوسیله کاهش فاصله بین سیم‌های گارد

چنانچه سیم‌های گارد مطابق شکل (۳-۵) به یکدیگر نزدیک شوند، دو کمانی که به مرکز سیم‌های گارد رسم شده‌اند در محلی بالاتر از خط افقی فاصله برخورد به زمین، x_g ، به هم می‌رسند. بنابراین اگر یک صاعقه یا شاخه پیشرو صاعقه به ناحیه واقع بین سیم‌های گارد وارد شود و با کمانهای رسم شده از محل سیم‌های گارد برخورد کند، پیش از اصابت به زمین با سیم‌های گارد برخورد خواهد نمود. به بیان دیگر تمام صاعقه‌ها به سیم‌های گارد منتهی خواهند شد و هیچکدام به زمین نمی‌رسند. در این وضعیت ناحیه حفاظتی جدید بوسیله کمانی که به شعاع r_c و به مرکزیت تقاطع کمانها که از دو سر سیم‌های گارد می‌گذرد رسم شده است، حاصل می‌گردد. این ناحیه در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: ناحیه حفاظتی ایجاد شده بین سیم‌های حفاظ در حالتی که فاصله بین سیم‌های حفاظ کاهش یافته است.

بهبود ناحیه حفاظتی با مشاهده شکل (۳-۶) به خوبی مشهود است. این ناحیه حفاظتی بین سیم‌های گارد را می‌توان توسط فواصل a_c یا R_{PC} همانطور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده است، توصیف نمود.

$$\begin{cases} R_{PC} = \sqrt{r_c^2 - (h - y + \sqrt{r_s^2 - R_c^2})^2} \\ a_c = R_c - R_{PC} \end{cases} \quad (۳-۱۱)$$

که در آن R_C نصف فاصله افقی بین سیم‌های گارد است.

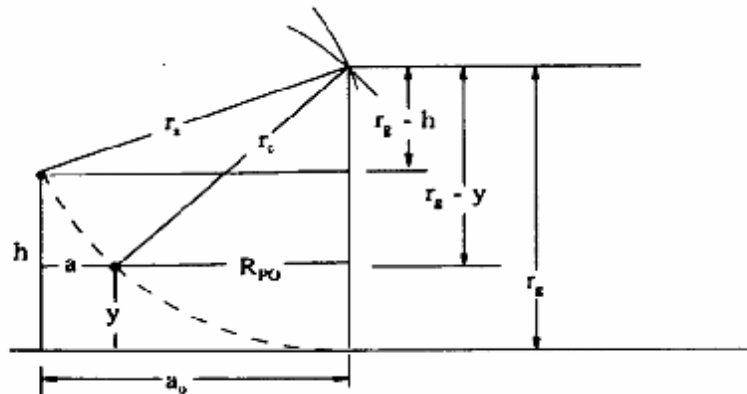
کمترین ارتفاع حفاظتی y_{mc} ، همانطور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده است، در نصف فاصله بین دو سیم گارد اتفاق می‌افتد و آن را می‌توان با صفر قراردادن R_{PC} در معادله (۳-۱۱) و یا مستقیماً از روی شکل (۳-۶) بدست آورد.

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} \quad (۳-۱۲)$$

ناحیه حفاظتی فراهم شده در خارج از سیم‌های گارد را می‌توان توسط معادله (۳-۱۰) بدست آورد. جهت تمایز بین این ناحیه و ناحیه بین سیم‌های گارد، این ناحیه بوسیله a_0 و R_{PO} مشخص می‌گردد. این پارامترها در شکل (۳-۷) نشان داده شده‌اند.

$$\begin{cases} R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \\ a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \\ a = a_0 - R_{PO} \end{cases} \quad (۳-۱۳)$$

چون برای $r_c=r_g, y=0$ و $R_{PO}=0$ بنابراین a_0 فاصله a در حالت $y=0$ صفر بوده و ارتفاع حفاظتی در a_0 صفر می‌باشد.

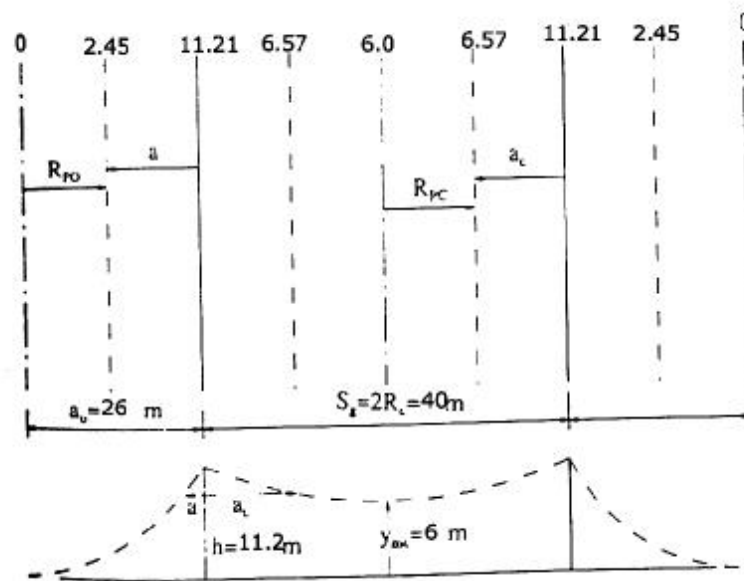


شکل ۳-۷: ناحیه حفاظتی خارج از سیم‌های گارد

از معادله (۳-۱۳) می‌توان جهت تعیین ارتفاع لازم سیم‌های گارد به ازای یک مقدار مشخص از y_{mc} استفاده نمود. به عنوان مثال فرض کنید که ارتفاع تجهیز y ، برابر ۵ متر بوده و این تجهیز بین دو سیم گارد قرار گرفته باشد که از یکدیگر ۴۰ متر فاصله دارند. در نتیجه، در این حالت R_c برابر ۲۰ متر و y_{mc} برابر ۵ متر خواهد بود. چنانچه از جریان طراحی برابر با ۱۰ کیلوآمپر استفاده شود، از معادله (۳-۹)، طول کلیه فواصل برخورد برابر با $۳۵/۷۳$ متر خواهد بود. حال با استفاده از رابطه (۳-۱۲)، ارتفاع سیم‌های گاردی که

تجهیز در حد فاصل ما بین آنها قرار گرفته است (h) برابر با ۱۱/۲۱ متر بدست می‌آید. شکل (۸-۳) نواحی حفاظتی فراهم شده برای مثال فوق را نشان می‌دهد.

چنانچه بیش از دو سیم گارد در سیستم حفاظت از صاعقه استفاده گردد، نواحی حفاظتی را می‌توان با استفاده از معادلات بالا برای دو سیم گارد مجاور هم مشخص نمود. ناحیه حفاظتی برای یک سیم گارد را می‌توان توسط معادله (۱۳-۳) توصیف نمود.



شکل ۸-۳: پروفیل نواحی حفاظتی فراهم شده برای مثال دو سیم گارد

۳-۳-۲- حفاظت با استفاده از میله‌های حفاظ

- یک میله حفاظ

ناحیه حفاظتی فراهم شده بوسیله یک میله حفاظ را می‌توان با استفاده از معادلات زیر مشابه روابط ارائه شده برای یک سیم

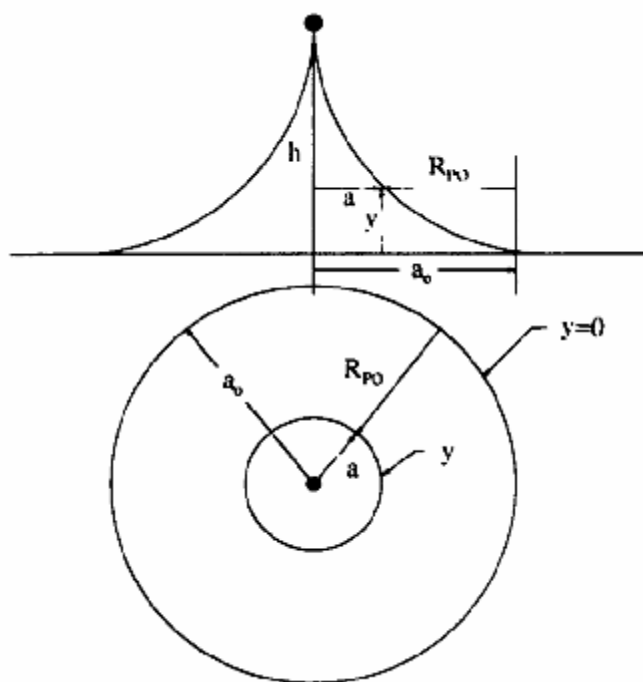
گارد، مشخص نمود.

$$\begin{cases} a = a_0 - R_{p0} \\ a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \\ R_{p0} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \end{cases} \quad (14-3)$$

با این وجود، در این حالت مقادیر a و a_0 شعاعهای دایره نشان داده شده در ناحیه حفاظتی شکل

(۹-۳) خواهند بود. همچنانکه از شکل (۹-۳) نیز مشاهده می‌گردد، a_0 شعاع دایره نشان‌دهنده ارتفاع حفاظتی $y=0$ می‌باشد. با

استفاده از معادلات فوق می‌توان ارتفاع میله حفاظتی را برای هر مکان و ارتفاعی از تجهیز بدست آورد.



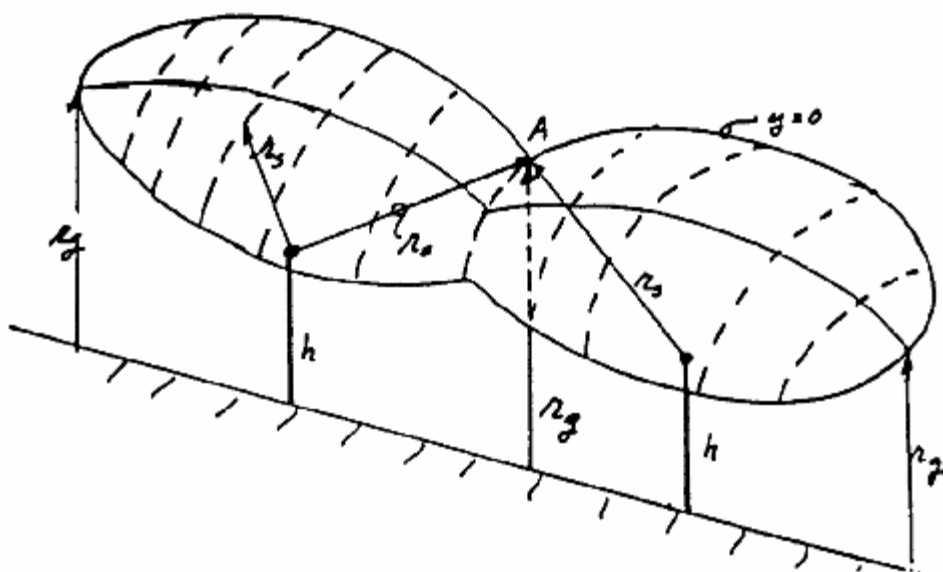
شکل ۳-۹: ناحیه حفاظتی فراهم شده توسط یک میله حفاظ

- دو میله حفاظ

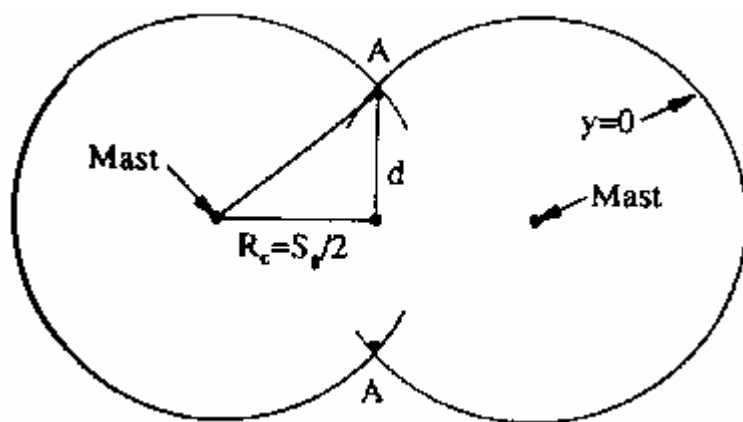
مشکل اصلی در بررسی دو یا تعداد بیشتری از میله، مسئله ترسیمات سه بعدی آنها می باشد. بنابراین رسم مناسب این شکل سه بعدی دارای اهمیت خواهد بود. شکل (۳-۱۰) را در نظر بگیرید. در این شکل قسمتی از فضا که توسط شعاع r_s از بالای میله‌های حفاظت از صاعقه جدا شده نشان داده شده است. این نواحی بخشهایی از یک کره هستند که توسط فاصله برخورد تا زمین برش داده شده‌اند. چنانچه دو میله حفاظ به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک باشند دو کره یکدیگر را قطع می‌نمایند.

تقاطع بحرانی A در شکل (۳-۱۰) را می‌توان به صورت وضعیتی نشان داد که در آن ارتفاع حفاظتی صفر است.

شکل (۳-۱۱)، یک نما از این وضعیت را نشان می‌دهند که دو دایره با شعاع a_0 در بین دو میله حفاظتی همدیگر را قطع کرده‌اند.

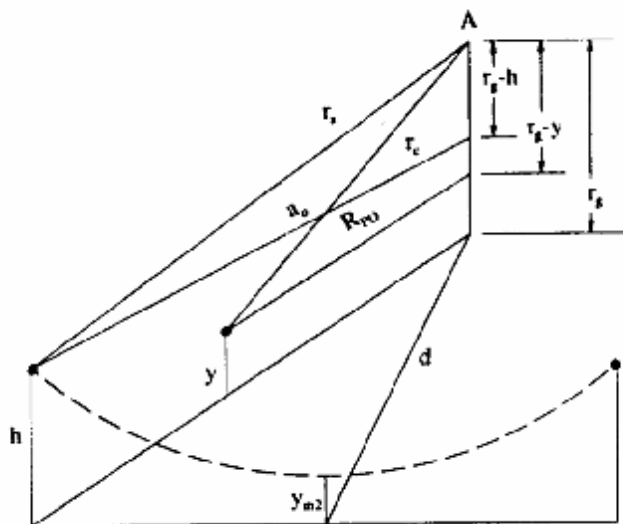


شکل ۳-۱۰: منظره سه بعدی از ناحیه فوقانی دو میله حفاظ



شکل ۳-۱۱: منظره پلان شکل (۳-۱۰)

شکل (۳-۱۲)، نقطه تقاطع بحرانی A را همراه با فواصل برخورد نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲: فاصله میان دو میله حفاظت از صاعقه

با استفاده از این شکل:

$$a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (۱۵-۳)$$

که شبیه معادله مورد استفاده برای یک میله حفاظتی یا طرف بیرونی سیم‌های گارد می‌باشد. اگر $h > r_g$ باشد، $a_0 = r_s$ فرض می‌شود. همچنین از شکل (۳-۱۱) داریم:

$$d = \sqrt{a_0^2 - R_C^2} \quad (۱۶-۳)$$

که در آن نصف فاصله بین میله‌های حفاظ می‌باشد. با ترکیب دو معادله فوق خواهیم داشت:

$$h = r_g - \sqrt{r_s^2 - R_C^2 - d^2} = r_g - \sqrt{r_s^2 - a_0^2} \quad (۱۷-۳)$$

نکته مهم دیگر، تعیین شعاع حفاظتی R_{P0} می‌باشد. با استفاده از شکل (۳-۱۲) داریم:

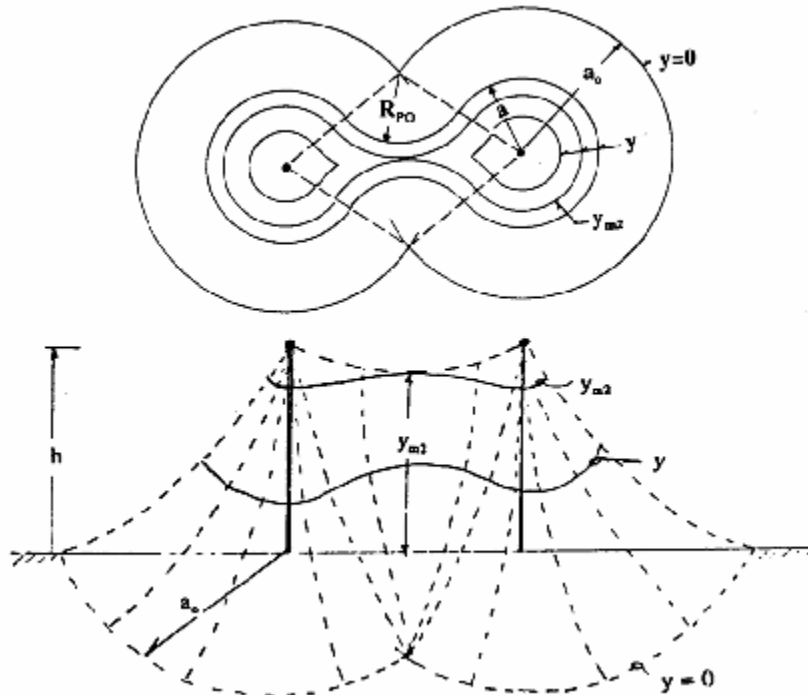
$$R_{P0} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (۱۸-۳)$$

توجه کنید که این کمیت یک کمان به مرکز نقطه A را در شکل (۳-۱۲) به نمایش می‌گذارد. اگر $y > r_g$ باشد آنگاه $R_{P0} = r_c$ فرض می‌شود.

حداقل ارتفاع حفاظتی y_{m2} را که در بین دو میله حفاظت بوجود می‌آید، می‌توان با استفاده از معادله (۳-۱۸) با قرار دادن $R_{P0} = d$ بدست آورد. آنگاه با استفاده از معادله (۳-۱۶) خواهیم داشت:

$$y_{m2} = r_g - \sqrt{r_c^2 - a_0^2 + R_C^2} \quad (۱۹-۳)$$

ناحیه حفاظتی فراهم شده برای دو میله حفاظ در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده است. توجه کنید که ناحیه حفاظتی برای نواحی چپ یا راست میله‌ها، شبیه به حالت یک میله حفاظ منفرد است و فقط شکل ناحیه حفاظتی بین میله‌ها تغییر می‌نماید. ناحیه حفاظتی بوسیله خطوطی با ارتفاع ثابت y توصیف می‌گردد. با توجه به این خطوط حفاظتی با ارتفاع‌های هم‌ارز، هر جسمی که ارتفاع آن کمتر یا مساوی y باشد تحت حفاظت قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۱۳: ناحیه حفاظتی فراهم شده برای دو میله حفاظ

- نواحی حفاظتی توسط دوایر یا کمانهایی از دایره مشخص می‌گردند. نحوه رسم این نواحی به شرح ذیل می‌باشد:
- دوایری با شعاع a_0 به مرکزیت هر کدام از میله‌ها کشیده می‌شود. این دوایر حد ناحیه حفاظتی را نشان می‌دهند و مشخص کننده $y=0$ می‌باشند.
 - با استفاده از محل تقاطع دایره‌ها به عنوان مرکز، قوسهایی با شعاع R_{P0} رسم می‌شود.
 - با استفاده از میله‌های حفاظ به عنوان نقاط مرکزی، کمانها یا بخشهایی از دایره با شعاع a رسم می‌شوند، با توجه به این نکته که :

$$a = a_0 - R_{P0} \quad (۳-۲۰)$$

- تقاطع کمانهای کشیده شده در مراحل ۲ و ۳، ناحیه حفاظتی را برای ارتفاع y نتیجه می‌دهند.
- توجه کنید که برای ارتفاعهای حفاظتی کمتر از y_{m2} خطوط جداکننده ارتفاع حفاظتی ثابت y در اطراف هر یک از میله‌های حفاظ اتفاق می‌افتند.

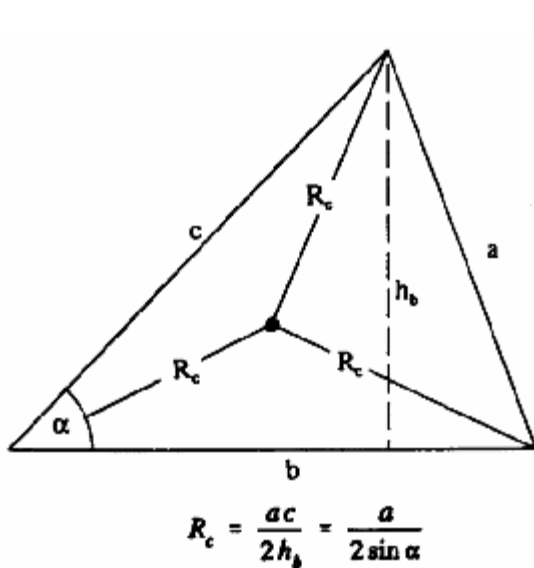
- سه میله حفاظ

در این وضعیت فرض می‌شود که میله‌ها به صورت نشان داده شده در شکل (۳-۱۴) در ارتفاع برابر و در سه رأس یک مثلث نصب شده‌اند. سه فاصله برخورد r_s به مرکزیت سر هر کدام از میله‌های حفاظ در وسط مثلث با هم برخورد می‌کنند، به نحوی که فاصله افقی نسبت به هر میله برابر با R_c می‌شود. با توجه به شکل (۳-۱۵) مقدار R_c از رابطه زیر تعیین می‌شود:

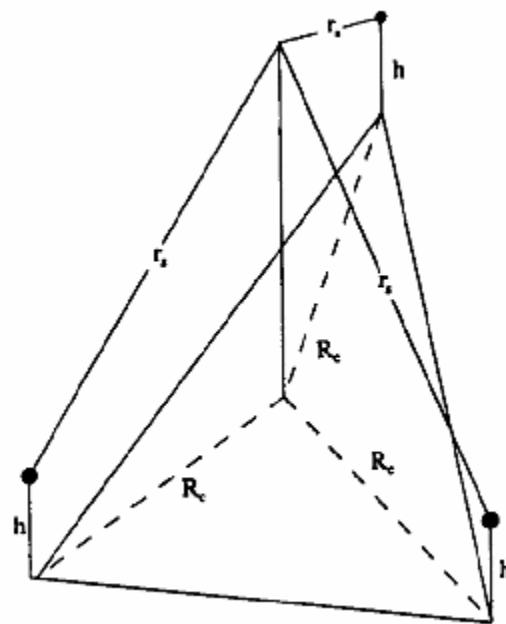
$$R_c = \frac{ac}{2h_b} = \frac{a}{2\sin\alpha} \quad (۳-۲۱)$$

توجه کنید که در شکل (۳-۱۴)، شبیه به حالت حفاظت با استفاده از دو سیم گارد، فاصله برخورد به زمین، r_g ، وارد محاسبات نمی‌شود، چونکه فاصله تقاطع کمانهای رسم شده از سر میله‌های حفاظ در وسط مثلث بزرگتر از r_g می‌باشد. از شکل‌های (۳-۱۶) و (۳-۱۷) داریم:

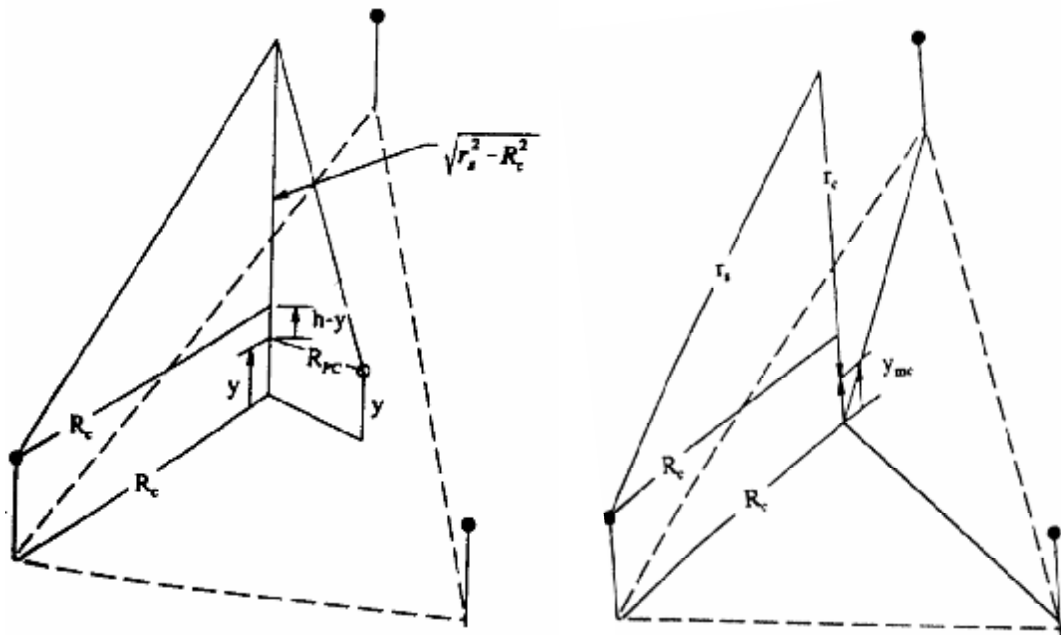
$$\begin{cases} y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} \\ R_{PC} = \sqrt{r_c^2 - (h - y + \sqrt{r_s^2 - R_c^2})^2} \end{cases} \quad (۳-۲۲)$$



شکل ۳-۱۵: نحوه محاسبه R_c



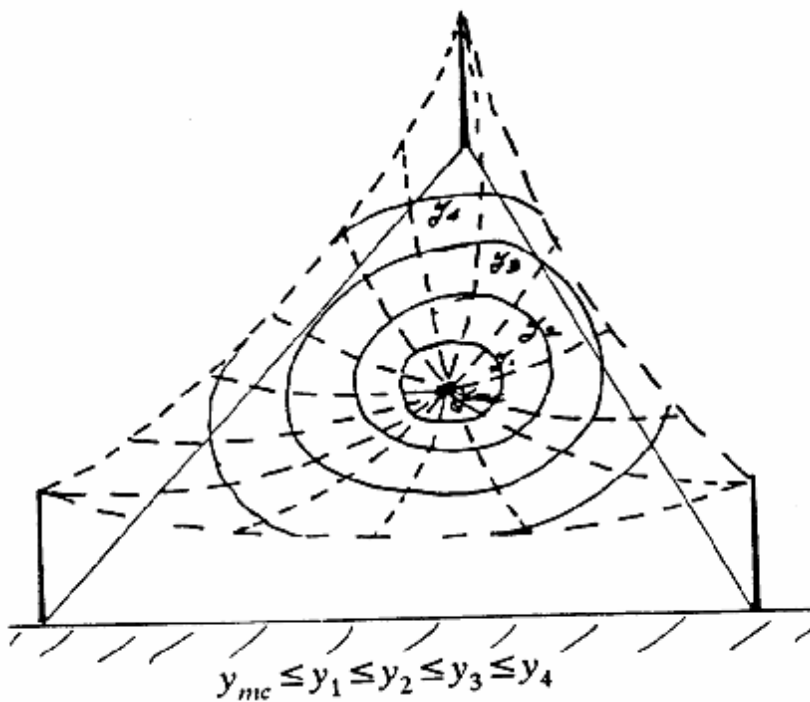
شکل ۳-۱۴: سه میله حفاظت از صاعقه که در سه رأس یک مثلث نصب شده‌اند. R_c فاصله تا نقطه مرکزی تقاطع کمانها می‌باشد.



شکل ۳-۱۷: وضعیت نقطه مرکزی سه میله حفاظ

شکل ۳-۱۶: نحوه پیدا کردن y_{mc}

توجه کنید که R_{PC} شعاع دایره‌ای به مرکز مثلث است که این مرکزیت بوسیله R_c مشخص می‌گردد. شکل (۳-۱۸) تصویر ساده‌ای از ناحیه حفاظت شده در داخل مثلث را نشان می‌دهد.



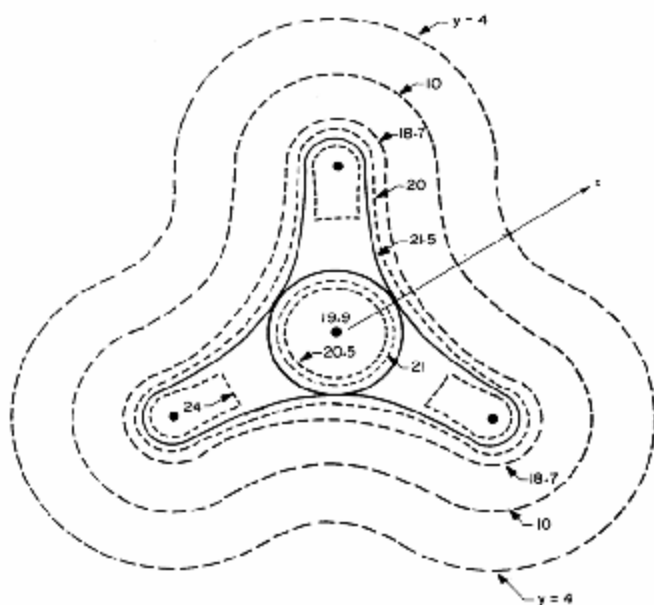
شکل ۳-۱۸: دیاگرام سه بعدی از ناحیه حفاظتی ایجاد شده در داخل سه میله حفاظ

همچنانکه مشهود است کمترین ارتفاع حفاظتی فراهم شده به اندازه y_{mc} در مرکز مثلث قرار دارد که این مرکز توسط R_C مشخص می‌گردد. دواپری که با شعاع R_{PC} از این نقطه کشیده شده‌اند، دارای این ویژگی هستند که $y_2 > y_1 > y_{mc}$ می‌باشد. همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید و براساس شکل (۳-۱۸) نیز می‌توان مشاهده نمود مادامیکه فاصله میله‌های حفاظ از هم خیلی زیاد نباشد اثر T_g در ناحیه داخلی مثلث به چشم نمی‌خورد.

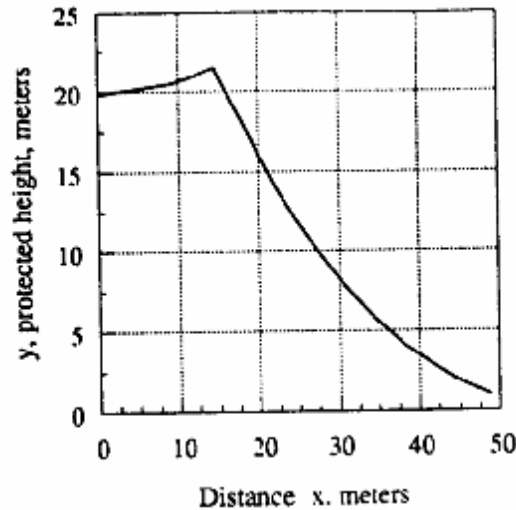
در هنگام رسم نواحی حفاظتی باید توجه نمود که در برخی نواحی، ارتفاعهای حفاظتی ایجاد شده توسط سه میله حفاظ معادل با ارتفاعهای حفاظتی ایجاد شده توسط دو میله حفاظ می‌باشند. به عنوان مثال شکل (۳-۱۹) را در نظر بگیرید. در این شکل نواحی حفاظتی ایجاد شده توسط سه میله حفاظ نوعی نشان داده شده‌اند. در این شکل، نواحی بیرون خط پرننگ نشان دهنده نواحی است که در آن ارتفاع حفاظتی فراهم شده توسط معادلات مربوط به دو میله حفاظ قابل حصول است. چگونگی تغییر ارتفاع حفاظتی با تغییر بردار x که از مرکز سه میله حفاظتی به سمت مرکز و بیرون دو میله حفاظتی مجاور رسم شده است، در شکل (۳-۲۰) نشان داده شده است. ناحیه مرزی که در شکل (۳-۱۹) با خط پرننگ نشان داده شده است را می‌توان توسط دایره‌ای با شعاع R_{PC} و به مرکزیت نقطه مرکزی سه میله حفاظتی مشخص کرد.

با استفاده از شکل (۳-۲۱) و با استفاده از معادله زیر می‌توان شعاع R_{PC} را بدست آورد:

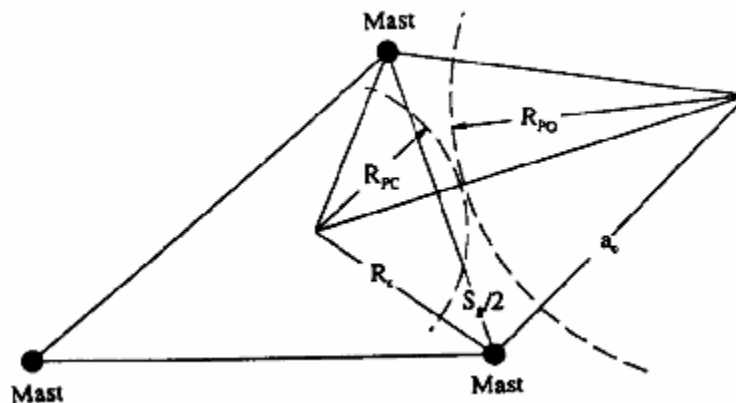
$$R_{PC} + R_{P0} = \sqrt{R_C^2 - \left(\frac{S_g}{2}\right)^2} + \sqrt{a_0^2 - \left(\frac{S_g}{2}\right)^2} \quad (۳-۲۳)$$



شکل ۳-۱۹: ناحیه حفاظتی فراهم شده برای سه میله حفاظ نوعی



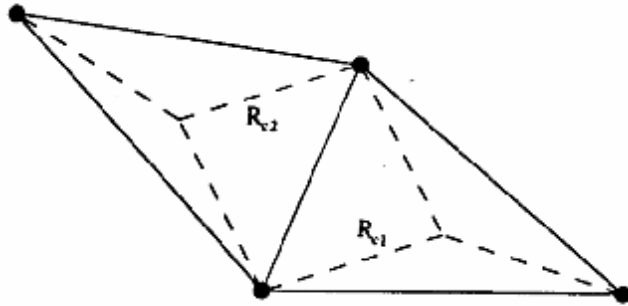
شکل ۳-۲۰: نحوه تغییر ارتفاع حفاظتی شکل (۳-۱۹) به صورت تابعی از بردار x



شکل ۳-۲۱: نحوه پیدا کردن ناحیه مرزی که در آن ارتفاعهای حفاظتی فراهم شده توسط دو میله معادل ارتفاعهای حفاظتی ایجاد شده توسط سه میله هستند

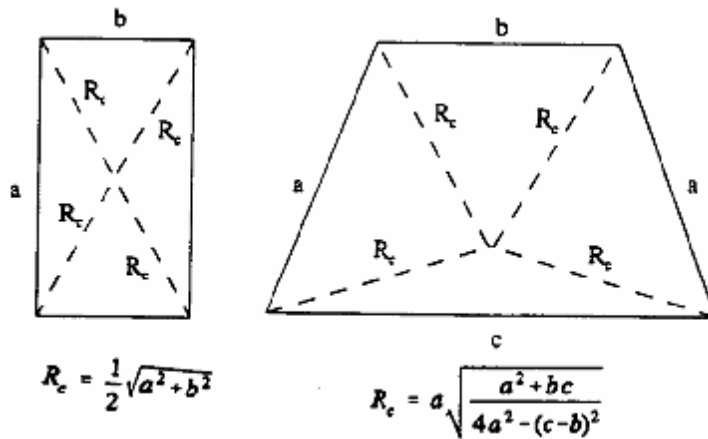
- بیش از سه میله حفاظ

ترکیب مثلی سه میله حفاظ، اصل و پایه استفاده از ترکیبات مختلف دیگر میله‌های حفاظت از صاعقه می‌باشد. اگر بیش از سه میله جهت حفاظت از صاعقه استفاده شود، آنها را می‌توان بصورت یک سری از میله‌های حفاظ سه تایی در نظر گرفت. به عنوان مثال، چهار میله حفاظ نشان داده شده در شکل (۳-۲۲) را در نظر بگیرید. این ترکیب را می‌توان به عنوان دو دسته سه تایی از میله‌های حفاظ در نظر گرفت که هر کدام از آنها دارای R_c مخصوص به خود می‌باشند. (R_{c1} و R_{c2}).

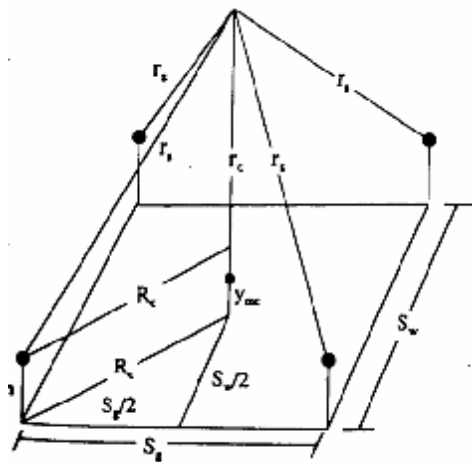


شکل ۳-۲۲: چهار میله حفاظ که می‌توان آنها را به حالت‌های سه میله حفاظ تفکیک نمود

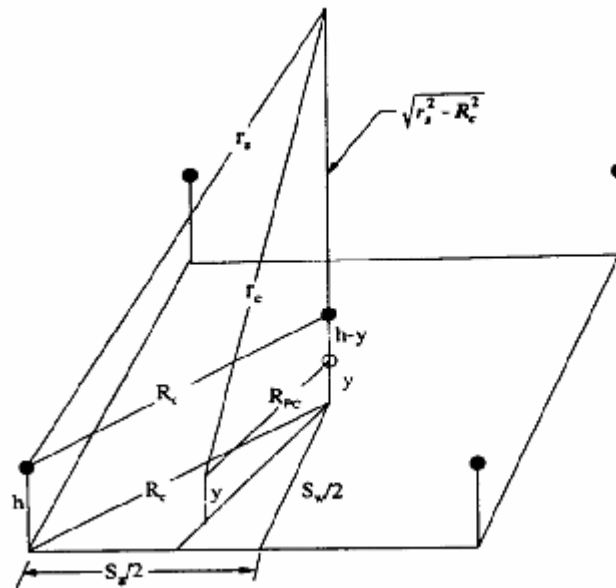
از آنجایی که ترکیبات با چهار میله حفاظ همانند آنهایی که در شکل (۳-۲۳) نشان داده شده‌اند به وفور اتفاق می‌افتد، ضروری است که آنها را به عنوان حالت‌های خاص در نظر بگیریم. توجه کنید که در این حالات $R_{c1} = R_{c2}$ است به این معنی که تنها یک R_c در این قبیل وضعیت‌ها وجود دارد. حالت چهار میله حفاظ مستطیلی شکل در شکل‌های (۳-۲۴) و (۳-۲۵) نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۳: حالت‌های ویژه‌ای از ترکیبات چهار میله حفاظ



شکل ۳-۲۴: چهار میله حفاظ که y_{mc} را نشان می‌دهند

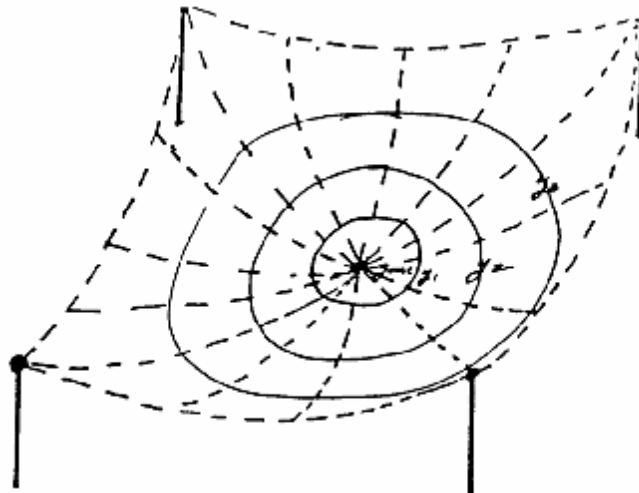


شکل ۳-۲۵: تعیین کردن ناحیه حفاظتی داخل چهار میله حفاظ

برای شکل‌های (۳-۲۴) و (۳-۲۵) می‌توان نشان داد:

$$\begin{cases} y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} \\ R_{PC} = \sqrt{r_c^2 - (h - y + \sqrt{r_s^2 - R_c^2})^2} \\ R_c = \frac{1}{2} \sqrt{S_g^2 + S_w^2} \end{cases} \quad (3-24)$$

شکل (۳-۲۶) دیاگرام سه بعدی از ناحیه حفاظتی داخل میله‌های حفاظ چهارتایی را نشان می‌دهد. با وجود این، همانند حالت سه میله حفاظ، اثر زمین یا ناحیه خارج از مثلث به داخل این فضا نفوذ می‌کند.

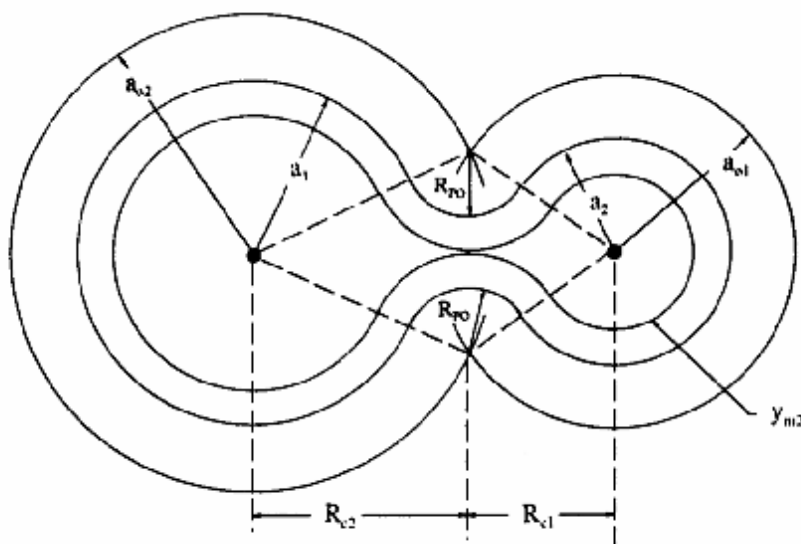


شکل ۳-۲۶: دیاگرام سه بعدی از ناحیه حفاظتی داخل چهار میله حفاظت از صاعقه

- حالت‌های خاص

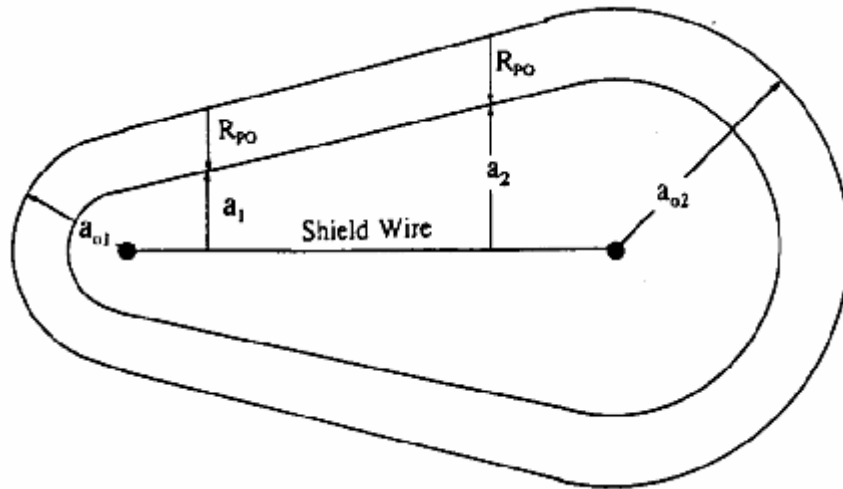
معادلات مربوط به سیم‌های گارد و میله‌های حفاظ هم ارتفاع را می‌توان برای میله‌های حفاظ و سیم‌های گارد با ارتفاع‌های غیریکسان نیز تعمیم داد. علاوه بر آن، حالت‌های دیگری همچون وضعیتی که در آن سیم‌های گارد نسبت به هم در حالت موازی قرار نگرفته‌اند را نیز می‌توان مورد بررسی قرار داد. کلیه این وضعیتهای را می‌توان با معادلاتی که تاکنون معرفی شده‌اند، بررسی نموده و به ندرت نیاز به معادلات جدید خواهد بود.

برای نشان دادن این مطلب، مطابق شکل (۳-۲۷) وضعیتی را در نظر بگیرید که در آن، دو میله حفاظت از صاعقه با ارتفاع‌های غیر یکسان استفاده گردیده‌اند. دو دایره با شعاع‌های متفاوت a_{01} ، a_{02} برای مشخص کردن مکان $y=0$ رسم شده‌اند. از آنجایی که R_{P0} مستقل از ارتفاع میله‌های حفاظتی است، این کمانها برای هر میله ثابت می‌باشند. با وجود این، مقادیر a برای مقادیر y متفاوت خواهند بود. مطابق شکل (۳-۲۷) با استفاده از هر یک از R_{C1} یا R_{C2} و a_{02} می‌توان y_{m2} را پیدا نمود.



شکل ۳-۲۷: ناحیه حفاظتی فراهم شده توسط دو میله حفاظ با ارتفاع‌های غیر یکسان

به طور مشابه، یک سیم گارد که دارای پایه‌هایی با ارتفاع غیر یکسان می‌باشد، دارای دیاگرام حفاظتی مطابق شکل (۳-۲۸) می‌باشد. R_{P0} ثابت است، اما a_{01} و a_{02} متفاوت هستند.



شکل ۳-۲۸: ناحیه حفاظتی فراهم شده توسط یک سیم گارد با ارتفاعهای انتهایی غیر همسان

۳-۳-۴- خلاصه نحوه استفاده از معادلات فواصل برخورد جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست

برای طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پستهای فشار قوی تنها به تعداد محدودی معادله نیاز بوده و علاوه بر آن معادلات یکسانی برای سیم‌های گارد و میله‌های حفاظ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- معادلات فواصل برخورد

فاصله برخورد به زمین (r_g)

فاصله برخورد به تجهیز تحت حفاظت (r_c)

فاصله برخورد به سیم گارد یا میله حفاظ (r_s).

ارتفاع تجهیز تحت حفاظت (y).

ارتفاع سیم گارد یا میله حفاظ (h).

معادلات فواصل برخورد به فرم زیر هستند:

$$\begin{cases} r_c = \lambda_c r_g \\ r_s = \lambda_s r_g \end{cases}$$

(۳-۲۵)

که مقدار پارامترهای آن از رابطه (۳-۹) استخراج می‌گردند.

- معادلات عمومی

معادلات عمومی مورد استفاده برای محاسبه نواحی حفاظتی به شرح ذیل هستند:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \sqrt{r_c^2 - (r_c - h)^2} \\ R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \\ a = a_0 - R_{PO} \\ a = R_0 - R_i \\ R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - [h - y + \sqrt{r_c^2 - R_c^2}]^2} \\ y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_c^2 - R_c^2} \\ y_{mc2} = r_2 - \sqrt{r_c^2 - a_0^2 + R_c^2} \end{array} \right. \quad (26-3)$$

برای دو میله حفاظ، R_C برابر با نصف فاصله بین دو میله (S_g) می‌باشد، یعنی:

$$R_C = S_g / 2 \quad (27-3)$$

- نقطه مرکز میله‌های حفاظ (R_C)

برای سه میله حفاظ که فواصل بین آنها برابر با S_1 ، S_2 ، S_3 می‌باشد، می‌توان نشان داد:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_C = \frac{S_2 S_3}{2H_b} \\ H_b = \frac{2}{S_1} \sqrt{S(S-S_1)(S-S_2)(S-S_3)} \\ S = \frac{1}{2}(S_1 + S_2 + S_3) \end{array} \right. \quad (28-3)$$

- پیدا کردن $y=y_c$ ، در حالیکه $R_{pc}=R_{p0}$

برای پیدا کردن $y=y_c$ باید با استفاده از روشهای تکراری معادله زیر حل شود.

$$R_{PC} + R_{PO} = \sqrt{R_c^2 - (S_g/2)^2} + \sqrt{a_0^2 - (S_g/2)^2} \quad (29-3)$$

که در آن S_g فاصله بین دو میله حفاظ می‌باشد.

- بررسی عملی بودن آرایش خاصی از سه میله حفاظتی

برای اینکه حالت سه میله حفاظ وجود داشته باشد، باید بزرگتر از R_C باشد و نیز مرکز میله‌های حفاظتی در ناحیه بین خطوط

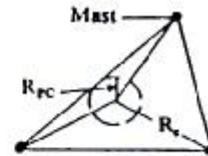
متصل کننده میله‌های حفاظتی قرار گیرد، یعنی اینکه R_C باید برابر یا کمتر از Z_n باشد، که:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_n = \sqrt{H_n^2 + \left[\frac{S_{\max}}{2} - x \right]^2} \\ H_{bn} = \frac{2}{S_{\max}} \sqrt{S(S-S_1)(S-S_2)(S-S_3)} \\ x = \sqrt{S_{\min}^2 - H_{bn}^2} \\ S = \frac{1}{2}(S_1 + S_2 + S_3) \end{array} \right. \quad (30-3)$$

که در آن S_1 ، S_2 ، S_3 فواصل بین میله‌های حفاظ بوده و S_{\max} و S_{\min} به ترتیب حداکثر و حداقل این فواصل می‌باشند.

- تعریف R_C

R_C فاصله تا نقطه مرکزی بین میله‌های حفاظ می‌باشد. این کمیت برای ترکیب‌های مختلف در شکل (۳-۲۹) نشان داده شده است.



Configuration	R_C	Drawing
Two shield wires	$\frac{S_1}{2}$	
Triangles	$\frac{ac}{2h_p}$	
	$\frac{a}{\sqrt{3}}$	
	$\frac{a^2}{\sqrt{4a^2 - b^2}}$	
Square	$\frac{a}{\sqrt{2}}$	
Rectangle	$\frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2}$	
Trapezoid	$a \sqrt{\frac{a^2 - bc}{4a^2 - (c - b)^2}}$	

شکل ۳-۲۹: برخی از مقادیر R_C برای ترکیبات مختلفی از سیم‌های گارد و میله‌های حفاظتی

۳-۳-۵- حفاظت در مقابل جریانهای متفاوت از جریان طراحی I_S [Id]:

برای بررسی نحوه تغییر نواحی حفاظتی با تغییر جریان صاعقه، سیستم حفاظتی نشان داده شده در شکل (۳-۳۰) را در نظر بگیرید. این شکل ناحیه حفاظتی فراهم شده را برای یک میله حفاظت از صاعقه به ازای یک جریان طراحی I_S نشان می‌دهد. برای بررسی اثر تغییر جریان صاعقه بر روی ناحیه حفاظتی دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم:

- جریانهای صاعقه‌ای با دامنه‌ای بزرگتر از جریان طراحی I_S .

- جریانهای صاعقه‌ای با دامنه‌ای کوچکتر از جریان طراحی I_S .

۳-۳-۵-۱- حفاظت در مقابل جریانهای صاعقه‌ای بزرگتر از I_S

ضربات صاعقه دارای دامنه‌های جریانی بسیار مختلفی هستند. از این رو طراح سیستم حفاظت از صاعقه باید از نحوه تغییر نواحی حفاظتی با تغییر دامنه جریان صاعقه آگاه باشد.

جریان صاعقه‌ای را در نظر بگیرید که در آن اندازه جریان صاعقه I_{S1} بزرگتر از جریان طراحی I_S است. همانطور که از معادلات فواصل برخورد مشاهده می‌گردد، با افزایش جریان صاعقه، طول فاصله برخورد نیز افزایش می‌یابد به نحوی که سیستم حفاظت از صاعقه نشان داده شده در شکل (۳-۳۰) به ازای این جریان صاعقه بزرگتر به صورت شکل (۳-۳۱) تغییر ابعاد می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در صورتیکه جریان صاعقه از جریان طراحی بزرگتر گردد، ناحیه حفاظتی فراهم شده به ازای جریان I_{S1} وسیع‌تر شده و نواحی بیشتری را نسبت به جریان طراحی I_S تحت پوشش خود قرار خواهد داد. در این شکل شعاع S_1 متعلق به جریان I_{S1} و شعاع S مربوط به جریان طراحی I_S می‌باشد.

۳-۳-۵-۲- حفاظت در مقابل جریانهای صاعقه‌ای کوچکتر از I_S

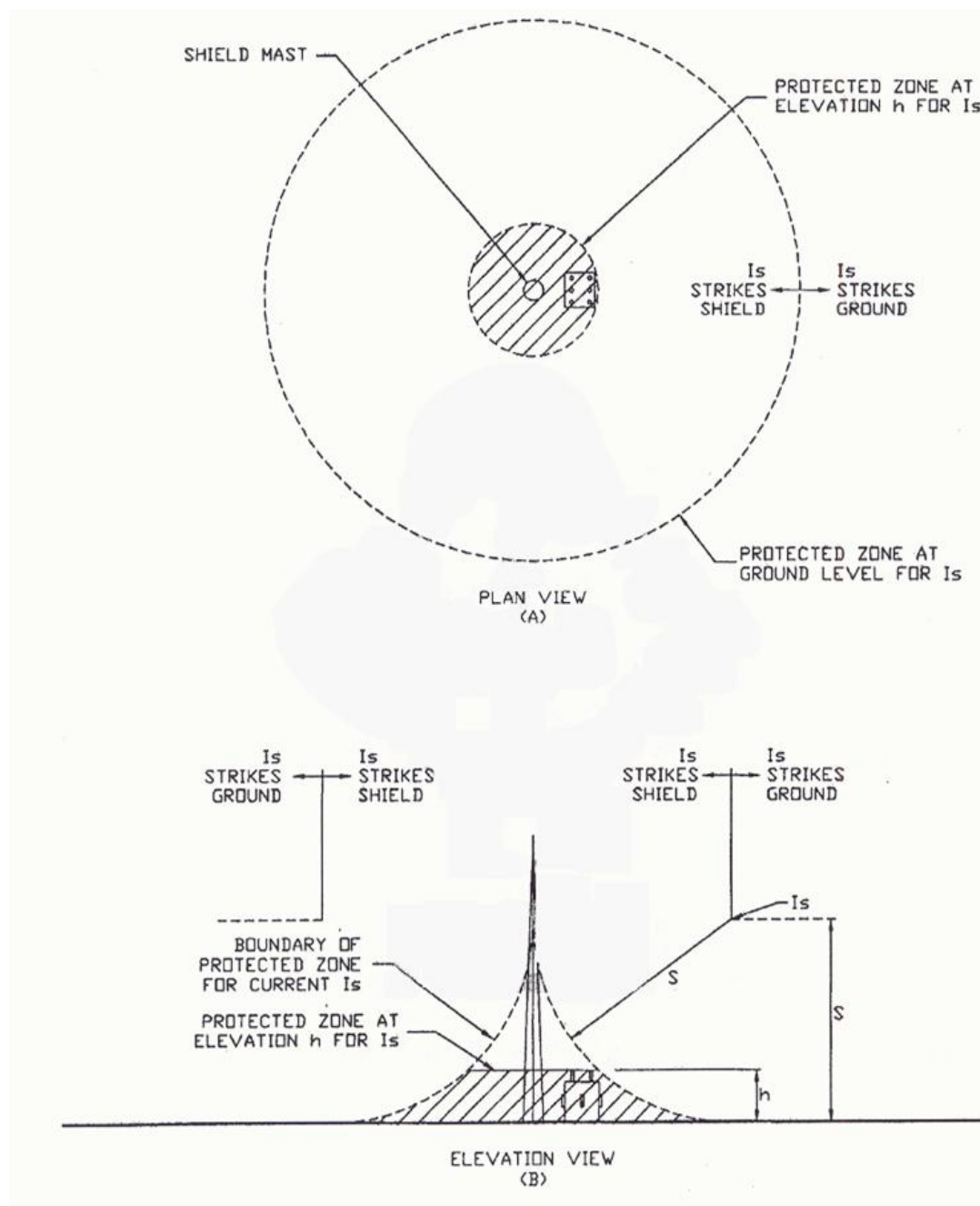
همانطور که در قسمت قبلی مشاهده کردیم، سیستم حفاظت از صاعقه به ازای جریانهای صاعقه‌ای بزرگتر از جریان طراحی I_S حفاظت بهتری را فراهم می‌کند. حال جریانهای صاعقه‌ای را در نظر بگیرید که اندازه آنها کوچکتر از جریان طراحی I_S می‌باشد. فرض کنید که جریان صاعقه I_{S0} دارای دامنه‌ای کمتر از I_S باشد.

از معادلات فواصل برخورد می‌توان دریافت که به ازای این جریان صاعقه، فاصله برخورد از دو حالت دیگر کوچکتر خواهد بود. نواحی حفاظتی فراهم شده به ازای این جریان صاعقه در شکل (۳-۳۲) برای همان سیستم قبلی نشان داده شده است.

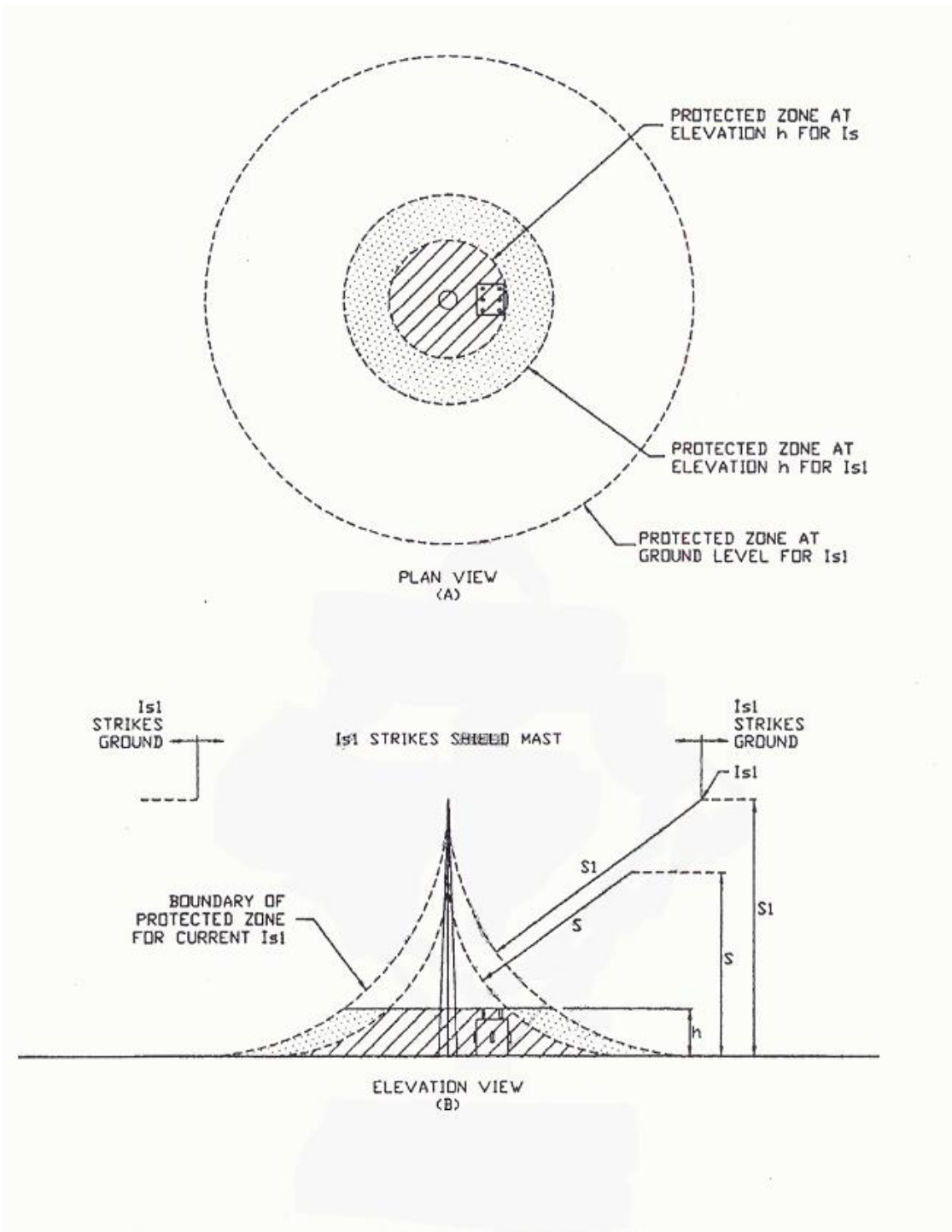
همانطوری که در شکل (۳-۳۲) ملاحظه می‌گردد با کاهش جریان صاعقه نسبت به جریان طراحی I_S ، این امکان وجود دارد که صاعقه به برخی از تجهیزات برخورد نماید. البته این امر به شرطی باعث بروز عیب در سیستم خواهد شد که جریان صاعقه برخوردکننده به تجهیز حفاظت نشده، موجب ایجاد ولتاژی بزرگتر از ولتاژ تحمل صاعقه آن تجهیز گردد. در غیر این صورت ورود صاعقه به داخل سیستم حفاظت از صاعقه نمی‌تواند موجب خسارت گردد.

توجه کنید که در شکل (۳-۳۲) ناحیه حفاظتی فراهم شده به وسیله I_{S0} توسط کمانهای با شعاع S_0 و ناحیه حفاظتی مرتبط با جریان طراحی I_S با کمانهایی با شعاع S مشخص شده‌اند.

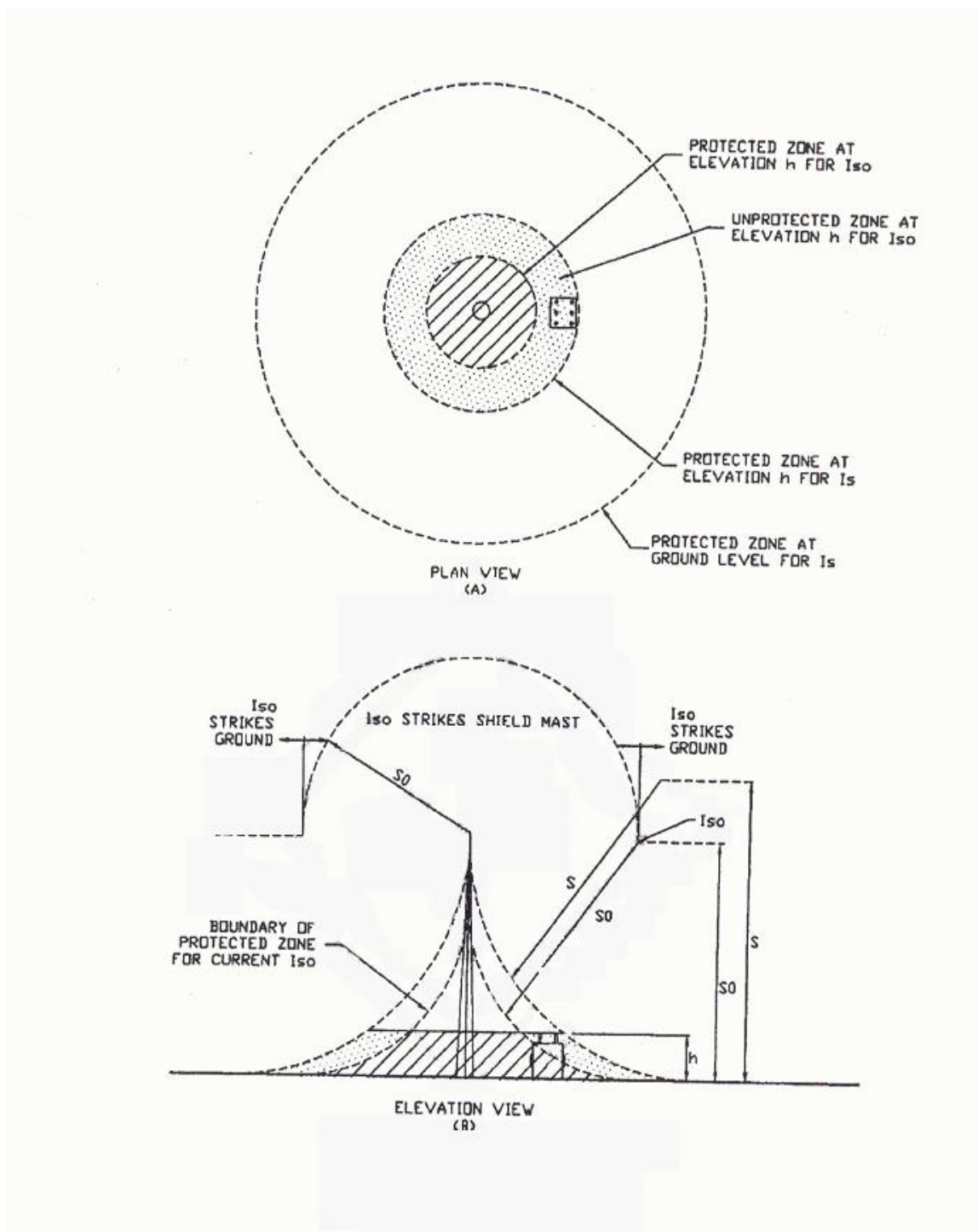
با انتخاب جریان طراحی مناسب، می‌توان از بروز هر گونه عیب در سیستم جلوگیری به عمل آورد.



شکل ۳-۳۰: ناحیه حفاظتی فراهم شده برای یک میله حفاظت از صاعقه منفرد
به ازای جریان طراحی I_s



شکل ۳-۳۱: ناحیه حفاظتی فراهم شده برای شکل (۳-۳۰) به ازای $I_{s1} > I_s$



شکل ۳-۳۲: ناحیه حفاظتی فراهم شده برای شکل (۳-۳۰) به ازای $I_{so} < I_s$

۳-۳-۶- تغییرات در سطوح ولتاژ

کلیه محاسبات و طراحی‌های ارائه شده تاکنون، براساس یک سطح ولتاژ انجام شده است. پستها معمولاً دارای دو یا تعداد بیشتری از سطوح ولتاژی هستند. روش‌های طراحی بیان شده در بخش‌های قبلی را می‌توان به طریق مشابهی برای این قبیل حالتها به طور جداگانه به کار برد.

در اینگونه موارد با عبور از ترانسفورماتور و تغییر سطح ولتاژ، شعاع فواصل برخورد با توجه به جریانهای بحرانی مختلف (CFOهای متفاوت) برای سطوح ولتاژی متفاوت، ممکن است کاهش یا افزایش یابند.

همانطور که در بخش (۳-۳-۱) نیز عنوان گردید، با انتخاب یک جریان طراحی برای هر سطح ولتاژ، می‌توان سیستم حفاظت از صاعقه را برای تجهیزات آن سطح ولتاژ به راحتی با استفاده از فواصل برخوردی که مبتنی بر جریان طراحی همان سطح ولتاژ هستند، طراحی نمود.

۳-۳-۷- حداقل جریان برخورد

در هنگام طراحی سیستم حفاظت از صاعقه در مورد پستهای با ولتاژهای نامی ۶۳ (۶۶) کیلوولت استفاده از رابطه (۲-۲۱) ممکن است به مقادیر کوچکی از جریان بحرانی منجر گردد که این جریانهای بحرانی نیز به نوبه خود می‌توانند منجر به جریانهای طراحی گردند که دامنه آنها در اکثر موارد کوچکتر از ۳ کیلوآمپر می‌باشد (این مقدار در استاندارد IEEE شماره ۹۹۸ برابر ۲ کیلوآمپر پیشنهاد شده است). چنانچه از این جریانهای کوچک جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه استفاده گردد، برای داشتن حفاظت مطلوب باید تا حد امکان فاصله بین سیم‌های گارد یا میله‌های حفاظت از صاعقه را از هم کاهش داد. این مسئله ممکن است هزینه سیستم حفاظت از صاعقه را تحت تأثیر قرار دهد.

ممکن است در اینگونه موارد حداقل جریان صاعقه ممکنه به عنوان جریان طراحی انتخاب گردد. شاید انتخاب جریان طراحی ۳ کیلوآمپر برای اینگونه سیستم‌ها یک انتخاب بسیار محافظه‌کارانه باشد (حتی اگر جریان بحرانی این سیستمها کمتر از این مقدار باشد) زیرا همانطور که از شکل (۲-۴) مشاهده می‌گردد، احتمال بروز صاعقه‌های با دامنه‌هایی بزرگتر از ۳ کیلوآمپر حدود ۹۹/۸ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر ۹۹/۸ درصد از صاعقه‌ها دارای دامنه‌ای بیش از ۳ کیلوآمپر هستند.

انتخاب جریان طراحی ۳ کیلوآمپر ممکن است باعث ایجاد یک سیستم حفاظت از صاعقه با قابلیت اطمینان بالا گردد، اما از طرف دیگر ممکن است هزینه سیستم حفاظت از صاعقه را تحت تأثیر قرار دهد. براین اساس انتخاب حداقل جریان طراحی براساس مصالحه بین نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR) مجاز و میزان هزینه پرداختی جهت طراحی سیستم حفاظت از صاعقه تعیین می‌گردد.

۳-۳-۸- محاسبه نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده

۳-۳-۸-۱- سیم‌های گارد

نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه‌ای که با استفاده از سیم‌های گارد طراحی شده است، به طور تقریبی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$SFFOR_T \approx SFFOR \times L \quad (31-3)$$

که در آن:

$SFFOR_T$: نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده (بر حسب تعداد قوس در سال) می‌باشد.

$SFFOR$: نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه (بر حسب تعداد قوس در سال و بر واحد طول) که مبتنی بر جریان طراحی انتخاب شده می‌باشد.

L : طول کل سیم‌های گارد مورد استفاده در طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پست (بر حسب کیلومتر) می‌باشد.

در صورت استفاده از جریان بحرانی، I_C ، به عنوان جریان طراحی، کمیتهای $SFFOR$ و $SSFOR_T$ هر دو صفر خواهند بود. در هنگام استفاده از جریان طراحی رابطه (۲-۲۳) میزان $SFFOR$ برابر 0.5 قوس بر هر صد کیلومتر در سال در نظر گرفته می‌شود.

متوسط فاصله زمانی بین وقوع هر قوس الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$MTBF = \frac{1}{SFFOR_T} \quad (32-3)$$

که در آن $MTBF$ ، متوسط فاصله زمانی بین وقوع هر قوس الکتریکی^۱ به جهت خطای سیستم حفاظت از صاعقه (بر حسب سال) می‌باشد.

۳-۳-۸-۲- میله‌های حفاظتی

چنانچه جریان طراحی شده برای طراحی سیستم حفاظت از صاعقه، با استفاده از میله‌های حفاظتی، برابر جریان بحرانی تجهیزات پست (I_C) باشد، تعداد قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه تقریباً برابر صفر خواهد بود. این مسئله از آنجا ناشی می‌شود که تنها جریانهای صاعقه‌ای با دامنه کمتر از جریان بحرانی تجهیزات داخل پست، قادر هستند از سیستم حفاظت از صاعقه عبور نموده و با تجهیزات پست برخورد نمایند، اما از آنجا که دامنه آنها پایین‌تر از جریان بحرانی این تجهیزات می‌باشد، این قبیل ضربات صاعقه نمی‌توانند مشکل خاصی را برای تجهیزات پست ایجاد نمایند.

چنانچه جریان طراحی انتخاب شده جهت سیستم حفاظت از صاعقه بزرگتر از جریان بحرانی تجهیزات پست باشد، احتمال ورود صاعقه‌هایی با دامنه‌های بزرگتر از جریان بحرانی تجهیزات پست به داخل سیستم حفاظت از صاعقه وجود خواهد داشت و این مسئله می‌تواند منجر به قوس الکتریکی در تجهیزاتی گردد که صاعقه به آن برخورد نموده است.

برای بدست آوردن نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه‌ای که با استفاده از میله‌های حفاظت طراحی شده است،

مراحل زیر دنبال می‌گردد:

- بدست آوردن مساحت سطوح محافظت نشده

برای آشنایی با چگونگی بدست آوردن مساحت سطوح محافظت نشده، شکل (۳-۳۲) را در نظر بگیرید. فرض کنید که تجهیز نشان داده شده قادر به تحمل جریان بحرانی I_{s0} می‌باشد. از آنجا که طراحی سیستم حفاظت از صاعقه براساس جریانی بزرگتر از جریان بحرانی تجهیز صورت گرفته است ($I_s > I_{s0}$) احتمال بروز قوس، به جهت ورود صاعقه‌هایی با دامنه کوچکتر از I_s و بزرگتر از

1 . Mean time between failures

I_{SO} به داخل سیستم حفاظت از صاعقه، وجود خواهد داشت. سطح محافظت نشده برای ارتفاع مشخصی از تجهیز در شکل (۳-۳۲) نشان داده شده است. این سطح در واقع نشان دهنده مکانهایی است که در آنجا برخورد صاعقه با دامنه بزرگتر از I_{SO} و کوچکتر از I_S به تجهیزاتی با ارتفاع h وجود خواهد داشت.

- بدست آوردن احتمال برخورد ضربات صاعقه‌ای که می‌توانند منجر به صدمه دیدن تجهیز گردند

با استفاده از رابطه (۲-۱۲) و یا شکل (۲-۴) می‌توان احتمال برخورد صاعقه‌های با دامنه مابین I_S و I_{SO} به سطوح محافظت نشده را بدست آورد. احتمال اینکه جریان صاعقه دارای دامنه‌ای مابین I_{SO} و I_S باشد، از رابطه زیر مشخص می‌گردد:

$$P(I_{SO} < I < I_S) = P(I_{SO}) - P(I_S) \quad (۳-۳۳)$$

که در آن:

$P(I_{SO} < I < I_S)$: احتمال اینکه جریان صاعقه دارای دامنه‌ای مابین I_{SO} و I_S باشد.

$P(I_{SO})$: احتمال اینکه دامنه جریان صاعقه بیش از جریان I_{SO} باشد.

$P(I_S)$: احتمال اینکه دامنه جریان صاعقه بیش از جریان I_S باشد.

- بدست آوردن نرخ قوس‌الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه

با داشتن مساحت سطوح محافظت نشده، احتمال برخورد صاعقه‌هایی با دامنه‌های مابین I_{SO} و I_S با سطوح محافظت نشده و تعداد ضربات صاعقه مشاهده در محل پست، می‌توان نرخ قوس‌الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه را از رابطه زیر بدست آورد:

$$SFFOR_T = N_g \times P(I_{SO} < I < I_S) \times A_F / (1000)^2 \quad (۳-۳۴)$$

که در آن:

$SFFOR_T$: نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه (بر حسب تعداد قوس در سال) می‌باشد.

N_g : تعداد ضربات صاعقه در محل پست (بر حسب تعداد ضربات صاعقه بر هر کیلومتر مربع) است.

$P(I_{SO} < I < I_S)$: احتمال اینکه جریان صاعقه مابین I_{SO} و I_S باشد.

A_F : مساحت سطوح محافظت نشده بر حسب متر مربع می‌باشد.

A_F از طریق دیاگرام حفاظتی رسم شده برای جریانهای I_{SO} و I_S از رابطه (۲-۱۲) بدست می‌آید.

برای آشنایی با مراحل فوق، فرض کنید که در شکل (۳-۳۲) اندازه جریان I_{SO} برابر $۴/۰۳$ کیلوآمپر و اندازه جریان I_S برابر $۱۱/۸۹$ کیلوآمپر باشد. از روابط (۲-۱۱) و (۳-۳۳) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} P(I_{SO} < I < I_S) &= P(I_{SO}) - P(I_S) \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{4.03}{24}\right)^{2.6}} - \frac{1}{1 + \left(\frac{11.89}{24}\right)^{2.6}} \\ &= 0.990 - 0.861 = 0.128 \end{aligned}$$

حال فرض کنید که با استفاده از ارتفاع تجهیز و با رسم نواحی حفاظتی به ازای I_{S0} و I_S اندازه شعاع خارجی ناحیه حفاظت نشده برابر ۳۵ متر و شعاع داخلی ناحیه حفاظت نشده برابر ۲۲ متر بدست آمده است. با استفاده از این اطلاعات مساحت سطح محافظت نشده برابر خواهد بود با:

$$A_F = \pi [(35)^2 - (22)^2] = 2328m^2$$

اکنون فرض کنید که سطح ایزوکرونیک در محل پست مورد نظر برابر ۵۰ روز رعد و برقی در سال باشد، از رابطه (۲-۱۳) مقدار N_g برابر خواهد بود با:

$$N_g = 0.04(T_d)^{1.25} = 0.04(50)^{1.25} = 5.32 \text{ Flash/km}^2$$

اکنون با استفاده از رابطه (۳-۳۴) نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه بدست می‌آید:

$$SFFOR_T = 5.32 \times 0.128 \times 2328 / (1000)^2 = 1.585 \times 10^{-3} \text{ Failure/Year}$$

از رابطه (۳-۳۲)، متوسط فاصله زمانی بین وقوع هر قوس الکتریکی به جهت خطای سیستم حفاظت از صاعقه برابر خواهد بود با:

$$MTBF = \frac{1}{SFFOR_T} = \frac{1}{5.585 \times 10^{-3}} = 631 \text{ Year}$$

اگر در پست مورد نظر تعداد میله‌های حفاظت از صاعقه بیش از یک عدد باشد، مجموع نرخ وقوع قوس الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه ($SFFOR_T$) هر یک از میله‌های حفاظت به عنوان نرخ وقوع قوس الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه ($SFFOR_T$) کل پست در نظر گرفته می‌شود.

۳-۴- استقامت مکانیکی و حرارتی سیم‌های گارد و میله‌های حفاظ

سیم‌های گارد و میله‌های حفاظ بایستی در مقابل خوردگی مقاوم باشند. لذا برای سیم‌های گارد از هادیهای GS (فولاد گالوانیزه) یا AS (فولاد روکش شده با آلومینیوم) و برای میله‌های حفاظ از فولاد گالوانیزه استفاده می‌شود. چنانچه زمان تخلیه بار صاعقه طولانی باشد، گرمای تولید شده در هادیها قابل توجه خواهد بود، لذا هادیهای حفاظتی باید دارای چنان ظرفیت حرارتی و سطح مقطعی باشند که عبور جریان صاعقه را تحمل کنند.

با ملاحظه موارد فوق پیشنهاد می‌گردد که برای سیم‌های گارد از هادیهای GS یا AS با سطح مقطع بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر مربع استفاده نمود [۱۲]. انتخاب نوع GS یا AS بستگی به شرایط محیطی در محل پست مورد نظر دارد. عموماً برای مکانهای با میزان آلودگی پایین، از هادیهای نوع GS استفاده می‌گردد و برای مناطقی که میزان آلودگی در آنها بالا است، استفاده از هادیهای AS پیشنهاد می‌گردد.

برای میله‌های حفاظت از صاعقه نیز باید از میله‌هایی از جنس GS با سطح مقطع بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر مربع استفاده نمود [۱۲]. سطح مقطع‌های پیشنهاد شده فوق، برای سیم‌های گارد و میله‌های حفاظ، تنها از دیدگاه الکتریکی بوده و بدیهی است که انتخاب سطح مقطع نهایی باید با در نظر گرفتن تنشهای مکانیکی وارد شده بر آنها صورت گیرد.

از نظر استقامت مکانیکی هادیهای حفاظت از صاعقه بایستی تحمل بارهایی نظیر باد، یخ و وزن خود و همچنین نیروهای الکترومغناطیسی ایجاد شده در اثر عبور جریان از آنها را داشته باشند.

۳-۵- مثال‌هایی از طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه

در این بخش نمونه‌هایی از طراحی سیستم حفاظت از صاعقه ارائه می‌گردد. در مثال اول هدف آشنایی با چگونگی طراحی سیستم حفاظت از صاعقه با استفاده از سیم‌ها و میله‌های حفاظتی و روشهای ارائه شده در بخشهای قبلی می‌باشد. در مثال دوم نحوه به کار بردن روشهای طراحی برای یک سیستم واقعی ارائه شده است.

۳-۵-۱- مثال اول

فرض کنید که در یک پست ساده، قصد داریم تجهیزاتی با طول و عرض 10×20 متر و با ارتفاع ۶ متر را در مقابل برخورد مستقیم صاعقه محافظت نماییم. برای این منظور و به جهت آشنایی با چگونگی استفاده از روشهای طراحی ارائه شده، طرحهای مختلفی را با استفاده از دو روش ارائه شده انجام می‌دهیم. در روش مدل الکتروهندسی از جریان طراحی ۱۰ کیلوآمپر و در روش منحنی‌های تجربی از نرخ خطای یک درصد و یک دهم درصد استفاده می‌کنیم.

۳-۵-۱-۱- حفاظت تجهیز با استفاده از یک سیم گارد

- روش منحنی‌های تجربی

سیم گارد در بالای تجهیز و در امتداد طول تجهیز به نحوی قرار می‌گیرد که فاصله دورترین نقطه تجهیز تا سیم گارد برابر ۱۰ متر باشد. از شکل (الف-۱۰) پیوست (۳-۱) استفاده نموده و تجهیز را معادل با هادیهای فاز این شکل در نظر می‌گیریم.

به ازای نرخ خطای برابر با یک درصد

مقادیر $d=6m$ ، $x=10m$ به طور تقریبی از منحنی $d=6/1m$ مقدار y برابر $12/5$ متر بدست می‌آید و با توجه به شکل (الف-۱۰) مقدار $h=y+d$ برابر $18/5$ متر خواهد شد. لذا براساس این روش باید از سیم گارد با ارتفاع بزرگتر یا مساوی $18/5$ متر استفاده نمود.

به ازای نرخ خطای برابر با یک دهم درصد

مقادیر $d=6m$ و $x=10m$ به طور تقریبی از منحنی $d=6/1m$ مقدار y برابر 15 متر بدست می‌آید و با توجه به شکل (الف-۹) مقدار $h=y+d$ برابر با 21 متر خواهد شد. لذا براساس این روش باید از سیم گارد با ارتفاع بزرگتر یا مساوی 21 متر استفاده نمود.

- روش مدل الکتروهندسی

در این حالت نیز سیم گارد را در بالای تجهیز در نظر می‌گیریم. به ازای جریان طراحی ۱۰ کیلوآمپر، با استفاده از معادلات (۳-۹) و (۳-۱۳) و با توجه به شکل (۳-۷) خواهیم داشت:

$$r_c = r_g = r_s = 8 I^{0.65} = 8 \times (10)^{0.65} = 35.73 \text{ m}, \quad a = 10 \text{ m}, \quad y = 6 \text{ m}$$

$$R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} = \sqrt{(35.73)^2 - (35.73 - 6)^2} = 19.82 \text{ m}$$

$$a_0 = R_{PO} + a = 19.82 + 10 = 29.82 \text{ m}$$

$$h = r_g - \sqrt{r_s^2 - a_0^2} = 35.73 - \sqrt{(35.73)^2 - (29.82)^2} \approx 16 \text{ m}$$

براساس نتایج حاصل از این روش، برای حفاظت تجهیز می‌توان از یک سیم گارد که در ارتفاعی برابر با ۱۶ متر قرار گرفته است استفاده نمود.

۳-۵-۱-۲- حفاظت تجهیز با استفاده از دو میله حفاظ

در این حالت فرض کنید که تجهیز مابین دو میله حفاظ که از یکدیگر به اندازه ۳۰ متر فاصله دارند قرار گرفته است. هدف پیدا کردن ارتفاع این میله‌ها می‌باشد.

- روش منحنی‌های تجربی

برای داشتن حفاظت مناسب برای کل سطح تجهیز، ضروری است که میله‌های حفاظ به هم نزدیک شده تا سطح حفاظتی مناسبی را ایجاد نمایند. برای این منظور و با توجه به شکل (۳-۲) برای داشتن هم‌پوشانی لازم ضروری است که پهنای هم‌پوشانی x' معادل یا بزرگتر از پهنای تجهیز (۱۰ متر) باشد. با توجه به اینکه فاصله بین دو میله حفاظتی (s') برابر ۳۰ متر است، از شکل (الف-۸) و به ازای نرخ خطای معادل یک درصد، مقدار y را به ازای ارتفاع ۶ متر به طور تقریبی از منحنی $d=6/1$ متر استخراج می‌کنیم. این مقدار تقریباً برابر ۸ متر خواهد بود. حال با توجه به شکل (الف-۴)، به طور تقریبی از طریق منحنی $d=6/1$ متر و به ازای مقدار ارتفاع y برابر با ۸ متر مقدار پهنای هم‌پوشانی x' تقریباً برابر ۱۲ متر خواهد بود. لذا در این حالت خاص مقدار y بدست آمده صحیح بوده و ارتفاع میله‌های حفاظتی را می‌توان به راحتی از طریق رابطه $h=y+d$ بدست آورد. که طبق این رابطه مقدار h برابر ۱۴ متر خواهد شد.

در صورتی که مقدار استخراج شده برای x' کمتر از ۱۰ متر باشد، باید مقدار y را تا حدی که x' بزرگتر از ۱۰ متر شود افزایش دهیم و از طریق y بدست آمده ارتفاع میله‌های حفاظتی را حساب کنیم.

- روش مدل الکترو هندسی

به ازای جریان طراحی ۱۰ کیلوآمپر و با استفاده از معادلات (۳-۹) و (۳-۱۵) تا (۳-۱۷) و شکل‌های (۳-۱۲) و (۳-۱۳) خواهیم داشت:

$$r_g = r_s = r_g = 35.73 \text{ m}$$

$$R_{p0} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} = \sqrt{(35.73)^2 - (35.73 - 6)^2} = 19.82 \text{ m}$$

$$a_0 = \sqrt{R_c^2 + d^2} \quad , \quad d = R_{p0} + x$$

$$R_c = S/2 = 30/2 = 15 \text{ m} \quad , \quad x = 10/2 = 5 \text{ m}$$

$$d = 19.82 + 5 = 24.82 \text{ m}$$

$$a_0 = \sqrt{(15)^2 + (24.82)^2} = 29 \text{ m}$$

$$h = r_g - \sqrt{r_s^2 - a_0^2} = 35.73 - \sqrt{(35.73)^2 - (29)^2}$$

$$h = 14.86 \text{ m}$$

براساس این روش ارتفاع میله‌های حفاظ باید بزرگتر یا مساوی ۱۴/۸۶ متر باشد.

۳-۵-۲- مثال دوم

در این مثال سیستم حفاظت از صاعقه یک پست واقعی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. نقشه‌های جانمایی و مقاطع این پست ۲۳۰/۶۳ کیلوولت در شکل‌های (۳-۳۳) تا (۳-۴۱) ارائه شده‌اند. در این شکل‌ها سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده برای پست نیز نشان داده شده است. هدف بررسی کفایت و صحت سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده با استفاده از روش‌های منحنی‌های تجربی و مدل الکتروهندسی می‌باشد.

فرض کنید سطح کرومیک سالانه در محل پست موردنظر ۲۲ روز در سال و سطح استقامت عایقی تجهیزات پست در مقابل صاعقه (LIWL) برای سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت برابر ۹۵۰ کیلوولت و برای سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت برابر ۳۲۵ کیلوولت انتخاب شده باشد.

حل :

با توجه به شکل‌های (۳-۳۳) و (۳-۳۴) ارتفاع متوسط بلندترین شینه پست در قسمت ۲۳۰ کیلوولت برابر ۲۰ متر است. هادی‌های این شینه به صورت باندلی می‌باشند که هر باندل آن از دو هادی با سطح مقطع ۸۰۰ میلی‌متر مربع تشکیل یافته‌اند و فاصله بین هادی‌های باندل نیز ۱۰ سانتیمتر می‌باشد.

با توجه به اطلاعات فوق و با استفاده از معادلات (۲-۱۶)، (۲-۱۷) و (۲-۲۰) خواهیم داشت:

$$r = \sqrt{\frac{800}{\pi}} = 15.96 \text{mm} \quad R_0 = \sqrt{r \times d} = \sqrt{0.01596 \times 0.1} = 0.04 \text{m}$$

$$Z_{C230} = 60 \text{Ln} \frac{2h_{av}}{R_0} = 60 \text{Ln} \frac{2 \times 20}{0.04} = 414.46 \ \Omega$$

$$I_{C230} = \frac{2(LIWL_{230})}{Z_{C230}} = \frac{2 \times (950)}{414.46} = 4.59 \text{kA}$$

حال با توجه به شکل‌های (۳-۳۳) و (۳-۳۸) و به روشی مشابه فوق، می‌توان جریان بحرانی تجهیزات سمت ۶۳ کیلوولت پست

موردنظر را نیز بدست آورد:

$$r = 15.96 \text{mm} , \quad R_0 = 0.04 \text{m} , \quad h_{av} = 10 \text{m}$$

$$Z_{C63} = 60 \text{Ln} \frac{2h_{av}}{R_0} = 60 \text{Ln} \frac{2 \times 10}{0.04} = 372.88 \ \Omega$$

$$I_{C63} = \frac{2(LIWL_{63})}{Z_{C63}} = \frac{2 \times 325}{372.88} = 1.743 \text{kA}$$

توجه کنید که در سیستم مورد نظر هادی‌های شینه‌های سمت ۶۳ کیلوولت مشابه هادی‌های سمت ۲۳۰ کیلوولت می‌باشند و تنها ارتفاع قرارگیری آنها متفاوت می‌باشد.

حال فرض کنید که در روش مدل الکتروهندسی از نرخ خطای ۰/۰۵ قوس در هر صد کیلومتر در سال استفاده شده است. لذا جریان‌های طراحی که در روش مدل الکتروهندسی برای هر سطح ولتاژ در نظر گرفته می‌شود به صورت زیر از معادلات (۲-۱۳) و (۲-۲۳) محاسبه می‌گردند:

برای سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت:

$$I_{C230} = 4.59 \text{ kA}, T_d = 22 \text{ days/year}$$

$$N_g = 0.04(T_d)^{1.25} = 0.04(22)^{1.25} = 1.9 \text{ flashes/km}^2$$

$$I_{d230} = (1.27 + 0.72e^{-N_g/4})I_{C230} = (1.27 + 0.72e^{-1.9/4}) \times 4.59$$

$$I_{d230} = 7.88 \text{ kA}$$

برای سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت:

$$I_{C63} = 1.743 \text{ kA}, N_g = 1.9 \text{ flash/km}^2$$

$$I_{d63} = (1.27 + 0.72e^{-1.9/4}) \times 1.743 = 3 \text{ kA}$$

براساس نتایج فوق در روش مدل الکتروهندسی برای بررسی سیستم حفاظت از صاعقه سمت ۲۳۰ کیلوولت از جریان طراحی ۷/۸۸ کیلوآمپر و برای سمت ۶۳ کیلوولت از جریان طراحی ۳ کیلوآمپر استفاده می‌نماییم.

۳-۵-۲-۱- بررسی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات بی‌های ۲۳۰ کیلوولت

- روش منحنی‌های تجربی

از آنجا که مرتفع‌ترین تجهیزات درون پست، شینه‌های پست می‌باشد و با توجه به وضعیت خاص پست، بهترین شیوه برای طراحی سیستم حفاظت از صاعقه استفاده از سیمهای گارد در امتداد مرتفع‌ترین این هادیها می‌باشد. این سیمهای حفاظتی از دو طرف به گنتریهایی که این هادیها را نگه داشته‌اند متصل می‌شوند.

در این سیستم مطابق شکل‌های (۳-۳۳) تا (۳-۳۶) برای حفاظت هر بی ۲۳۰ کیلوولت از سه سیم گارد با ارتفاع ۲۴ متر و به فاصله ۱۸ متر از یکدیگر استفاده شده است. برای بررسی کفایت و صحت طراحی، باید مطمئن شویم که علاوه بر تجهیزات داخل هر بی، تجهیزات مابین و حواشی بی‌ها نیز از حفاظت مناسب برخوردار هستند.

برای بررسی وضعیت حفاظتی داخل بی‌ها، باید حداکثر ارتفاع حفاظتی فراهم شده مابین سیمهای گارد را بدست آورده و با ارتفاع بلندترین تجهیزاتی که در حد فاصل مابین سیمهای حفاظتی قرار دارند مقایسه نماییم. چنانچه ارتفاع حفاظتی فراهم شده بوسیله سیمهای گارد از این ارتفاع بزرگتر باشد، حفاظت مناسب فراهم شده است. در غیر اینصورت باید با تغییر محل، تعداد و یا ارتفاع سیمهای حفاظتی این مشکل را برطرف نماییم.

از شکل (الف - ۱۸) با استفاده از منحنی ۰/۱ درصد و با توجه به نسبت S/h معادل با $\frac{18}{24}$ (یا ۰/۷۵) نسبت d/h برابر ۰/۹ بدست می‌آید. لذا مقدار d برابر خواهد بود با:

$$d = d/h \times h = 0.9 \times 24 = 21.6 \text{ m}$$

مطابق شکل (الف - ۱۸) برای این مقدار d استخراج شده هادیهایی که ارتفاع آنها کوچکتر مساوی ۲۱/۶ متر است، بطور مناسبی حفاظت شده خواهند بود. با توجه به شکل‌های (۲-۳۴) و (۲-۳۵) از آنجا که ارتفاع بلندترین هادیهای برقرار بی‌های ۲۳۰ کیلوولت کمتر از این مقدار مجاز می‌باشد (۲۰ متر)، سیمهای گارد قادر خواهند بود که برای تجهیزات مابین بی‌ها حفاظت مناسبی را فراهم نمایند.

حال ناحیه حد فاصل بین دو بی ۲۳۰ کیلوولت را بررسی می‌کنیم. از شکل (۳-۳۳) تا (۳-۳۷) می‌توانیم ارتفاع بلندترین تجهیزاتی که در حد فاصل بین دو بی قرار گرفته‌اند را بیابیم. این مقدار برابر ۱۲ متر می‌باشد. با توجه به شکل‌های (الف-۱۸) و (۲-۳۶) با انتخاب مقدار S برابر با ۱۱/۳۵ متر و h برابر با ۲۴ متر مقدار d برابر با ۲۳ متر استخراج می‌گردد. از آنجایی که این مقدار بزرگتر از ارتفاع بلندترین تجهیزات حد فاصل مابین دو بی می‌باشد (۱۲ متر)، نتیجه می‌گیریم که تجهیزات مابین دو بی نیز توسط این آرایش از سیم‌های گارد بطور مناسبی حفاظت می‌گردند.

برای بررسی ناحیه حفاظتی فراهم شده برای نواحی بیرونی بی‌ها، مطابق شکل‌های (۳-۳۳) و (۳-۳۷) فاصله دورترین تجهیزات بیرون از بی‌ها را از نزدیکترین سیم حفاظتی (بزرگترین فاصله A تا B یا I تا H در شکل (۳-۳۳) استخراج می‌نماییم. این فاصله برابر ۳/۰۵ متر بوده و این تجهیزات در ارتفاع ۱۲ متری نصب شده‌اند. برای بررسی وضعیت حفاظتی فراهم شده برای این ناحیه از شکل (الف-۱۷) استفاده می‌نماییم. با استفاده از منحنی ۰/۱ درصد و با انتخاب مقدار x برابر با ۳/۰۵ متر و h برابر ۲۴ متر، مقدار d برابر با ۱۹ متر بدست می‌آید که به مراتب بزرگتر از ارتفاع تجهیزات این ناحیه (۱۲ متر) می‌باشد و لذا سیم‌های گارد برای این ناحیه نیز حفاظت مناسبی را فراهم می‌نمایند.

- روش مدل الکتروهندسی

مشابه آنچه که برای روش منحنی‌های تجربی ارائه گردید، برای بررسی کفایت و صحت طراحی سیستم حفاظت صاعقه تجهیزات پست، ارتفاع‌های حفاظتی فراهم شده توسط سیستم طراحی شده را برای نواحی داخل، حد فاصل و خارج بی‌های ۲۳۰ کیلوولت کنترل می‌نماییم. از آنجا که ولتاژ نامی بخش مورد مطالعه ۲۳۰ کیلوولت است، از جریان طراحی ۷/۸۸ کیلوآمپر استفاده می‌نماییم. از معادله (۳-۹) اندازه فواصل برخورد را تعیین می‌نماییم:

$$r_g = 8 I^{0.65} = 8 \times (7.88)^{0.65} = 30.6 \text{ m}$$

$$\Rightarrow r_c = r_s = r_g = 30.6 \text{ m}$$

برای ناحیه داخلی بی‌ها باید حداقل ارتفاع حفاظتی که مابین سیم‌های حفاظتی ایجاد می‌گردد را بدست آوریم. با توجه به شکل‌های (۳-۳۳) تا (۳-۳۶) و با استفاده از معادله (۳-۱۲) خواهیم داشت:

$$R_c = \frac{18}{2} = 9\text{m} \quad , \quad h = 24\text{m}$$

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} = 24 - 30.6 + \sqrt{(30.6)^2 - (9)^2}$$

$$y_{mc} = 22.65\text{m}$$

از آنجا که مقدار y_{mc} بزرگتر از ارتفاع بلندترین تجهیزات مابین سیم‌های حفاظتی (۲۰ متر) می‌باشد، تجهیزات مابین این

سیم‌های حفاظتی از حفاظت مناسب برخوردار می‌باشند، لذا آرایش مذکور برای ناحیه داخلی بی‌ها مناسب می‌باشد.

برای ناحیه حد فاصل مابین دو بی ۲۳۰ کیلوولت، حداقل ارتفاع حفاظتی که مابین دو سیم حفاظتی مجاور هم ایجاد می‌گردند را

می‌توان به طریق مشابهی بدست آورد:

$$R_c = \frac{11.35}{2} = 5.675\text{m} \quad , \quad h = 24\text{m}$$

$$y_{mc} = 24 - 30.6 + \sqrt{30.6^2 - 5.675^2}$$

$$y_{mc} = 23.47\text{m}$$

از آنجا که مقدار ymc بزرگتر از ارتفاع بلندترین تجهیزات مابین دو بی ۲۳۰ کیلوولت (۱۲ متر) می‌باشد، نتیجه می‌گیریم که سیمهای گارد برای این نواحی نیز، حفاظت مناسبی را فراهم می‌آورند.

در نواحی بیرونی بی‌ها نیز همانند قبل، ارتفاع حفاظتی را در ناحیه بیرونی سیمهای حفاظتی مورد بررسی قرار می‌دهیم. از شکل‌های (۳-۳۳) تا (۳-۳۷) و با استفاده از معادله (۳-۱۳) و شکل (۳-۷) خواهیم داشت:

$$a = 3.05\text{m}, h = 24\text{m}, r_c = r_g = r_s = 30.6\text{m}$$

$$a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} = \sqrt{30.6^2 - (30.6 - 24)^2}$$

$$\Rightarrow a_0 = 29.88\text{ m}$$

$$R_{po} = a_0 - a = 29.88 - 3.05 = 26.83\text{ m}$$

$$R_{po} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \Rightarrow y = r_g - \sqrt{r_c^2 - R_{po}^2}$$

$$y = 30.6 - \sqrt{30.6^2 - 26.83^2}$$

$$\Rightarrow y = 15.89\text{ m}$$

در روابط فوق y ارتفاع حفاظتی فراهم شده برای تجهیزاتی است که فاصله نقاط خارجی آنها تا سیم گارد مجاورشان برابر a، یعنی ۳/۰۵ متر است. از آنجا که این ارتفاع حفاظتی فراهم شده (۱۵/۸۹ متر) از ارتفاع بلندترین تجهیزات این ناحیه (۱۲ متر) بزرگتر است، نتیجه می‌گیریم که نحوه قرارگیری سیمهای گارد مناسب بوده و قادر به ایجاد ناحیه حفاظتی مناسبی برای این نواحی نیز می‌باشند.

از دو روش فوق این نتیجه حاصل می‌آید که طراحی انجام گرفته برای سیستم حفاظت از صاعقه تجهیزات داخل، حد فاصل و بیرون بی‌های ۲۳۰ کیلوولت صحیح بوده و این سیستم قادر به ایجاد حفاظت موثر برای این نواحی خواهد بود.

۳-۵-۲-۲- بررسی سیستم حفاظت از صاعقه تجهیزات بی‌های ۶۳ کیلوولت

- روش منحنی‌های تجربی

از آنجا که ساختار بی‌های ۶۳ کیلوولت نیز مشابه بی‌های ۲۳۰ کیلوولت است، روش مشابهی را برای بررسی کفایت و صحت سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه طراحی شده به کار می‌بندیم. در این حالت نیز مناسبترین شیوه برای فراهم نمودن حفاظت موثر برای هادیهای بی استفاده از سیمهای گارد به موازات بلندترین هادیهای بی می‌باشد. این سیمها مابین گنتری‌های نگهدارنده هادیهای فاز قرار گرفته‌اند و تعداد آنها به گونه‌ای انتخاب می‌شود که حفاظت مناسبی را برای نواحی داخل و خارج بی فراهم آورند. در این سیستم مطابق شکل‌های (۳-۳۳)، (۳-۳۸) و (۳-۳۹) برای حفاظت هر بی ۶۳ کیلوولت از پنج سیم حفاظتی که در ارتفاع ۱۳ متری و به فاصله ۷/۵ متر از هم قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. برای بررسی کفایت و صحت طراحی باید همانند قبل مطمئن شویم که تجهیزات داخل و خارج بی‌ها به طور مناسبی تحت حفاظت قرار گرفته‌اند.

برای بررسی ناحیه داخلی بی‌ها، همانند آنچه که برای بی‌های ۲۳۰ کیلوولت انجام شد، حداکثر ارتفاع حفاظتی فراهم شده مابین سیمهای گارد را بدست آورده و با ارتفاع بلندترین تجهیز قرار گرفته در این ناحیه مقایسه می‌نماییم. در صورتی که ارتفاع حفاظتی

فراهم شده از این ارتفاع بزرگتر باشد، آرایش سیم‌های گارد برای این نواحی مورد قبول می‌باشد، در غیر این صورت باید با تغییر تعداد، محل و ارتفاع سیم‌های گارد، حفاظت مناسب را برای این نواحی فراهم آوریم.

از شکل (الف ۱۸-) با استفاده از منحنی ۰/۱ درصد و با توجه به نسبت s/h معادل با $7/5/13$ (یا $0/577$) مقدار d برابر با ۱۲ متر بدست می‌آید. مطابق شکل (الف ۱۸-) تجهیزاتی که ارتفاع آنها کوچکتر از ۱۲ متر باشد در مقابل برخورد مستقیم صاعقه حفاظت شده خواهند بود. با توجه به شکل‌های (۳-۳۳) و (۳-۳۸) ارتفاع بلندترین تجهیز قرار گرفته در حد فاصل مابین سیم‌های گارد برابر ۱۰ متر است و این مقدار از ارتفاع حفاظتی فراهم شده (۱۲ متر) کوچکتر می‌باشد، و لذا نتیجه می‌گیریم که تجهیزات قرار گرفته در داخل بی‌ها از حفاظت موثر برخوردار هستند.

از آنجا که فاصله بین بی‌های ۶۳ کیلوولت ناچیز می‌باشد نیازی به بررسی کمی وضعیت حفاظتی در این ناحیه نمی‌باشد و از نتایج قبلی می‌توان دریافت که این ناحیه از حفاظت مناسب برخوردار می‌باشد. در مورد نواحی بیرونی بی‌های ۶۳ کیلوولت، همانند مطالب ارائه شده برای ناحیه بیرونی بی‌های ۲۳۰ کیلوولت، فاصله دورترین تجهیزات بیرون از بی‌ها تا نزدیکترین سیم حفاظتی مجاور و ارتفاع آنها از طریق شکل‌های (۳-۳۳) و (۳-۴۰) بدست می‌آید. این فاصله برابر یک متر بوده و این تجهیزات در ارتفاع ۷ متری نصب شده‌اند. برای بررسی وضعیت حفاظتی فراهم شده از شکل (الف ۱۷-) استفاده می‌نماییم. با استفاده از منحنی ۰/۱ درصد و با انتخاب مقدار x برابر با یک متر و h برابر با ۱۳ متر، مقدار d برابر با ۱۱ متر بدست می‌آید که به مراتب بزرگتر از ارتفاع تجهیزات این ناحیه (۷ متر) می‌باشد و لذا سیم‌های گارد برای این ناحیه نیز حفاظت مناسبی را فراهم می‌نمایند.

- روش مدل الکتروهندسی

همانند آنچه که برای بی‌های ۲۳۰ کیلوولت صورت گرفت، برای سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت از جریان طراحی ۳ کیلوآمپر استفاده می‌نماییم. از معادله (۳-۹) اندازه فواصل برخورد را تعیین می‌نماییم:

$$r_g = 8 I^{0.65} = 8 \times (3^{0.65}) = 16.34 \text{ m}$$

$$\Rightarrow r_c = r_s = r_g = 16.34 \text{ m}$$

برای ناحیه مابین سیم‌های حفاظتی حداقل ارتفاع حفاظتی فراهم شده را با توجه به شکل‌های (۳-۳۳)، (۳-۳۸) و (۳-۳۹) و با استفاده از معادله (۳-۱۲) تعیین می‌کنیم:

$$R_c = \frac{7.5}{2} = 3.75 \text{ m}, \quad h = 13 \text{ m}$$

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} = 13 - 16.34 + \sqrt{(16.34)^2 - (3.75)^2}$$

$$y_{mc} = 12.56 \text{ m}$$

از آنجا که مقدار y_{mc} بزرگتر از ارتفاع بلندترین تجهیزات مابین سیم‌های حفاظتی (۱۰ متر) می‌باشد، تجهیزات مابین این سیم‌های گارد از حفاظت مناسب برخوردار می‌باشند. لذا آرایش فعلی سیم‌های گارد برای ناحیه داخلی بی‌ها مناسب می‌باشد.

در مورد ناحیه مابین بی‌ها، همانند قبل به علت کوچک بودن فاصله بین بی‌ها و در نتیجه کوچک بودن فاصله بین سیم‌های گارد مجاور هم، نیازی به بررسی کمی وضعیت حفاظتی این ناحیه نمی‌باشد و قطعاً این ناحیه دارای حفاظت موثر خواهد بود.

برای نواحی بیرونی بی‌ها نیز همانند قبل، ارتفاع حفاظتی را در ناحیه بیرونی سیم‌های گارد مورد بررسی قرار می‌دهیم. از شکل‌های (۳-۳۳) و (۳-۴۰) و با استفاده از معادله (۳-۱۳) و شکل (۳-۷) خواهیم داشت:

$$a = 1 \text{ m}, \quad h = 13 \text{ m}, \quad r_c = r_g = r_s = 16.34 \text{ m}$$

$$a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} = \sqrt{(16.34)^2 - (16.34 - 13)^2}$$

$$\Rightarrow a_0 = 16 \text{ m}$$

$$R_{po} = a_0 - a = 16 - 1 = 15 \text{ m}$$

$$R_{po} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad y = r_g - \sqrt{r_c^2 - R_{po}^2}$$

$$y = 16.34 - \sqrt{16.34^2 - 15^2}$$

$$\Rightarrow y = 9.86 \text{ m}$$

از آنجا که این ارتفاع حفاظتی فراهم شده (۹/۸۶ متر) از ارتفاع بلندترین تجهیزات این ناحیه (۷ متر) بزرگتر است، نتیجه می‌گیریم که نحوه قرارگیری سیمهای حفاظتی مناسب بوده و آنها قادر به فراهم آوردن حفاظت مناسب برای تجهیزات این ناحیه هستند.

از دو روشی که جهت بررسی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات داخل و خارج بی‌های ۶۳ کیلوولت مورد استفاده قرار گرفت، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم گارد طراحی شده برای بی‌های ۶۳ کیلوولتی قادر به ایجاد حفاظت موثر برای نواحی داخل و بیرون این بی‌ها می‌باشد.

۳-۵-۵-۳- بررسی سیستم حفاظت از صاعقه برای تجهیزاتی که در حد فاصل بین بی‌های ۲۳۰ کیلوولت و ۶۳ کیلوولت قرار می‌گیرند.

آرایش مربوط به نحوه قرارگیری سیمهای حفاظتی مابین بی‌های ۲۳۰ کیلوولت و ۶۳ کیلوولت در شکل‌های (۳-۳۳) و (۳-۴۱) نشان داده شده است. این سیمهای حفاظتی باید قادر باشند نواحی حفاظتی مناسبی را برای تجهیزاتی که در حد فاصل بین بی‌های ۲۳۰ و ۶۳ کیلوولت قرار گرفته‌اند، فراهم نمایند.

محاسبه دقیق نواحی حفاظتی در این موارد خاص که خارج از فرم متداول قرارگیری سیمهای گارد است، تنها از طریق روش مدل الکتروهندسی قابل بررسی بوده و عموماً نیازمند شبیه‌سازی کامپیوتری جهت محاسبه دقیق ارتفاعهای حفاظتی فراهم شده می‌باشد. با این حال بطور تقریبی می‌توان در مورد نواحی حفاظتی اظهار نظر نمود. سیمهای گارد که بی ۲۳۰ کیلوولتی را به بی‌های ۶۳ کیلوولتی متصل می‌کنند و از روی ترانسفورماتورهای قدرت عبور می‌کنند، ارتفاعشان در حال تغییر بوده و از مقدار ماکزیمم ۲۴ متر آغاز شده و تا ارتفاع ۱۳ متر بر روی بی‌های ۶۳ کیلوولتی ادامه پیدا می‌کنند. در این حین حداقل ارتفاع حفاظتی مابین سیمهای گارد نیز براساس نتایج بدست آمده از مراحل قبلی از ۲۲/۶۵ متر در بی ۲۳۰ کیلوولتی آغاز شده و بطور تقریباً یکنواختی به مقدار ۱۲/۵۶ متر در بی ۶۳ کیلوولتی ختم می‌شود. اگر تغییرات ارتفاع سیمهای حفاظتی و بلندترین هادیهای ارتباطی بین دو بی را مشابه تغییرات حداقل ارتفاع حفاظتی فراهم شده مابین سیمهای حفاظتی مابین دو بی ۲۳۰ و ۶۳ کیلوولتی فرض نماییم، می‌توان اطمینان حاصل نمود که این سیمها ناحیه حفاظتی موثری را برای ترانسفورماتورها و هادیهای مابین دو بی فراهم می‌آورند. به این جهت که ارتفاع

بالاترین هادی متصل بین دو بی ۲۳۰ و ۶۳ کیلوولت از حداکثر مقدار ۲۰ متر در بی ۲۳۰ کیلوولتی به مقدار حداقل ۱۰ متر در بی ۶۳ کیلوولتی کاهش می‌یابد و این ارتفاعها همواره از حداقل ارتفاع حفاظتی فراهم شده مابین سیمهای گارد کمتر می‌باشند. در مورد سیمهای گاردی که بی ۲۳۰ کیلوولتی غربی را به بی ۶۳ کیلوولتی غربی متصل می‌کند نیز می‌توان استدلالی مشابه فوق عرضه نمود. در این حالت حداقل ارتفاع حفاظتی مابین سیمهای حفاظتی از مقدار حداکثر ۲۴ متر (نقطه اتصال سیمهای حفاظتی به هم) تا مقدار حداقل ارتفاع حفاظتی مابین سیمهای گارد در محل بی ۶۳ کیلوولتی غربی کاهش پیدا می‌کند. این ارتفاع را می‌توان با توجه به شکل (۳-۳۳)، (۳-۳۸) تا (۳-۴۱) و با استفاده از معادلات (۳-۹) و (۳-۱۲) به صورت زیر محاسبه نمود:

$$I = 3KA, r_s = r_c = r_g = 16.34m$$

$$R_c = (3 \times 7.5)/2 = 11.25m, h = 13m$$

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} = 13 - 16.34 + \sqrt{16.34^2 - 11.25^2}$$

$$y_{mc} = 8.51m$$

از آنجا که ارتفاع تجهیزاتی که مابین این دو بی قرار گرفته‌اند کوچکتر از حداقل این ارتفاعات است، پس می‌توان اطمینان حاصل نمود که این تجهیزات در مقابل صاعقه حفاظت شده خواهند بود.

برای حفاظت تجهیزات قرار گرفته در مدخلهای ورودی و خروجی بی‌ها که خطوط انتقال به آنها متصل هستند، با اتصال مناسب سیمهای گارد این دکلها به گنتریهایی بی‌های مختلف می‌توان این تجهیزات را هم در مقابل صاعقه حفاظت نمود. استدلالهای مشابه آنچه که در بالا ارائه گردید را می‌توان در مورد سیمهای گاردی که در ورودی و خروجی بی‌ها به دکلهای خطوط انتقال متصل می‌شوند (این تجهیزات در شکل (۳-۳۳) با نقطه چین نشان داده شده‌اند) عرضه نمود.

۳-۵-۴- محاسبه نرخ قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده

از آنجایی که در پست موردنظر تنها از سیمهای گارد استفاده گردیده است، از مطالب بخش (۳-۳-۸-۱) می‌توان تعداد قوسهای ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه طراحی شده را بدست آورد. از رابطه (۳-۳۱) خواهیم داشت:

$$SFFOR = 0.05 \quad \text{Failure /100 km - Year}$$

$$L \approx 1500m = 1.5km$$

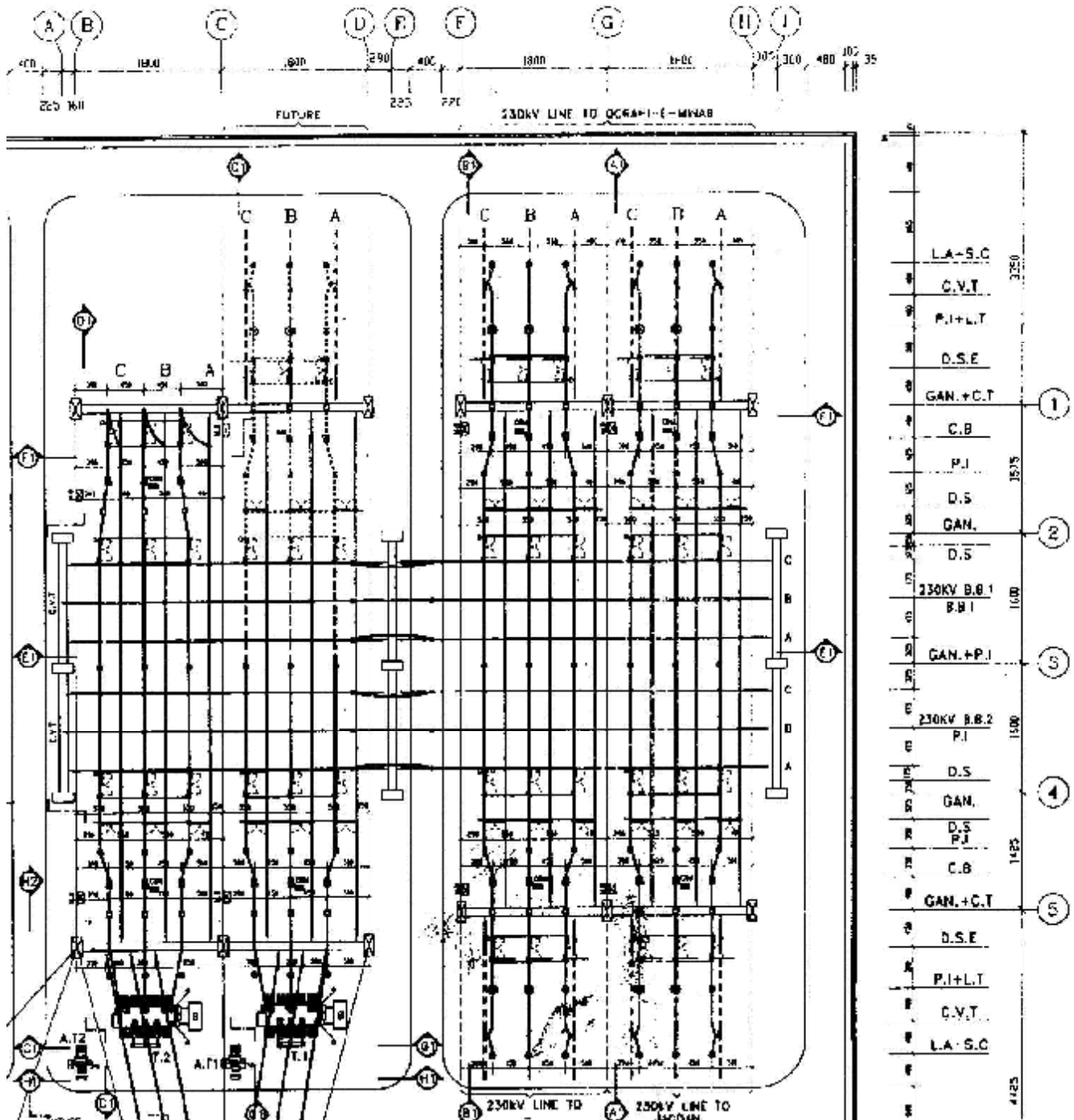
$$SFFOR_T \approx SFFOR \times L = 0.05 \times \frac{1.5}{100} = 7.5 \times 10^{-4}$$

متوسط فاصله زمانی بین وقوع هر قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه با استفاده از رابطه

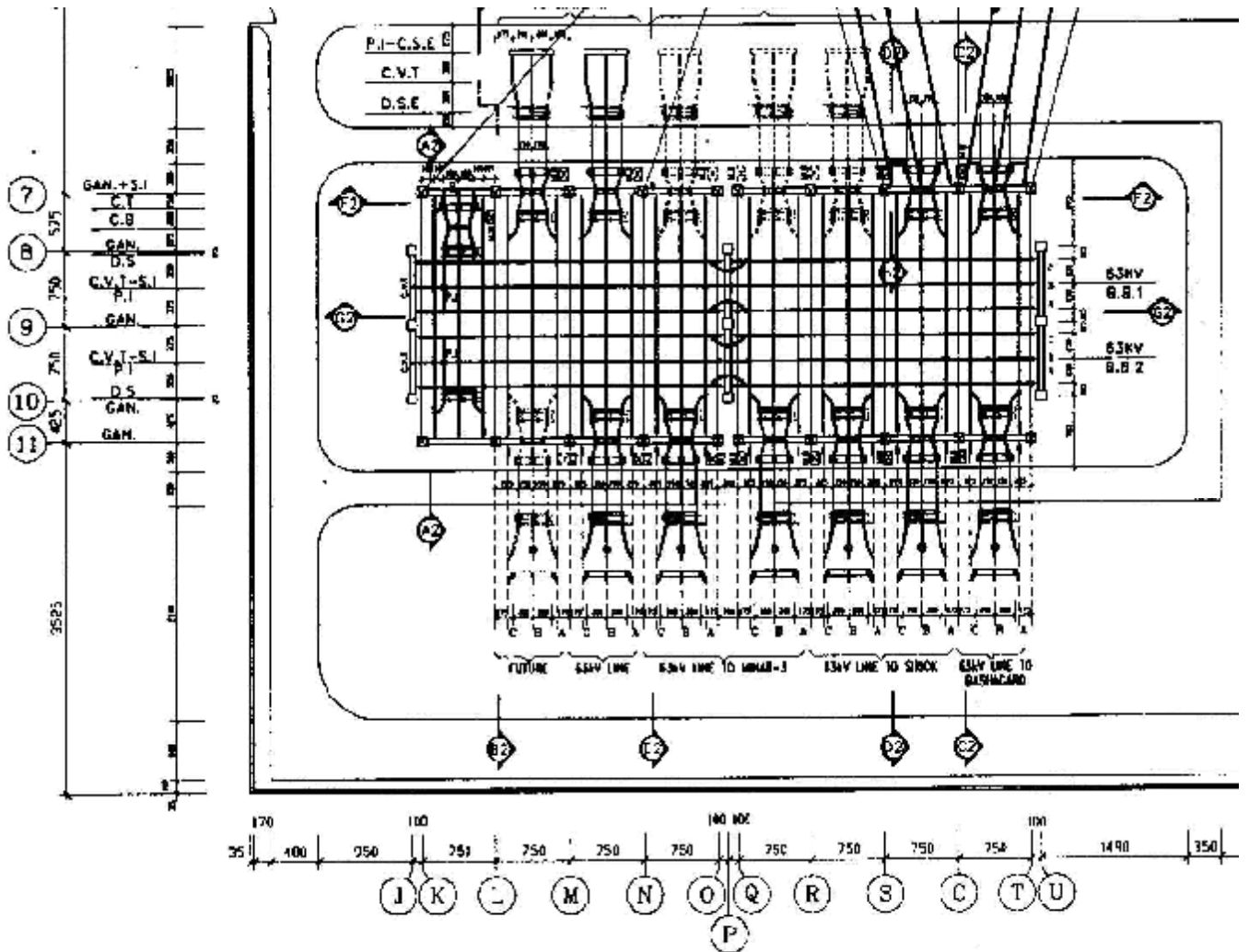
(۳-۳۲) برابر است با:

$$MTBF = \frac{1}{SFFOR_T} = \frac{1}{7.5 \times 10^{-4}} = 1333.34 \text{ year}$$

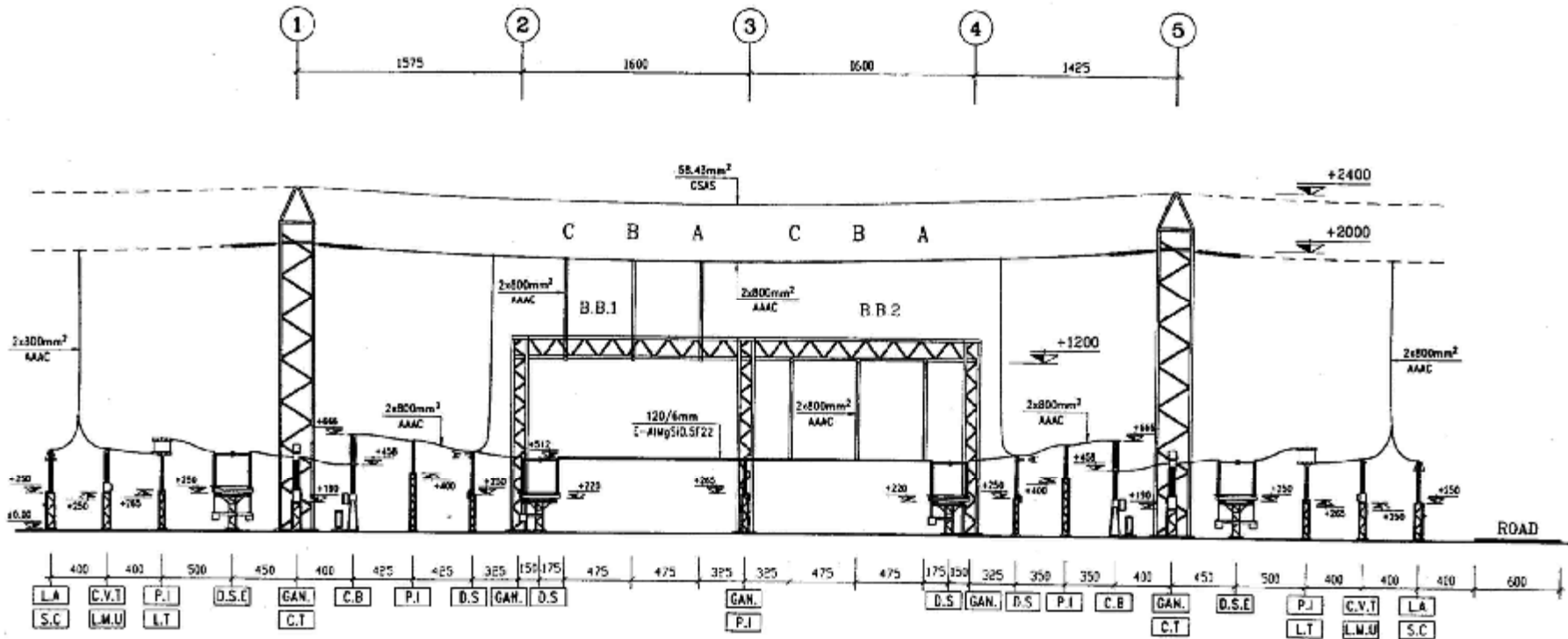
میزان خطای بدست آمده برای سیستم حفاظت از صاعقه از مقدار مطلوب برای طراحی سیستم حفاظت از صاعقه پستها (۰/۰۰۱) قوس در هر سال) کوچکتر بوده و لذا سیستم حفاظتی طراحی شده دارای حفاظت مناسب می‌باشد.



شکل ۳-۳۳: الف- نقشه جانمایی سمت ۲۳۰ کیلوولت پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است.



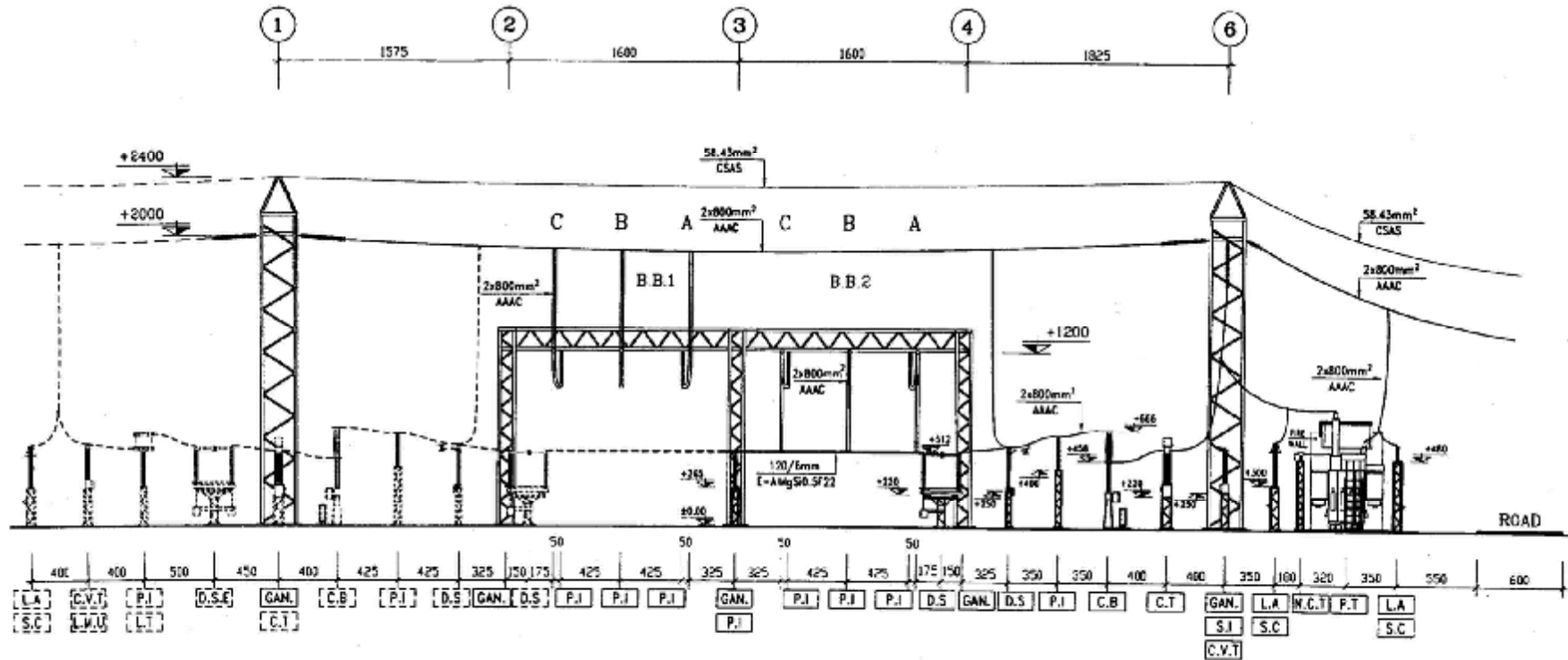
شکل ۳-۳۳: ب- نقشه جانمایی سمت ۶۳ کیلوولت پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است.



SECTION A1-A1

SCALE 1:300

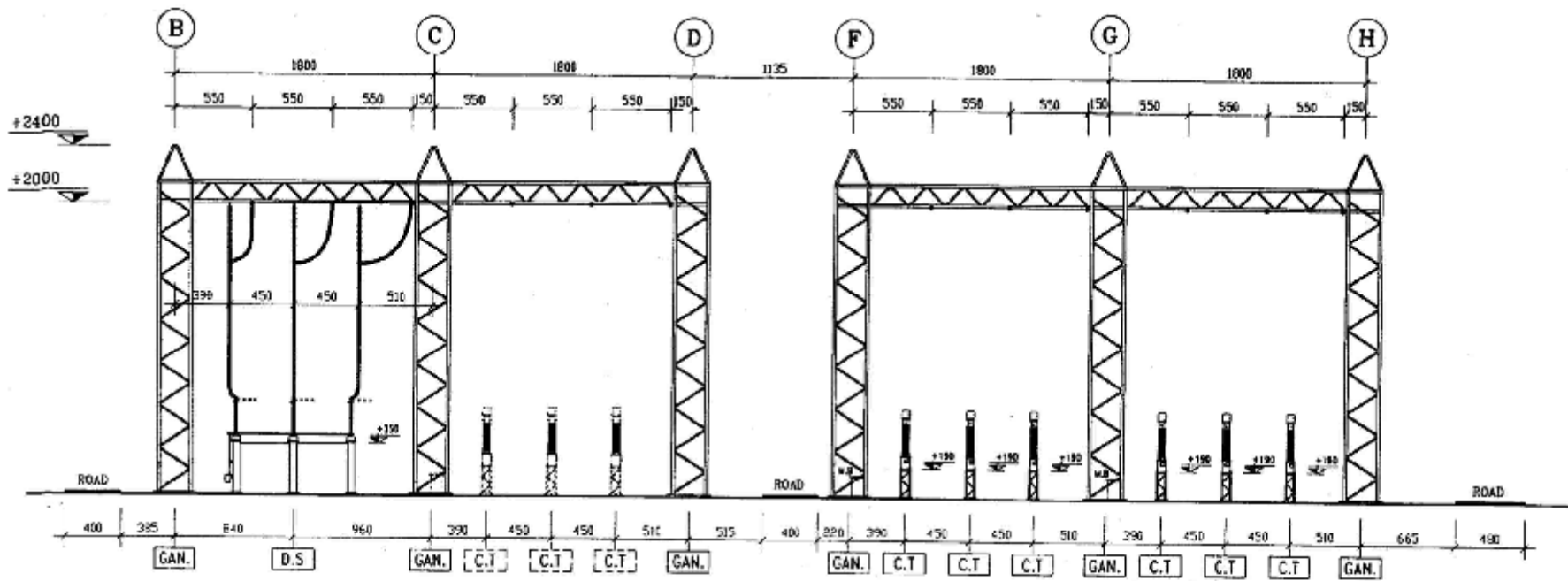
شکل ۳-۳۴: نقشه‌های مقاطع پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است.



SECTION C1-C1

SCALE 1:300

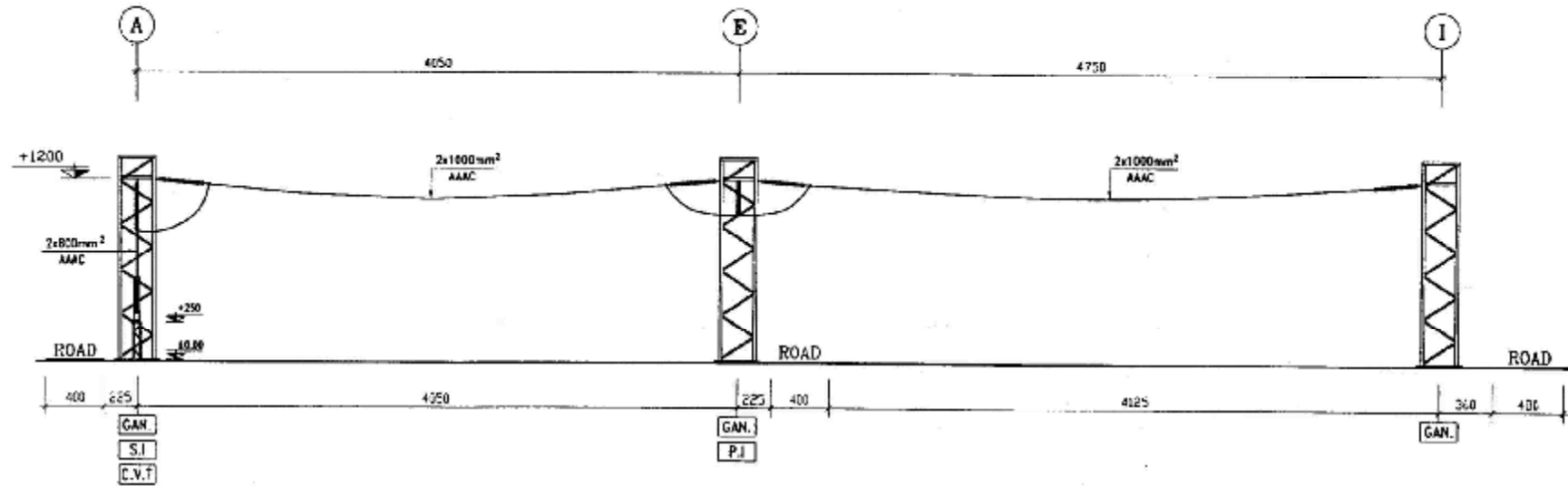
شکل ۳-۳۵: نقشه‌های مقاطع پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است.



SECTION F1 - F1

SCALE 1:300

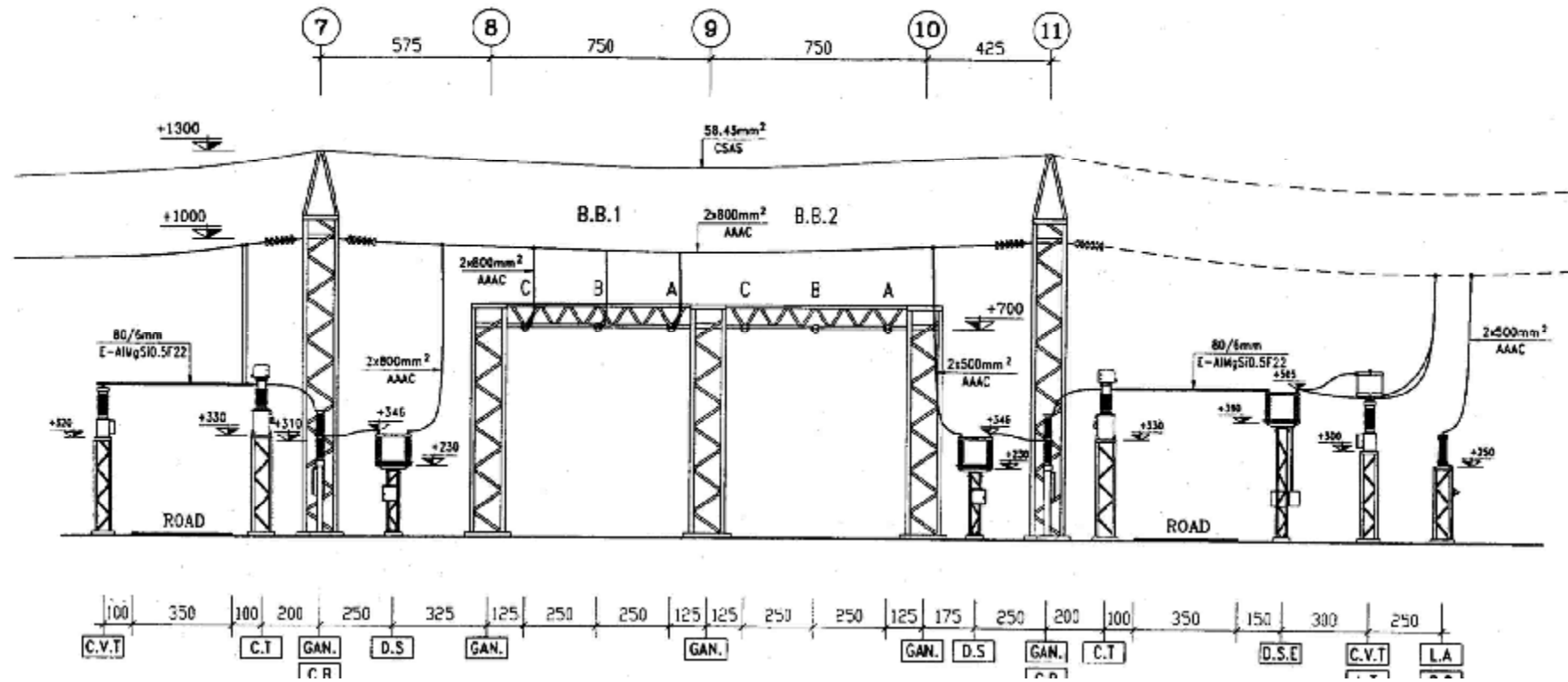
شکل ۳-۳۶: نقشه‌های مقاطع پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است.



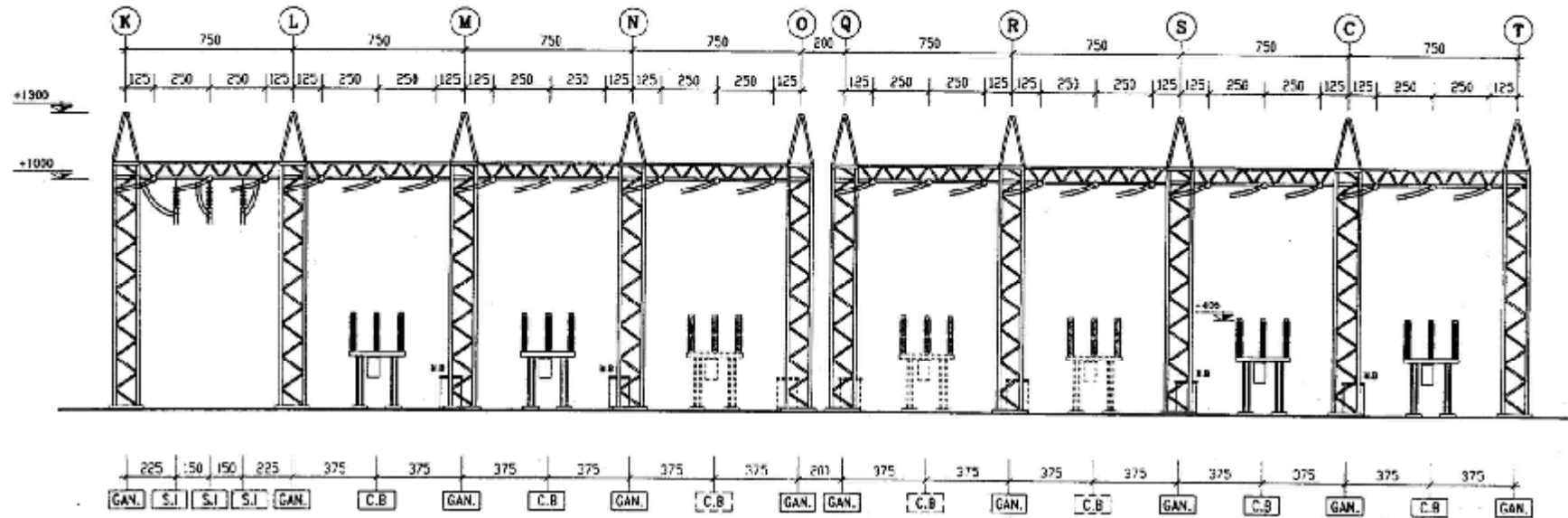
SECTION E1-E1

SCALE 1:300

شکل ۳-۳۷: نقشه‌های مقاطع پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است.



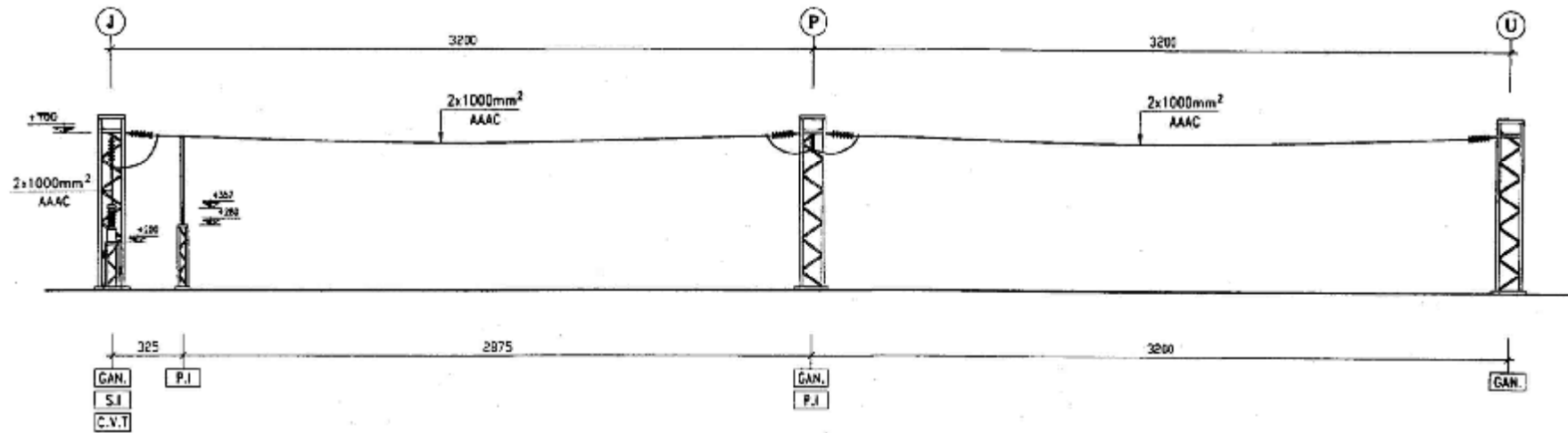
شکل ۳-۳۸: نقشه‌های مقاطع پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است.



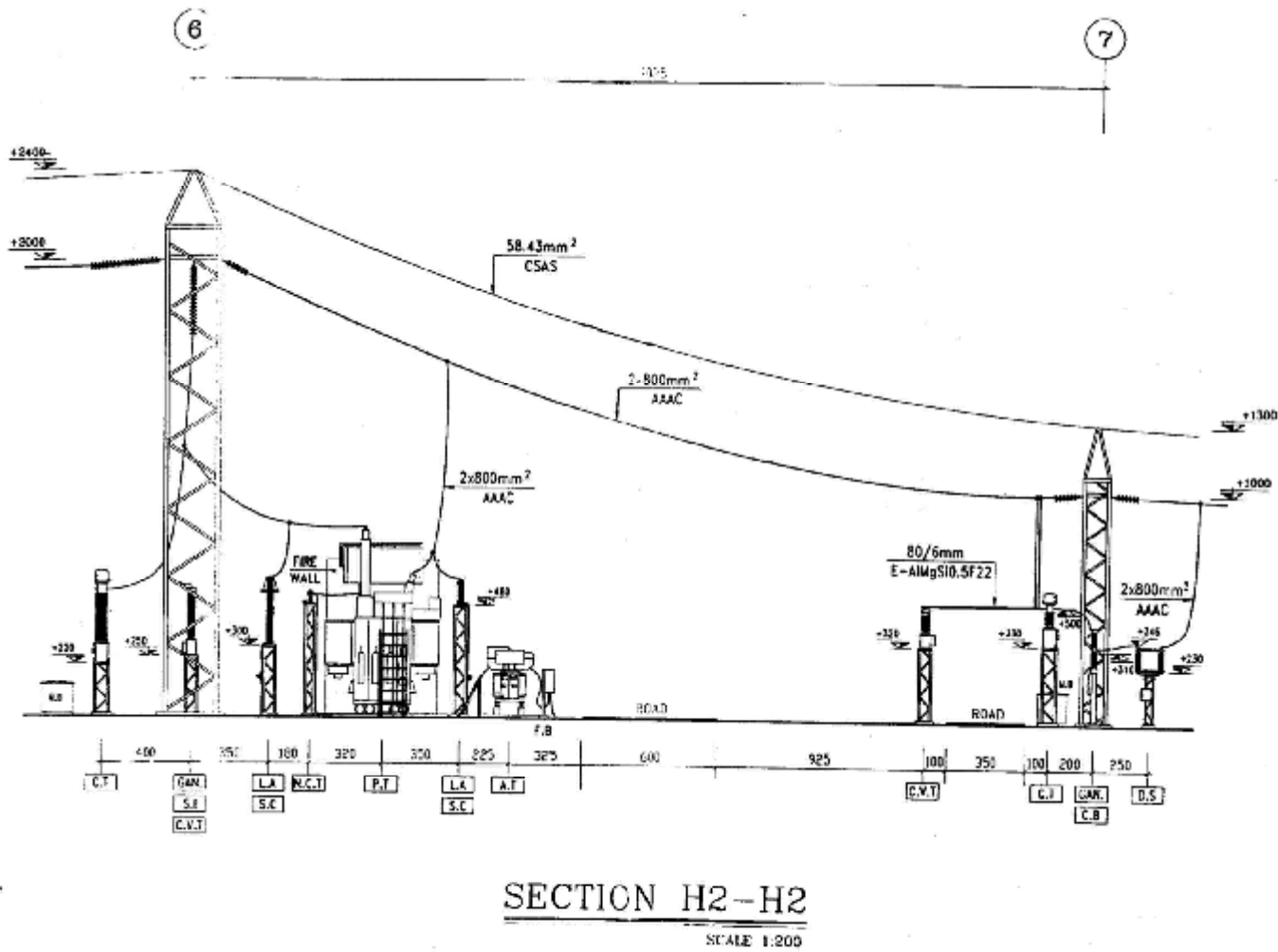
SECTION F2-F2

SCALE 1:200

شکل ۳-۳۹: نقشه‌های مقاطع پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است



شکل ۳-۴: نقشه‌های مقاطع پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است.

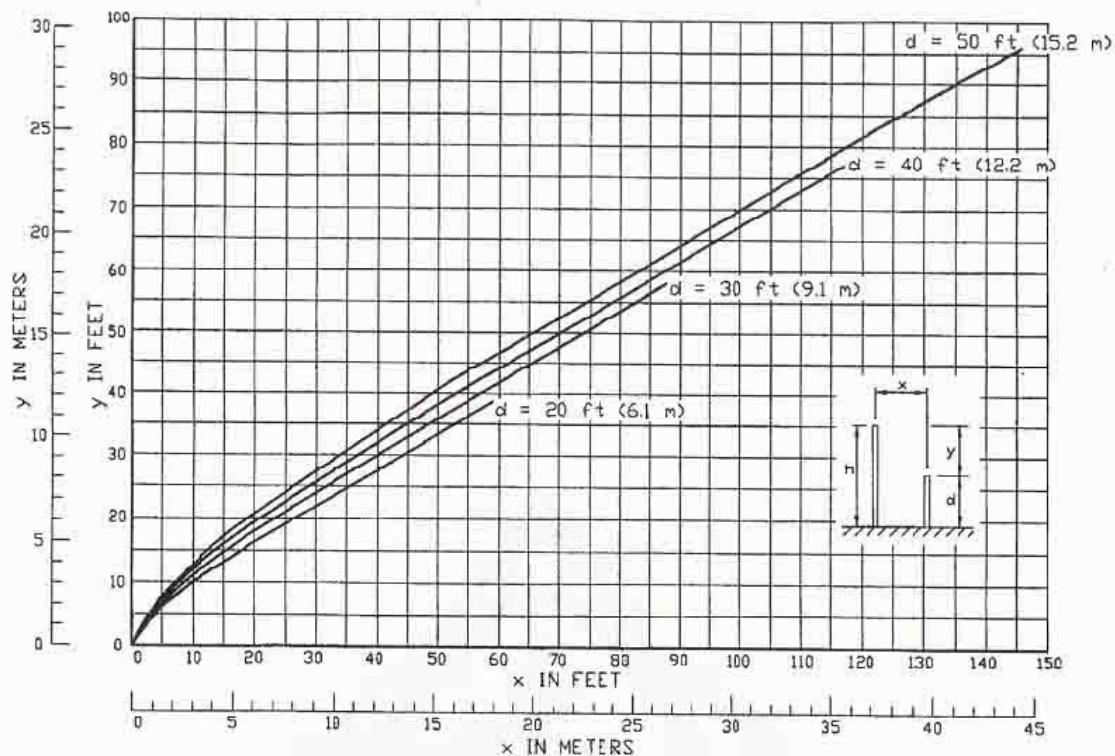


شکل ۳-۴۱: نقشه‌های مقاطع پستی که در مثال دوم طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه استفاده شده است.

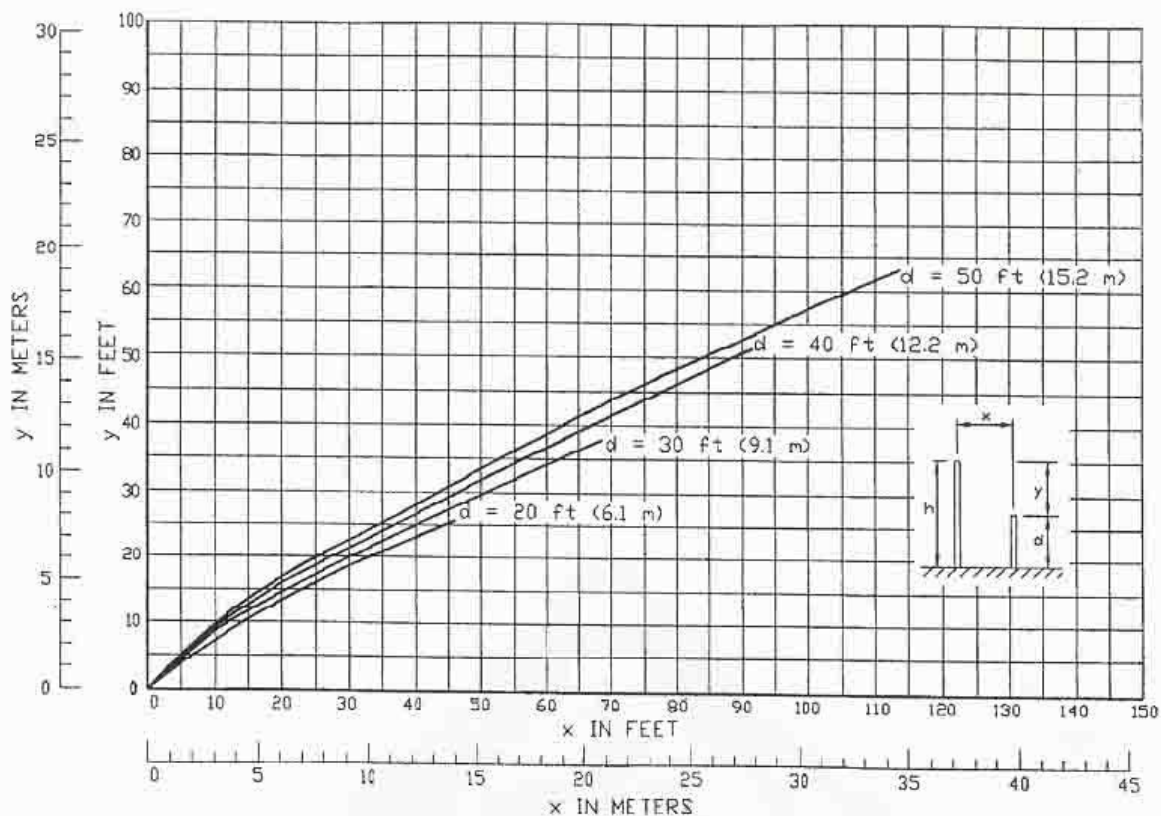
پیوست (۱-۳)

منحنی‌های تجربی طراحی سیستم

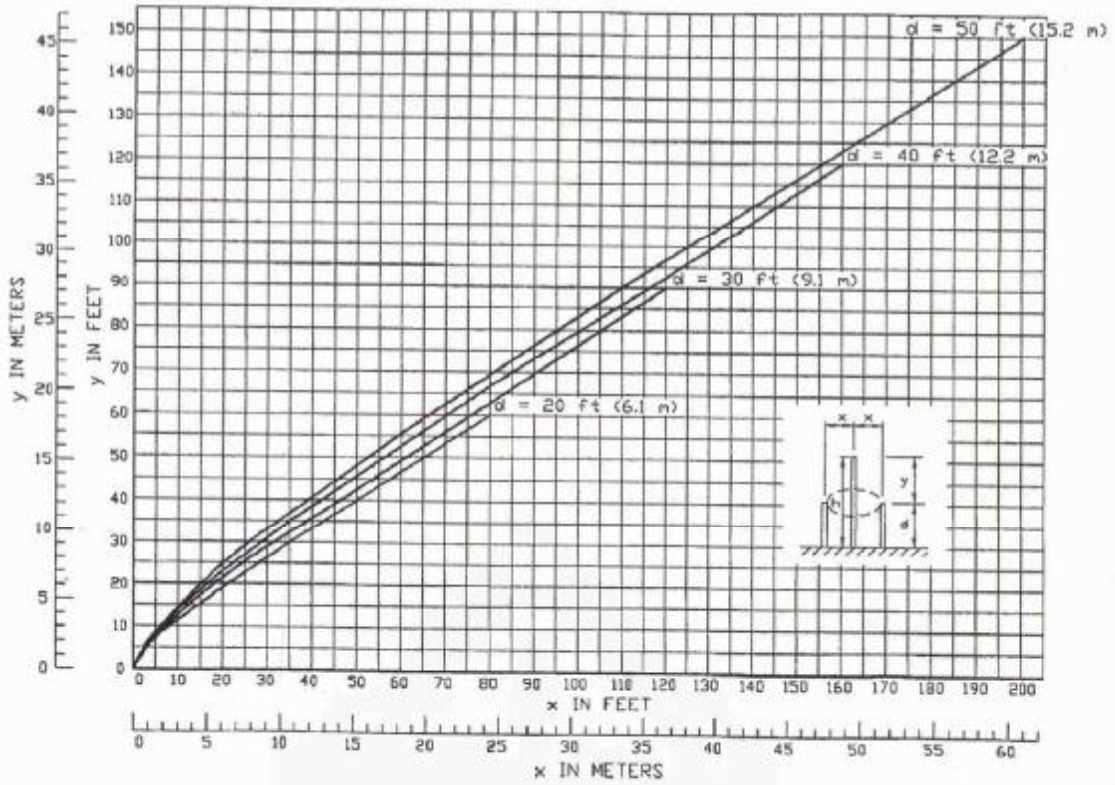
حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه



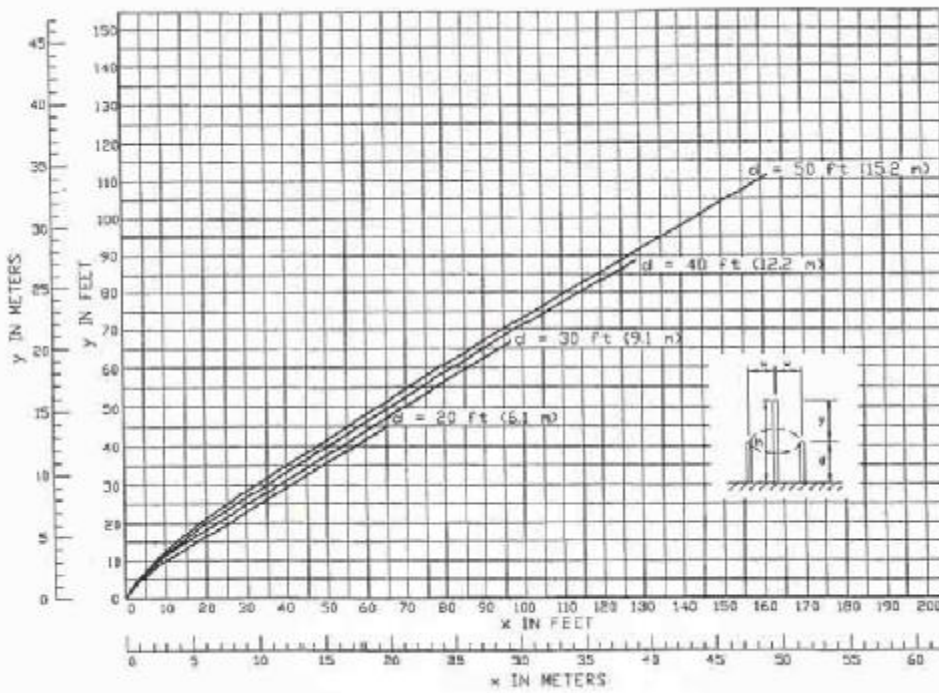
شکل الف - ۱: یک میله حفاظتی به همراه یک تجهیز منفرد با $SFR=0.1\%$



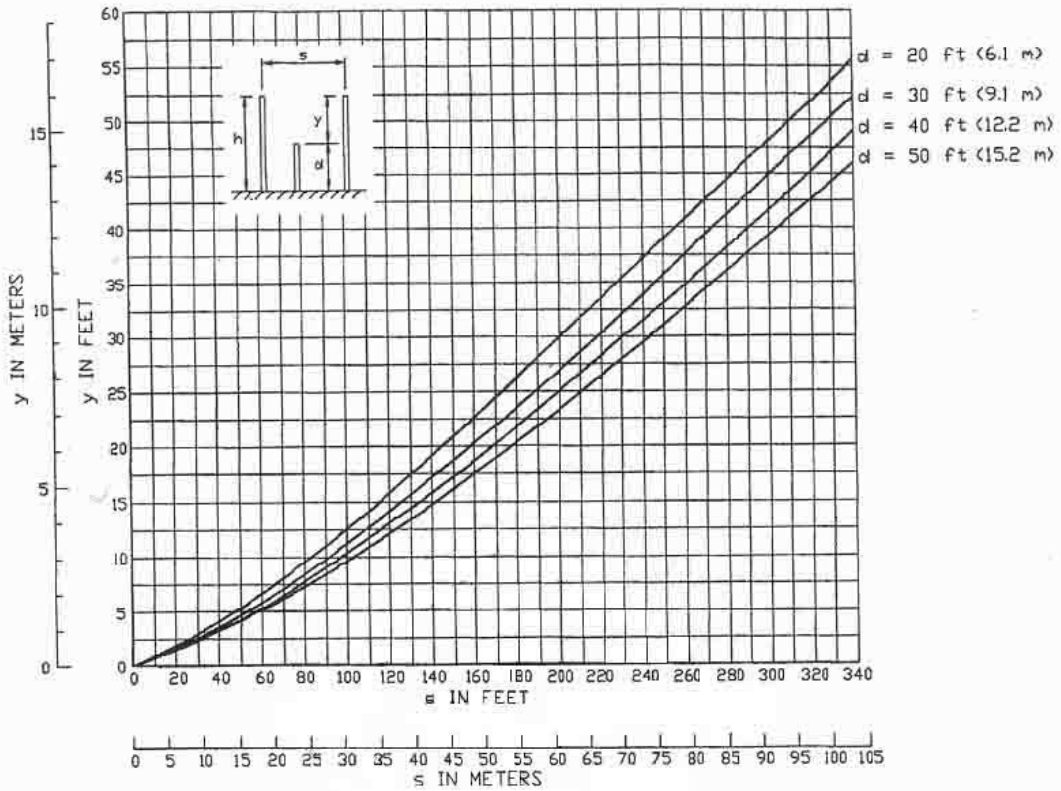
شکل الف - ۲: یک میله حفاظتی به همراه یک تجهیز منفرد با $SFR=1\%$



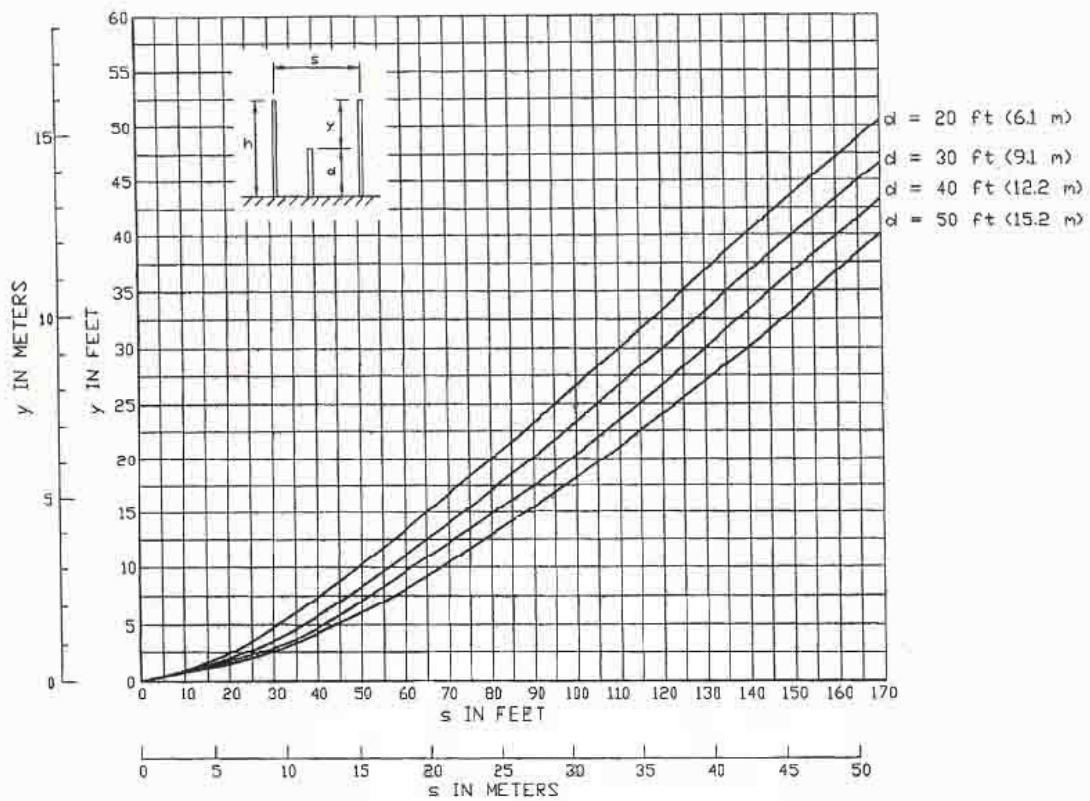
شکل الف - ۳: یک میله حفاظتی به همراه یک سری از تجهیزات در محدوده دایره‌ای به شعاع x به مرکزیت میله حفاظتی با $SFR=0.1\%$



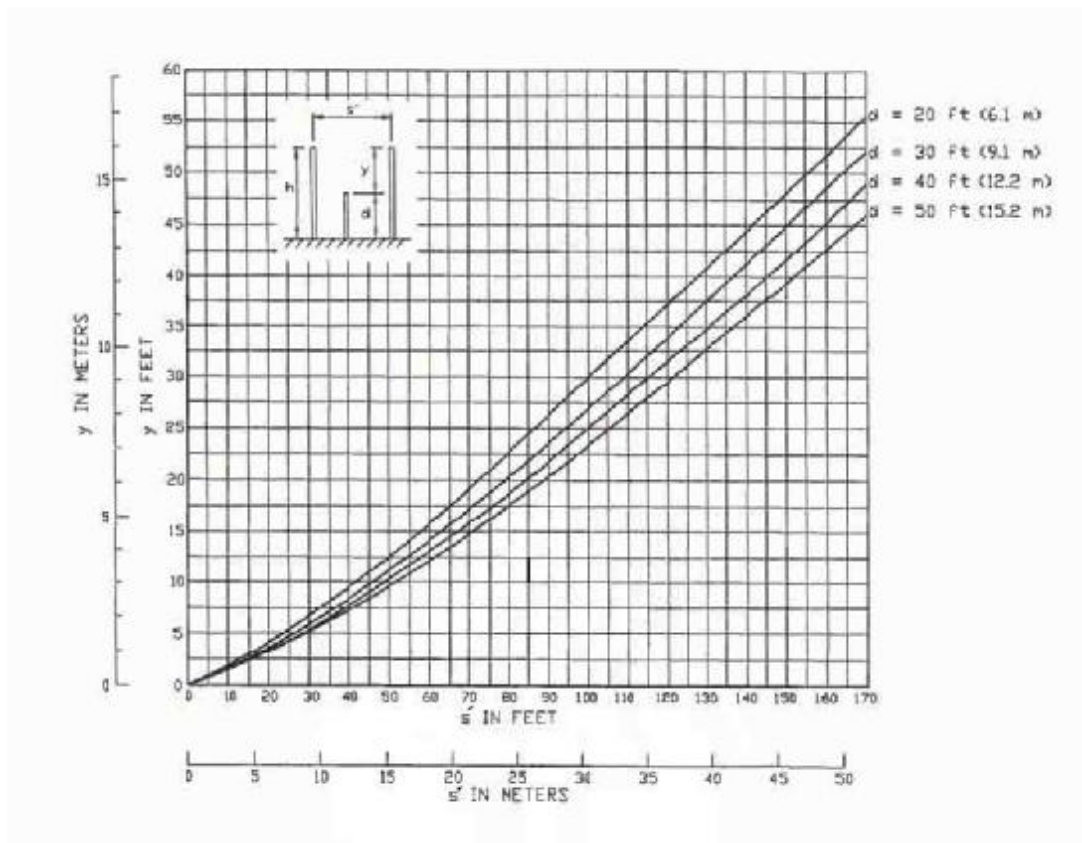
شکل الف - ۴: یک میله حفاظتی به همراه یک سری از تجهیزات در محدوده دایره‌ای به شعاع x به مرکزیت میله حفاظتی با $SFR=1\%$



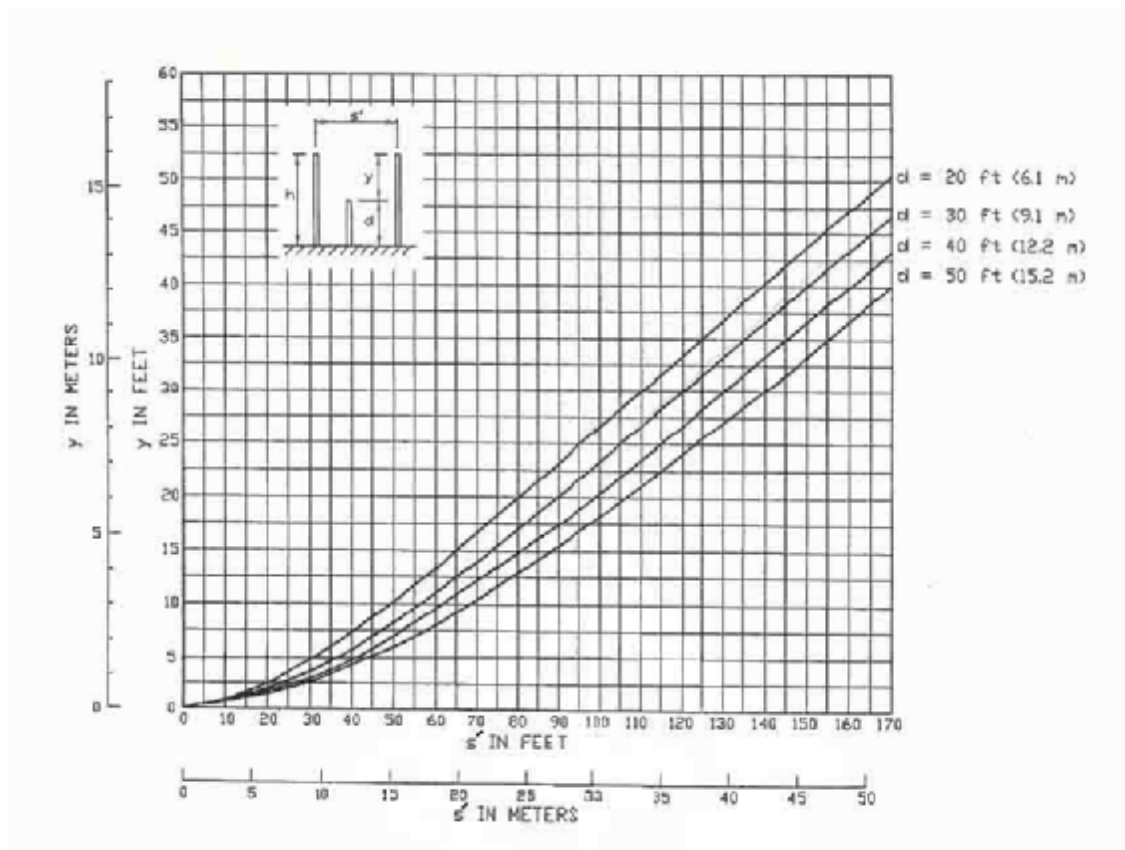
شکل الف - ۵: دو میله حفاظتی به همراه یک تجهیز منفرد با $SFR=0.1\%$



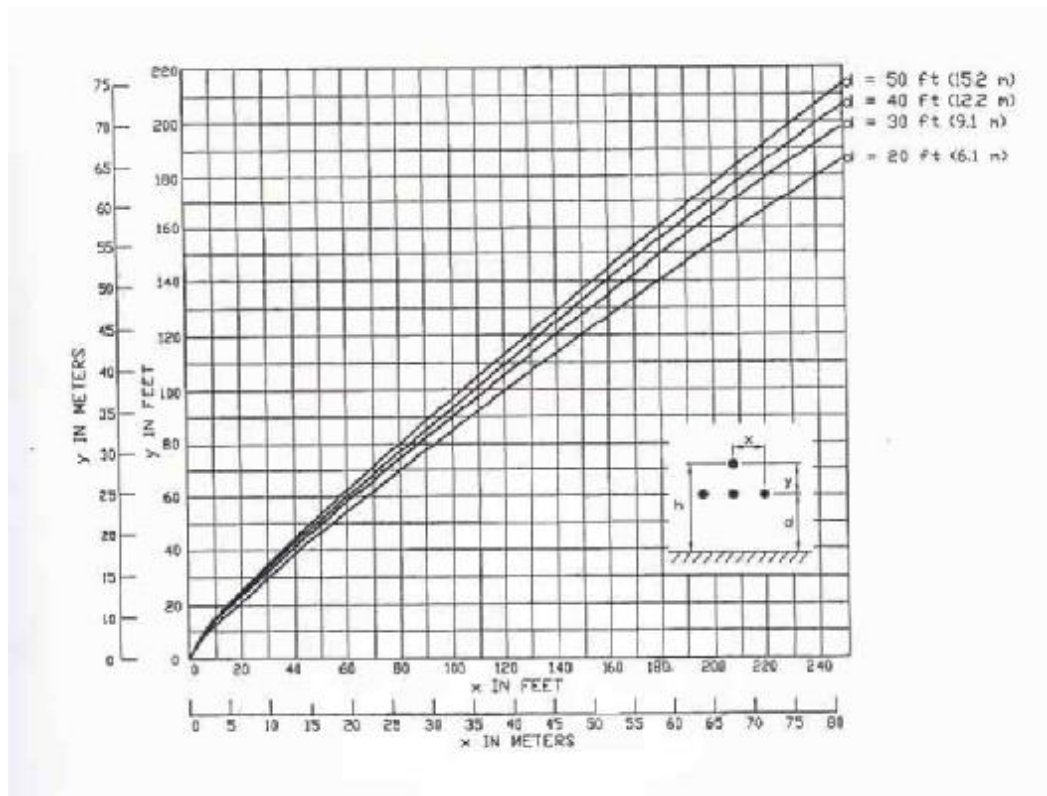
شکل الف - ۶: دو میله حفاظتی به همراه یک تجهیز منفرد با $SFR=1\%$



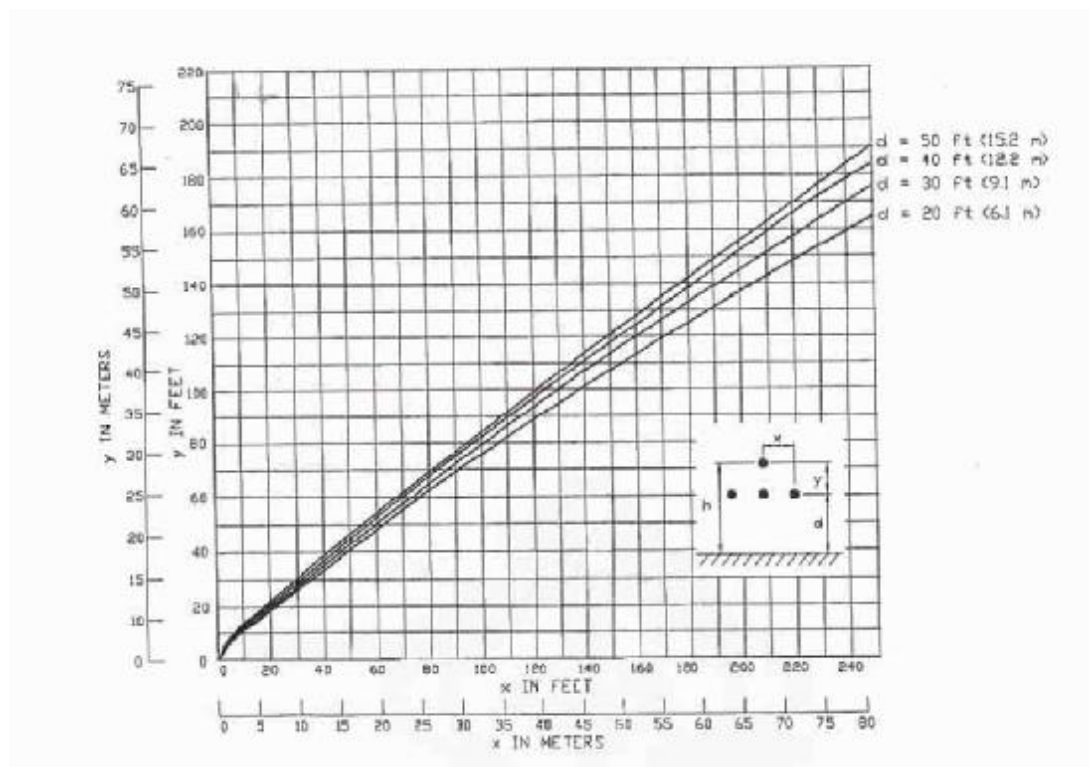
شکل الف - ۷: دو میله حفاظتی به همراه یک تجهیز منفرد که ناحیه حفاظتی آنها یکدیگر را پوشش می‌دهند با $SFR=0.1\%$



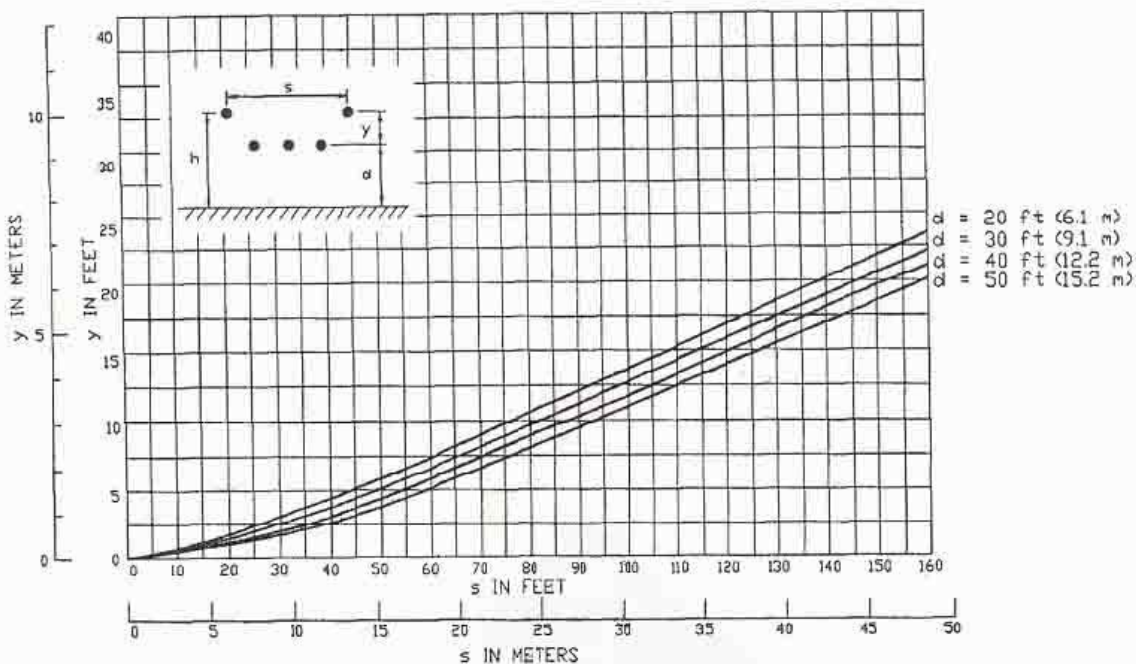
شکل الف - ۸: دو میله حفاظتی به همراه یک تجهیز منفرد که ناحیه حفاظتی آنها یکدیگر را پوشش می‌دهند با $SFR=1\%$



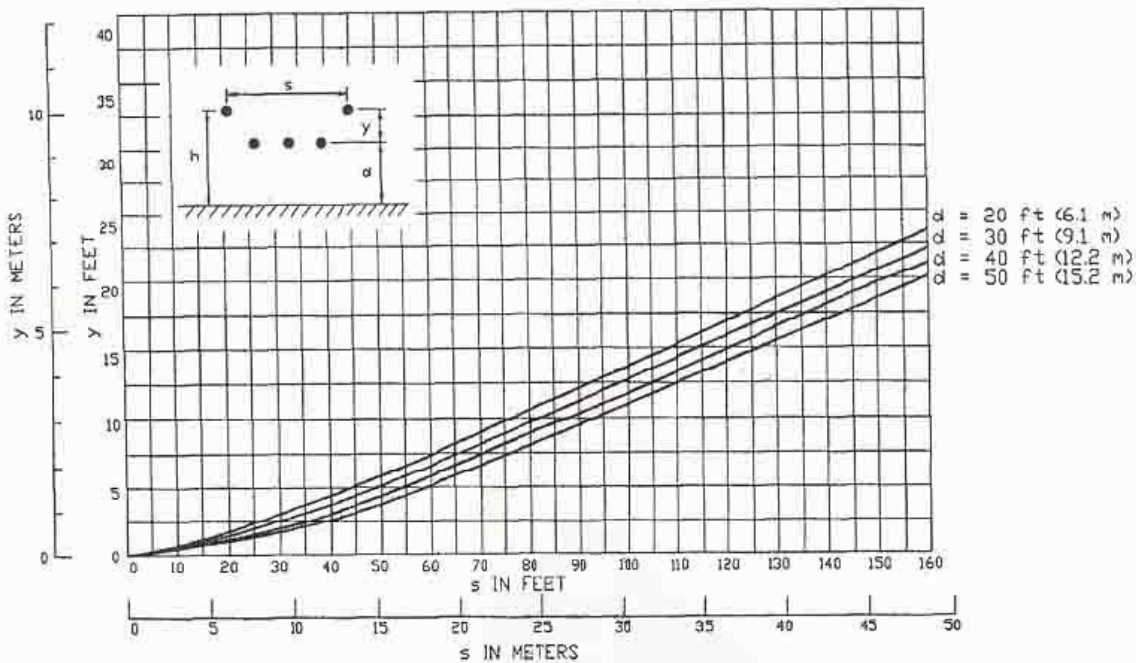
شکل الف - ۹: یک سیم حفاظتی به همراه هادیهای افقی حفاظت شده با $SFR=0.1\%$



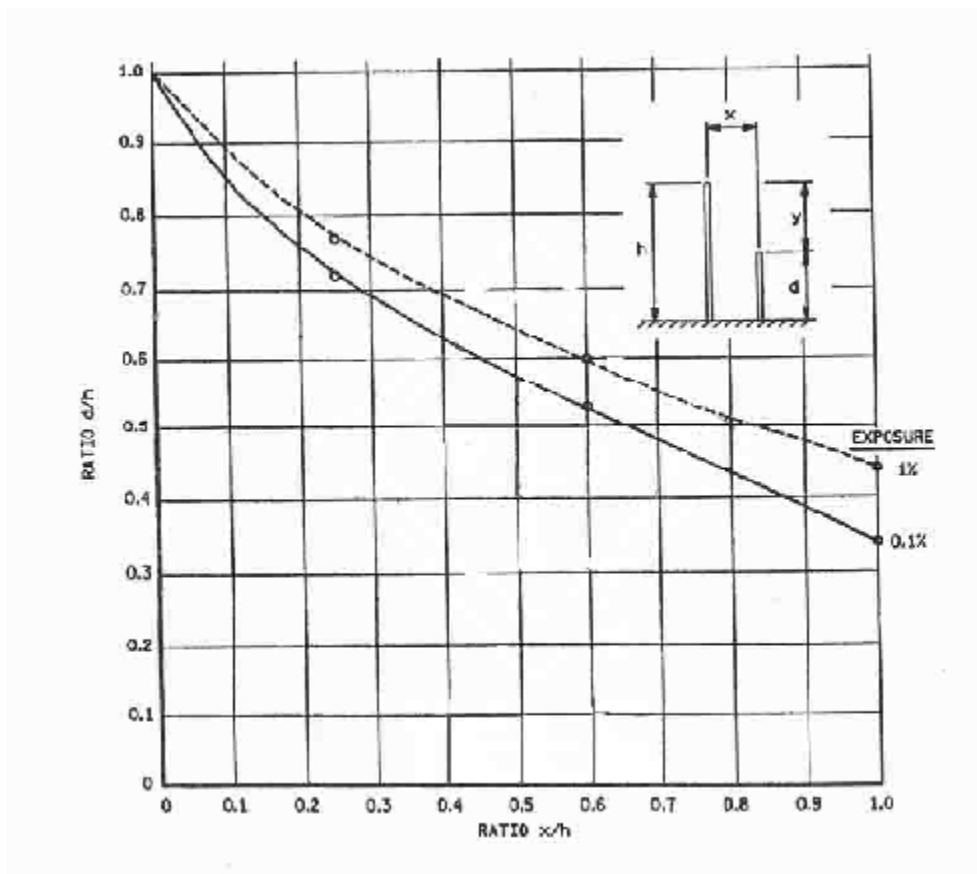
شکل الف - ۱۰: یک سیم حفاظتی به همراه هادیهای افقی حفاظت شده با $SFR=1\%$



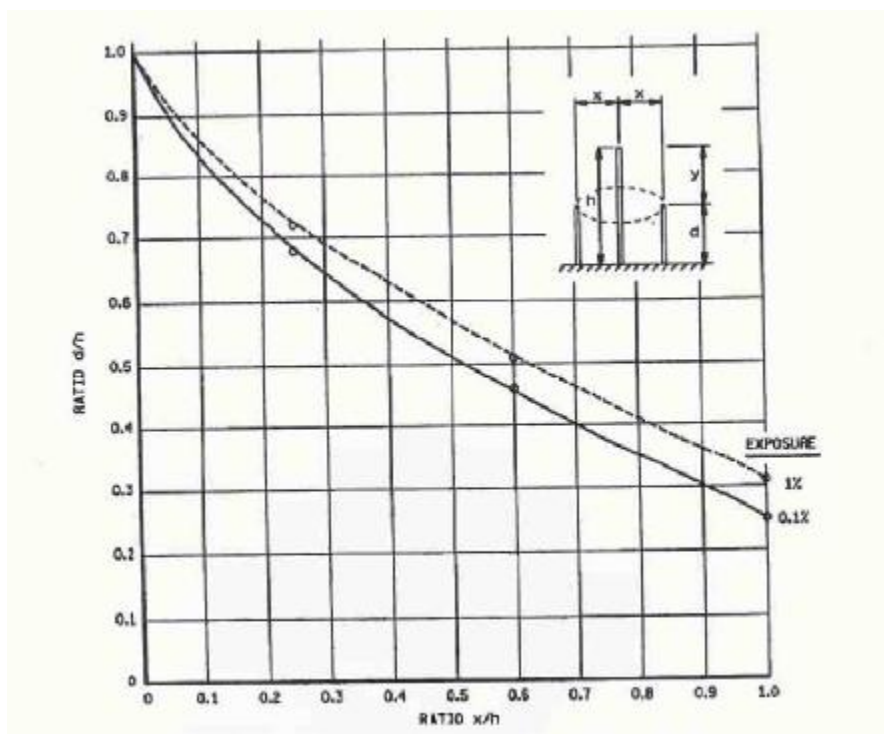
شکل الف - ۱۱: دو سیم حفاظتی به همراه هادیهای افقی حفاظت شده با $SFR=0.1\%$



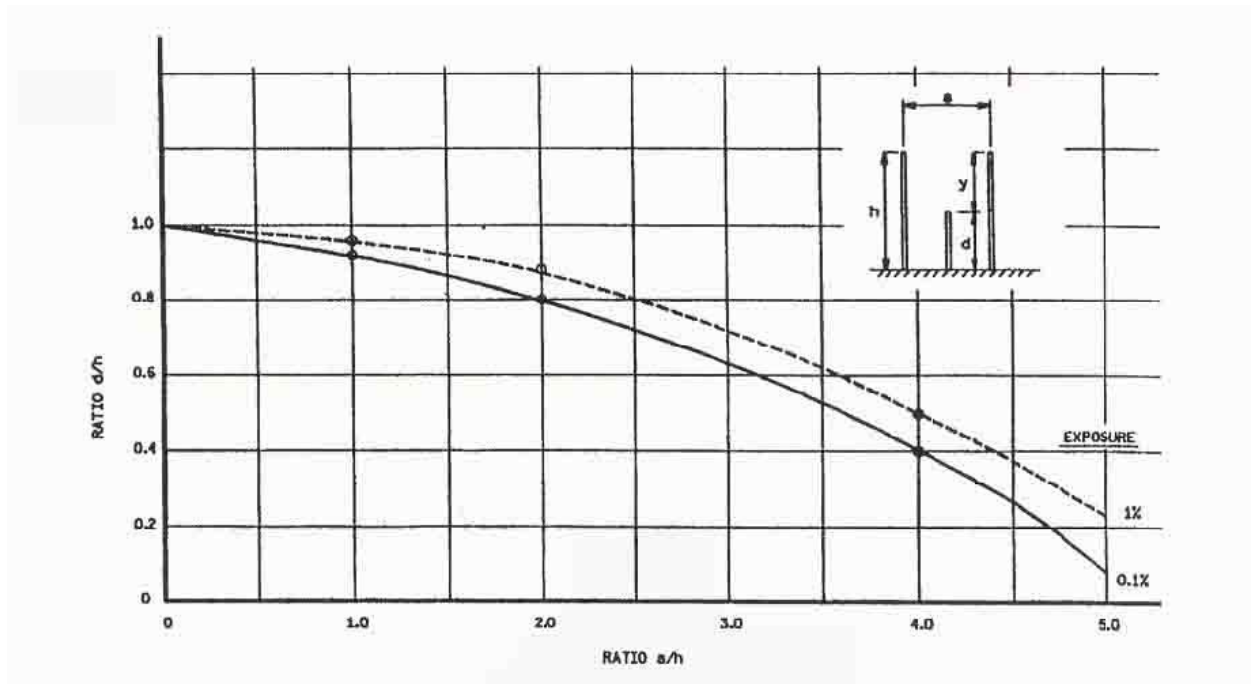
شکل الف - ۱۲: دو سیم حفاظتی به همراه هادیهای افقی حفاظت شده با $SFR=1\%$



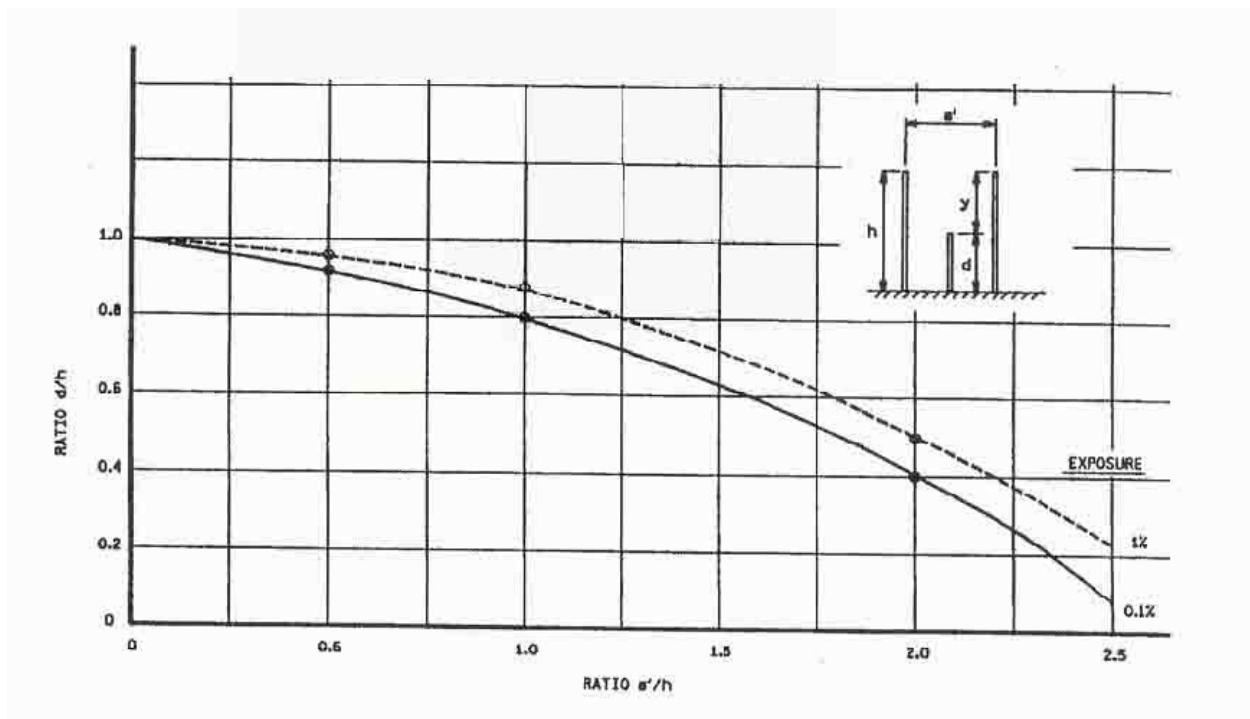
شکل الف - ۱۳: یک میله حفاظتی به همراه یک تجهیز منفرد با $SFR=0.1, 1$ درصد



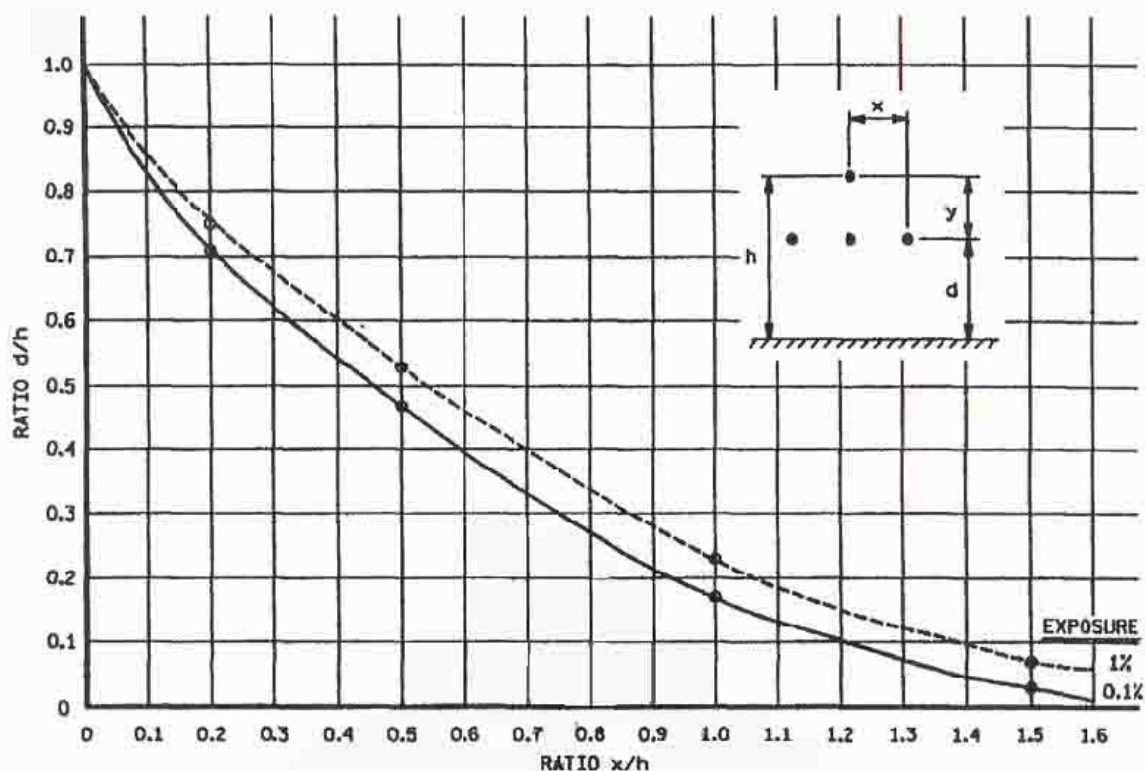
شکل الف - ۱۴: یک میله حفاظتی به همراه یک سری از تجهیزات در محدوده دایره‌ای به شعاع x به مرکزیت میله حفاظتی با $SFR=0.1, 1$ درصد



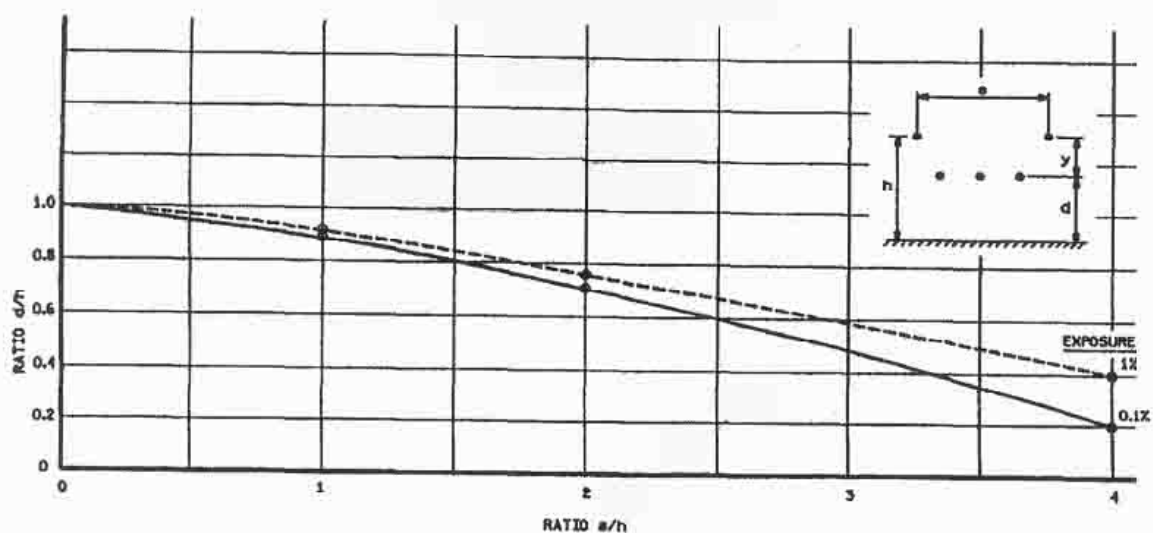
شکل الف - ۱۵: دو میله حفاظتی به همراه یک تجهیز منفرد با $SFR=0.1, 1$ درصد



شکل الف - ۱۶: دو میله حفاظتی به همراه یک تجهیز منفرد که ناحیه حفاظتی آنها یکدیگر را پوشش می‌دهند با $SFR=0.1, 1$ درصد



شکل الف - ۱۷: یک سیم حفاظتی به همراه هادیهای افقی حفاظت شده با $SFR=0.1, 1$ درصد



شکل الف - ۱۸: دو سیم حفاظتی به همراه هادیهای افقی حفاظت شده با $SFR=0.1, 1$ درصد

- [1] IEEE Std 998, "IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding Of Substations"
- [2] Andrew, R. Hileman, "Insulation Coordination For Power Systems", ISBN: 0-8247-9957-7, 1999.
- [3] Darvenzia, M. Popolansky, F., and whitehead, E.R. , "Lightning Protection of UHV Transmission Lines," *Electra*, no 41, PP. 39-69, July 1975.
- [4] Anderson, J.G, Chapter 12 of Transmission Line Refrence Book 345 KV and Above, 2nd, Rev, Palo Alto, Calif. : Electric Power Research Instituted, 1987.
- [5] Whitehead, E.R, "CIGRE Surrey of the Lightning Performance of Electra High-Voltage Transmission Lines," *Electra*, no.33, pp.63-89, Mar. 1974.
- [6] IEEE Working Group, "A Simplified Mathod for Estimating Lightning Performance Transmission Lines," *IEEE Transaction on power apparatus and systems*, vol. PAS-104, No. 4, pp.919-932, 1985.
- [7] Suzuki, T., miyake, k., and shindo, T., "Discharge Path Model in Model Test of Lightning Strokes to Fall mast," *IEEE Transations on power apparatus and systems*, vol. PAS-100, no.7, pp. 3553-3562, 1981.
- [8] Mousa, A.M., and Srivastava, KD., "The Implications of the Electrogeometric Model Regarding Effect of Height of Structure on the Median Amplifudes of Collected Lightning Strokes," *IEEE Transations on power delivery*, Vol. 4, no.2 pp. 1450-1460, 1989.
- [9] Mac Gorman, D.R., et al., "Lighting Strike Density for the Contiguous United states from thunderstrom Duration Record", Report no. NVREG/CR-3759, National oceanic and Almospheric Admimistration, Norman, ok, may 1984.
- [10] Horvath, Tibor, computation of lightning protection, Taunton, Somerset, England : Research studies press Ltd, pp, 1991.
- [11] Wagner, C.F, Mccann, G.D, and Maclance, G.L., "Shielding of Transmission Lines," *AIEE Transaction*, vol. 60, pp.313-328, 612-614, 1941.
- [12] BS 6651, "Protection of Structures Against Lightning".

خواننده گرامی

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور با گذشت بیش از سی سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر چهارصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی <http://tec.mporg.ir> قابل دستیابی می‌باشد.

دفتر نظام فنی اجرایی

این نشریه

با عنوان «مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - سیستم حفاظت از برافورد مستقیم صاعقه در پست های فشار قوی» در دو جلد تهیه و تدوین شده است؛ بخش اول در بر گیرنده مداخل نیازهای کلی مربوط به طراحی، ساخت، بازرسی، آزمون های کارخانه ای، بر چسب گذاری، بسته بندی، حمل و نصب سیستم حفاظت از برافورد مستقیم صاعقه در پست های فشار قوی در رده ولتاژی ۳۳ تا ۴۰۰ کیلو ولت می باشد که به دو زبان فارسی و انگلیسی ارائه شده است.

بخش دوم مشتمل بر مباحث مربوط به سیستم حفاظت در برابر صاعقه شامل اهداف، کلیات و تعاریف، معرفی و شناخت سیستم، و معیارهای طراحی و مهندسی سیستم حفاظت از برافورد مستقیم صاعقه می باشد

